



GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**METODOLOGIA FUZZY-FMECA APLICADA EM POLÍTICA DE MANUTENÇÃO EM HIDROGERADORES
TIPO FRANCIS: ESTUDO DE CASO PARA A UHE GOVERNADOR JOSÉ RICHÁ (SALTO CAXIAS)**

**MARJORIE MARIA BELLINELLO (1); MARCELO RODRIGUES (1); CARLOS HENRIQUE MARIANO (1);
EMERSON RIGONI (1); RAPHAEL AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO (1); PAULO SÉRGIO WALENIA (1);
GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA (2); YAGO LAFOURCADE BARACY (3); GISELE MARIA DE
OLIVEIRA SALLES (4).**

**UTFPR - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (1); USP - UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO (2); UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (3); COPEL GERAÇÃO E
TRANSMISSÃO S.A. (4).**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova metodologia de suporte às ações efetivas de manutenção de ativos para o sistema de excitação dos geradores da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (UHE-GJR). A metodologia proposta é baseada em análise Fuzzy-FMECA. O modelo desenvolvido permite a busca por possíveis aperfeiçoamentos nas atividades de manutenção contemplando a otimização dos recursos humanos e materiais, com foco na confiabilidade e disponibilidade operacional do sistema de excitação. A aplicação considera relações de custo/benefício associadas a políticas de manutenção, dependentes do perfil operacional e de recomendações nacionais e internacionais para as melhores práticas de gestão de ativos baseadas em análise de risco.

PALAVRAS-CHAVE

Fuzzy-FMECA, Sistema de excitação, Gestão de Ativos, Confiabilidade, Tomada de decisão.

1.0 - INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas (UHEs) produzem em torno de 14% da energia mundial. Somente nos últimos dois anos houve um aumento de 2,3% na produção mundial de energia elétrica. O Brasil lidera este crescimento da capacidade hidrelétrica, seguido por quatro países asiáticos: China, Laos e Tajiquistão.

O crescimento do setor elétrico brasileiro exige aumento das instalações das UHEs e, consequentemente, maior complexidade na operação e manutenção. O sistema elétrico nacional é responsável por mais de 70% da energia gerada na matriz energética brasileira. Nesse contexto, a Unidade Geradora (UG) é o principal ativo que compõe um sistema de geração de energia elétrica, uma vez que é responsável pela conversão de energia mecânica em elétrica e, também, pelo controle adequado da tensão e potência de saída. A ocorrência de falhas nesse tipo de ativo compromete a continuidade e qualidade do fornecimento de energia, causando sérios prejuízos aos agentes de geração e consumidores finais (1).

A indisponibilidade do sistema energético exige altos custos de manutenção para o restabelecimento dos ativos e pagamento de multas e compensações impostas por órgãos reguladores, como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Portanto, é clara a necessidade de manter padrões mais rígidos de segurança, disponibilidade e confiabilidade operacional das Unidades Geradoras das UHEs, para garantir a continuidade e a conformidade nos quesitos de qualidade, produtividade e custo no fornecimento de energia.

Por sua vez, cada Unidade Geradora de uma UHE é composta por vários subsistemas acoplados, de naturezas distintas e que atuam de forma coordenada. Dentre os vários subsistemas, merecem destaque especial: turbina hidráulica, regulador automático de velocidade, gerador síncrono e sistema de excitação (excitatriz e regulador automático de tensão).

Segundo o Cigré-Brasil (2), o Sistema de Excitação de uma UG compreende todos os equipamentos e dispositivos necessários ao fornecimento de corrente contínua no circuito de campo (enrolamento rotórico) e necessários à regulação da tensão terminal do gerador. Tal sistema é responsável também por outras funções: controlar a potência reativa; atender ao valor de referência (set point) de tensão; amortecer oscilações eletromecânicas (PSS); garantir operação estável; e manter o gerador operando dentro da região normal operativa, propiciando o aumento da vida útil do gerador síncrono.

O Sistema de Excitação é um dos subsistemas mais complexos, pois exige altos níveis de precisão no controle e velocidade de resposta para que mantenha pleno funcionamento do gerador. A perda da excitação causa a parada da unidade geradora e o funcionamento inadequado do sistema de excitação pode ocasionar sobreaquecimento no estator e no rotor, além de comprometer a estabilidade do sistema. Logo, este subsistema demanda um monitoramento preventivo e preditivo adequado, bem como índices elevados de confiabilidade.

A garantia da disponibilidade e confiabilidade das UHEs pode ser alcançada com desenvolvimento e aplicação de uma política de manutenção adequada a cada tipo de ativo e seu respectivo Modo de Falha (MF). Atualmente a usina em estudo utiliza a metodologia de MCC de maneira qualitativa, o método proposto visa adicionar uma abordagem quantitativa na tratativa de falhas. Uma metodologia eficiente para estruturar a política de manutenção de ativos é a aplicação da Lógica Fuzzy para incorporar consistência a análise da Criticidade do MF para, assim, hierarquizar a prioridade de ações na FMECA (Análise dos Modos de Falha seus Efeitos e sua Criticidade) e assim compor o que se denomina Fuzzy-FMECA.

O processo de atribuição de peso para as variáveis (severidade, ocorrência e detecção), constituintes do índice RPN (número de prioridade de risco) é, geralmente, realizado de forma qualitativa, podendo este processo ocasionar inconsistência nos resultados (3). Portanto, o índice RPN realizado na FMECA tradicional pode não representar a real criticidade dos MFs, direcionando a prioridades duvidosas. Desta forma, pode ocorrer a alocação dos recursos materiais e humanos em atividades de manutenção não prioritárias, ou seja, pode haver um investimento com retorno insatisfatório em relação à disponibilidade e confiabilidade operacional dos ativos.

A associação da Lógica Fuzzy à análise FMECA soluciona a inconsistência na avaliação da criticidade do MF, por meio da aplicação de um método quantitativo difuso para priorizar, com consistência, as atividades de manutenção que devem ser executadas para bloquear as falhas.

Este artigo aborda a aplicação da metodologia Fuzzy-FMEA para avaliar a criticidade do MF e assim, auxiliando na tomada de decisão mais assertiva para gestão de ativos. Por meio de um estudo de caso, na UHE Governador José Richa (UHE-GJR/Salto Caxias), gerenciada pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia), foi possível confrontar a metodologia proposta com a tradicional para priorização do tratamento do MF.

O modelo desenvolvido permitirá a busca por possíveis aperfeiçoamentos nas atividades de manutenção contemplando a otimização dos recursos humanos e materiais, com foco na confiabilidade e disponibilidade operacional do sistema de excitação do gerador. O Fuzzy-FMEA poderá ser utilizado para a priorização de atividades para os componentes mais críticos, os quais apresentam defeitos que podem levar a paradas forçadas do gerador. A modelagem considera relações de custo/benefício associadas a políticas de manutenção, dependentes do perfil operacional da máquina, bem como recomendações nacionais e internacionais para as melhores práticas de gestão de ativos baseadas em análise de risco.

Este artigo apresenta parte dos resultados obtidos durante a execução do projeto PD-06491-0341 / 2014, de título "Metodologia para gestão de ativos aplicada a hidrogeradores com base em modelos matemáticos de confiabilidade e manutenibilidade", executado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e pela Universidade de São Paulo (USP) para a COPEL Geração e Transmissão S.A. no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico Brasileiro, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL."

2.0 - REVISÃO DA LITERATURA

Uma política adequada de manutenção precisa incluir atividades preventivas e preditivas capazes de bloquear a ocorrência de falhas críticas, a fim de manter a integridade da planta, garantindo confiabilidade e disponibilidade. Nesta seção, são apresentadas referências que sustentam a metodologia aplicada neste estudo.

2.1 Aplicação da metodologia Fuzzy - FMECA na gestão de manutenção

A análise FMECA é uma das ferramentas para análise de risco presente na literatura, que permite à equipe de manutenção avaliar um sistema, subsistemas e componentes para determinar quais possuem uma tendência maior de falhar e comprometer a função (4). Esta técnica contribui no planejamento da manutenção para eliminar ou minimizar riscos e, consequentemente, melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir os custos de manutenção (5),(6). A análise da criticidade do MF para priorizar o tratamento das falhas potenciais dentro da análise FMECA é realizada através do cálculo do índice RPN, resultado da multiplicação de três fatores - Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) - associados aos MFs, que são eventos ou fenômenos físicos que impedem subsistemas ou componentes de desempenhar as funções necessárias para o funcionamento do sistema dentro de limites preestabelecidos e, portanto, causando as falhas funcionais (7), (8), (9),(10). A descrição dos três fatores presentes no cálculo do RPN é dada a seguir:

- Severidade (S): representa o impacto ou a gravidade dos efeitos da falha na eficiência do sistema, na parte financeira, na segurança/confiabilidade e na questão ambiental;
- Ocorrência (O): refere-se à frequência da falha durante determinado período de tempo;
- Detecção (D): estima a eficiência dos controles de detecção de falha.

2.2.1 Avaliação clássica da criticidade do modo de falha

As dificuldades inerentes a avaliação da criticidade dos modos de falha (MFs) estão, principalmente, atreladas aos seguintes fatores: dificuldade dos especialistas em avaliar quantitativamente os índices que compõem o NPR (Severidade, Ocorrência e Detecção); e, inconsistência dos termos linguísticos normatizados para uma avaliação qualitativa, ou seja, em algumas aplicações não há consenso entre os especialistas da faixa de valores quantitativos representada pelos termos linguísticos. Nestes casos, é importante uma adequação consensual prévia entre os termos linguísticos a serem utilizados e a faixa de valores quantitativos que os mesmos representam (parametrização). Invariavelmente, esta adequação está vinculada a valores e critérios institucionais e características específicas do sistema a ser analisado. Também são importantes as questões práticas e conceituais inerentes a avaliação da criticidade entre as diferentes normas citadas a seguir.

Mediante a SAE-J1739:2002 (3), a avaliação da criticidade (NPR) é obtida pela multiplicação dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção, a qual apresenta os seguintes inconvenientes:

- É possível obter um NPR relativamente baixo ($S=10$, $O=1$, $D=1$, $NPR=10$) com uma severidade alta que pode inviabilizar todo um processo produtivo. Ao mesmo tempo, é possível ter um NPR relativamente alto ($S=5$, $O=5$, $D=5$, $NPR=125$) com índices moderados de Severidade, Ocorrência e Detecção. Uma análise descuidada pode concluir intuitivamente que o primeiro caso é menos crítico do que o segundo, culminando com a proposição de ações corretivas em detrimento de ações preventivas;
- É possível obter os mesmos valores de NPR para MFs distintos, por exemplo: $S=2$, $O=4$ e $D=9$ resulta no mesmo NPR de $S=9$, $O=4$ e $D=2$, o que dificulta a classificação e/ou priorização dos MFs;
- Independente da escala adotada, não é possível a obtenção de números primos maiores que 10 na multiplicação dos 3 fatores que compõem o NPR, o que limita o conjunto de valores válidos e gera lacunas em sua escala;
- A escala de valores, dos fatores que compõem o NPR, muitas vezes não é customizada pelas empresas para se adequar ao objeto de estudo e/ou aos termos linguísticos normalmente adotados pelos especialistas do grupo de FMECA. Esta prática pode culminar com avaliações equivocadas dos fatores que compõem o NPR.

Pela MIL-STD-1629A:1980 (11), a priorização dos MFs é obtida com o uso da matriz de criticidade, a qual apresenta os seguintes inconvenientes:

- Não considera a dificuldade de detecção das causas da falha, do MF ou de seus efeitos;
- Nem sempre é possível, na prática, ter dados históricos das falhas que permitam uma análise quantitativa adequada às necessidades da MIL-STD-1629A as quais são: probabilidade do MF, probabilidade condicional do efeito do MF, taxa de falha do componente (por 106 horas ou ciclos).

Já no manual AIAG & VDA:2019 (12), substitui o Número de Prioridade de Risco (NPR) pela Prioridade da Ação (PA). A partir das combinações entre Severidade, Ocorrência e Detecção a PA, para redução de riscos, é classificada em “Alta”, “Média” e “Baixa”. Diferentemente do método NPR, o método PA enfatiza a priorização de ações baseada primeiramente na Severidade, em seguida na Ocorrência e, por último, na Detecção. Assim, o método PA permite à equipe uma orientação mais clara sobre, no caso da manutenção, qual MF deve ser tratado primeiro.

3.0 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE EXCITAÇÃO DA UHE SALTO CAXIAS

O objetivo do método proposto é aplicar a metodologia Fuzzy-FMEA para **otimizar** a política de manutenção existente visando os componentes que estruturam o sistema de excitação da Unidade Geradora (UG1) da UHE Governador José Richa “Salto Caxias” da COPEL. Essa UHE possui quatro unidades geradoras do tipo Francis e sistema de excitação estático, sendo que cada unidade apresenta potência nominal de 345 MVA e fator de potência igual a 0,90. O desenvolvimento deste trabalho, bem como o sistema de excitação, é detalhado a seguir.

3.1 Descrição do sistema de excitação da UHE Salto Caxias

Desde o ano de 2020, a UHE Salto Caxias vem passando por um processo de modernização e atualização nos sistemas de excitação de suas unidades geradoras (UGs). Até o momento (Agosto de 2021), as UGs 1, 3 e 4 já

passaram por tal processo de modernização e estima-se que os Sistemas de Excitação da UG 2 seja atualizado até julho de 2022. O sistema de excitação implantado em 2020 nas UGs 1 e 4 foi o Sistema UNITROL 6000 da ABB (Asea Brown Boveri), sendo a 6ª geração da família de produtos UNITROL. Assim como o Sistema UNITROL P (versão antiga), o Sistema UNITROL 6000 é um sistema estático com excitação própria, tiristorizado e de duplo canal com regulação digital de tensão e dois modos de controle dentro de cada canal, sendo eles modo automático e modo manual. A Figura 1 apresenta a estrutura física e o diagrama funcional com os componentes principais do sistema de excitação da UG 1.

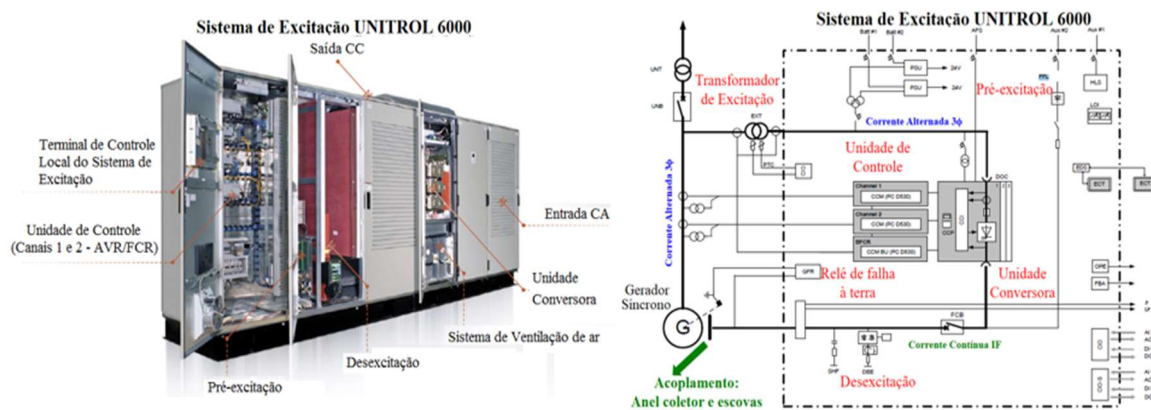


FIGURA 1 - Estrutura física e diagrama funcional geral do Sistema de Excitação UNITROL 6000 ABB
Fonte: Manual ABB UNITROL 600 (2017)

O sistema de Excitação Próprio (ou auto-excitado) permite que a alimentação do circuito de campo seja obtida por meio da energia em corrente alternada (CA) dos terminais do próprio gerador. O Transformador de Excitação (EXT) recebe a energia do gerador e reduz o perfil de tensão CA até o valor adequado para entrada da Unidade Conversora (DOC). O Conversor eletrônico de potência converte a corrente CA numa corrente CC (I_f) que é controlada/regulada adequadamente através dos ângulos de disparos da ponte de tiristores, que por sua vez recebem sinal de controle oriundo de um dos Canais da Unidade de Controle (CCM PC D530). A corrente de campo (I_f) flui através de um circuito CC até o ponto de conexão entre o Gerador Síncrono e Sistema de Excitação. Esse acoplamento é realizado por meio de anéis coletores e escovas (13).

O início do processo de excitação ocorre através do Sistema ou Circuito de Pré-excitação (FFL – Field Flashing), que é composto por Fonte Auxiliar redundante CA e CC e é responsável por injetar corrente CC diretamente no barramento CC (a jusante do Conversor) e excitar a máquina até que o nível de tensão terminal da máquina (U_t) seja adequado para atender os requisitos mínimos de operação (de tensão) do Conversor. Após a Unidade Conversora entrar em operação adequada, desliga-se o circuito de pré-excitação e o sistema de excitação próprio é estabelecido, sendo todo o processo controlado por um dos Canais da Unidade de Controle. Após a sincronização do gerador síncrono com a rede, o sistema de excitação opera normalmente regulando automaticamente a tensão (AVR - AUTO) e executando outras funções de controle, como controle de reativo (13). A Figura 2 apresenta resumidamente a estrutura hierárquica dos subsistemas que compõem a parte elétrica do hidrogerador UG.

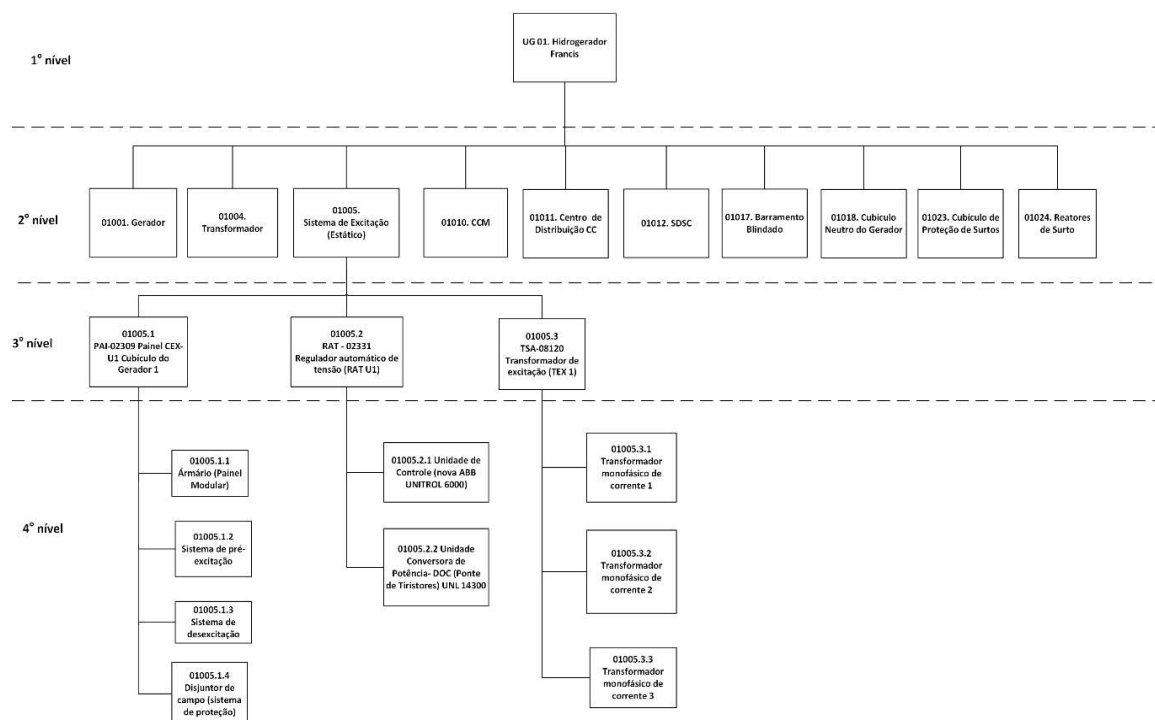


FIGURA 2 - Árvore Funcional (Detalhamento do subsistema de Excitação)

A metodologia Fuzzy-FMECA foi aplicada para analisar os MFs que impactam na confiabilidade do sistema de excitação, e assim propor atividades de manutenção com priorização de execução entre elas, visando bloquear a ocorrência dessas falhas. Inicialmente foi estruturada a Árvore Funcional (AF) do sistema de excitação para facilitar identificar os seus componentes, visando facilitar o entendimento dos MFs que os afetam. A AF apresenta, de forma sistemática, as inter-relações entre os componentes de um determinado sistema. Sua estrutura mostra, de forma lógica e hierárquica, a interdependência entre os diferentes componentes de um sistema para expor como cada um desempenha suas funções.

3.2 Tratamento da incerteza na avaliação da criticidade do modo de falha

A incerteza, presente na estruturação do conhecimento inerente à execução da FMECA, principalmente na avaliação da criticidade do MF, é, na maioria das vezes, de natureza léxica. Ou seja, o especialista tem uma avaliação ponderada da criticidade do MF considerando termos linguísticos (Ex.: Baixa, Média, Alta) sem necessitar de uma avaliação quantitativa, até porque, na maioria das vezes, não se tem os dados para uma avaliação quantitativa (14). Entretanto, esta análise é feita, usualmente, de forma subjetiva, sem uma regra clara, e o resultado dependerá da aversão ou propensão do analista/especialista ao risco. Vale lembrar que, MFs avaliados de maneira subjetiva resultam em prioridades inconsistentes, levando a ações que não impactam da forma esperada no sistema sob análise. Ações adicionais, além das previstas na FMECA são, invariavelmente, necessárias nestes casos.

Portanto, este trabalho propõe o uso da Lógica Fuzzy para tratamento da incerteza de natureza léxica presente na avaliação da criticidade do MF. A Lógica Fuzzy representa a incerteza por imprecisão, isto é, trabalha com conjuntos com limites imprecisos. Muito utilizada para representar termos linguisticamente imprecisos. Na lógica clássica, com base na Teoria Clássica dos Conjuntos, um elemento pertence ou não ao conjunto, enquanto, na lógica fuzzy, um elemento possui um grau de pertinência ao conjunto, que varia de 0 a 1, obtido por meio da função de pertinência que representa o conjunto (15).

Na abordagem proposta avalia-se a criticidade do MF a partir de um processo de inferência fuzzy, considerando a Severidade (S), a Ocorrência (O) e a Detecção (D). Esta abordagem faz uso de uma ferramenta computacional chamada de NPR-Fuzzy, desenvolvido pelo GPEC (Grupo de Pesquisa em Engenharia da Confiabilidade) da UTFPR. O NPR-Fuzzy é uma ferramenta computacional, mais precisamente um SBC-Fuzzy (Sistema Baseado em Conhecimento Difuso), que faz uso da lógica fuzzy para avaliar a criticidade do MF (NPR), apoiar a tomada de decisão e tratar as incertezas inerentes). Para validar o processo de inferência foi estabelecido um comparativo com a abordagem tradicional (multiplicação da SOD).

O NPR-Fuzzy foi concebido para minimizar o impacto das incertezas e limitações para avaliação da criticidade, a qual influencia diretamente na priorização de atendimento aos MFs apontados no FMECA. Dentre os atributos e funcionalidades do NPR-Fuzzy destaca-se a possibilidade de independência na atribuição da escala de valores quantitativos aos termos linguísticos qualitativos utilizados na atribuição dos fatores que compõem o NPR (SOD). Assim, os especialistas e/ou analistas podem utilizar termos linguísticos atrelados a valores de consenso e adaptados à realidade e/ou exigências da empresa/sistema. O NPR-Fuzzy determina a criticidade do MF a partir da agregação fuzzy dos índices de SOD e posterior desfuzzyficação do conjunto fuzzy resultante. Este método procura minimizar os inconvenientes decorrentes da multiplicação dos 3 índices (SOD), comumente utilizado nas abordagens tradicionais. A Tabela 1 mostra os termos linguísticos (termos primários) utilizados no NPR-Fuzzy para ponderação de cada item que compõe a avaliação da criticidade. Tabelas normatizadas, também poderão ser utilizadas para balizar a ponderação dos especialistas e/ou analistas.

TABELA 1 - Termos linguísticos utilizados na abordagem proposta pelo NPR-Fuzzy

Severidade do Efeito (S)	Probabilidade de Ocorrência da Falha (O)	Chances de Detecção (D)
Muito Baixa	Muito Baixa	Certa
Baixa	Baixa	Alta
Moderada	Moderada	Moderada
Alta	Alta	Remota
Muito Alta	Muito Alta	Muito Remota

O NPR-Fuzzy utiliza a máquina de inferência do FuzzyClips. A tela inicial (Figura 3a), aborda os aspectos gerais do software e seus objetivos. A tela de Parametrização e Ponderação (Figura 3b), permite ao usuário: parametrizar as funções de pertinência a serem utilizados na ponderação dos itens (SOD) que compõe a avaliação da criticidade do MF; e, proceder a ponderação destes itens para cada MF sob análise utilizando um valor crisp (número de escala real) ou um termo linguístico. Concluído o processo de ponderação, o Botão Avaliar gera o relatório de avaliação da criticidade do MF sob análise (Figura 3c).

O relatório gerado pelo NPR-Fuzzy mostra os conjuntos fuzzy (SOD) formados pela ponderação e o conjunto *Fuzzy* resultante, para a Criticidade do MF (NPR), formado pela agregação dos conjuntos anteriores. Além disso mostra os valores *crisp*, desfuzzyficados para cada um dos conjuntos.

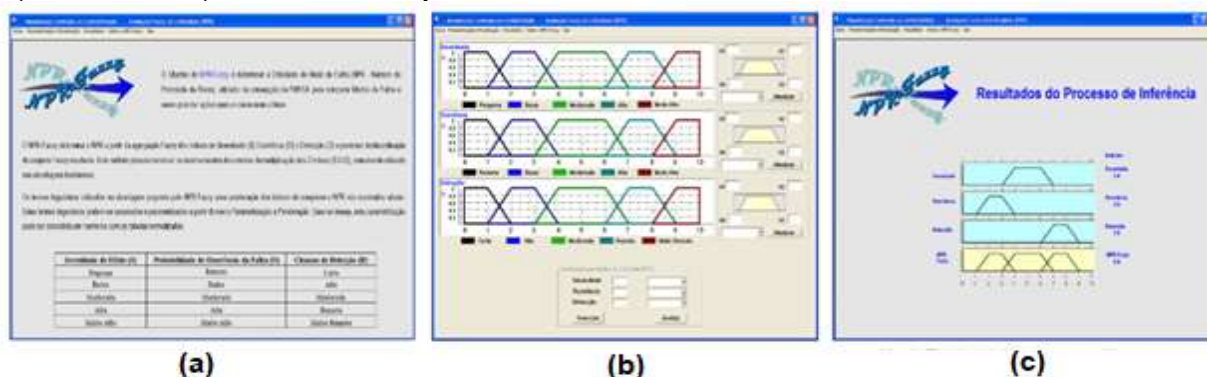


FIGURA 3 – (a) Tela inicial NPR-Fuzzy, (b) Parametrização e ponderação e (c) Relatório de avaliação

O processo de inferência fuzzy normalmente se dá da seguinte forma: a) Um valor crisp de entrada (avaliação), é convertido em um termo linguístico seguindo uma função de pertinência (Ex.: função triangular, trapezoidal, etc...), este procedimento é chamado de Fuzzyficação; b) O termo linguístico resultante ou uma combinação destes irá ativar um conjunto de regras (Implicação); c) Estas regras relacionam a entrada com a saída, resultando em termos linguísticos de saída; d) Estes termos linguísticos serão então agrupados, formando o conjunto fuzzy de saída (Agregação); e) A partir da agregação aplicam-se as regras de Defuzzyficação para obter-se o valor crisp, de saída. A Figura 4 apresenta um diagrama que ilustra o processo descrito.

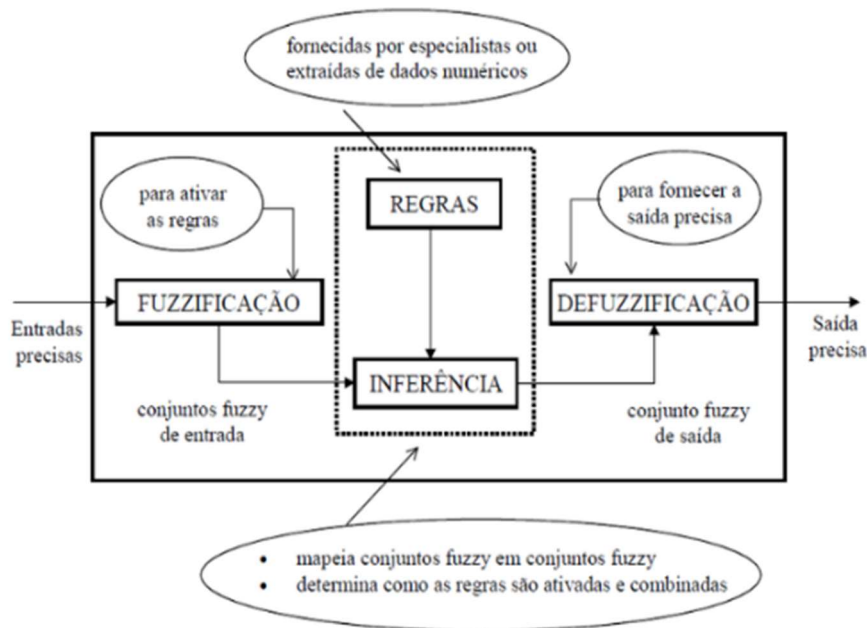


FIGURA 4 - Processo de Inferência Fuzzy.
Adaptado de (TANSCHKEIT, 2003, p. 26).

Na metodologia Fuzzy-FMECA é possível haver independência na atribuição da escala de valores quantitativos em relação aos termos linguísticos qualitativos, que fazem parte da atribuição de valores dos fatores S, O e D do RPN. Após a fuzzyficação são obtidos os graus de pertinência de cada valor de entrada para expressá-los na forma dos termos linguísticos qualitativos. A agregação pode ser realizada a partir de uma base de regras fuzzy como “sentença”, a qual retrata a experiência do especialista. A desfuzzyficação realiza a transformação de um conjunto fuzzy resultante da agregação em um valor escalar de acordo com o grau de pertinência envolvido.

3.3 Avaliação da criticidade do modo de falha (Crisp x Fuzzy)

Para ilustrar a aplicação do SBC-Fuzzy proposto, na avaliação da criticidade do MF, foi tomado como exemplo a avaliação da criticidade de um dos MFs do RAT (Regulador Automático de Tensão), do Sistema de Excitação de um Hidrogerador da UHE Governador José Richa (Salto Caxias), conforme mostrado na Tabela 2.

TABELA 2 - Avaliação da criticidade do Modo de Falha (Crisp x Fuzzy).

Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Componente	Efeito no Equipamento	Efeito no Sistema	Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Controles Atuais	Deteção (D)	Criticidade
Abordagem Tradicional: NPR = Severidade x Ocorrência x Deteção											
Atuar como regulador (Controle da tensão, na faixa de 0,9 a 1,05 pu)	Não mantém a tensão estável em uma faixa de 0,9 a 1,05 pu	Falha no automatismo dos retificadores	Unidade de Controle (Ponte de Tiristores)	Rotinas erradas	Redução da confiabilidade e perda de geração	8	Erro de programação e execução de manutenções	1	Manutenção Corretiva	1	8
Abordagem Fuzzy: Termos Linguísticos → Função de Pertinência → Implicação → Agregação → Defuzzyficação											
Atuar como regulador (Controle da tensão, na faixa de 0,9 a 1,05 pu)	Não mantém a tensão estável em uma faixa de 0,9 a 1,05 pu	Falha no automatismo dos retificadores	Unidade de Controle (Ponte de Tiristores)	Rotinas erradas	Redução da confiabilidade e perda de geração	Alta	Erro de programação e execução de manutenções	Muito Baixa	Manutenção Corretiva	Certa	Média = 500

É possível inferir que, na abordagem tradicional, que avalia a criticidade do MF pelo NPR ($NPR = Severidade \times Ocorrência \times Deteção$), pode produzir avaliações iguais independente da ponderação dos 3 valores constituintes do NPR (Tabela 3).

TABELA 3 - Abordagem Tradicional: NPR = Severidade x Ocorrência x Deteção

Modos de Falha (MF)	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	Criticidade
MF1	8	1	1	8
MF2	1	8	1	8
MF3	1	1	8	8

Na abordagem Fuzzy ocorre a ponderação da criticidade em função do impacto individual de cada um dos seus parâmetros. Ou seja, cada termo linguístico utilizado para avaliar os componentes da criticidade (Severidade, Ocorrência e Deteção) terá um impacto diferente no valor final da criticidade (Tabela 4). Desta forma, a possibilidade de repetições dos valores de criticidade se reduz muito pois, a importância dos fatores que compõem sua avaliação vai depender do contexto da análise e da opinião do especialista.

TABELA 4 - Abordagem Fuzzy: Avaliação por Termos Linguísticos e Processo de Inferência Fuzzy.

Modos de Falha (MF)	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	Criticidade
MF1	Alta = 8	Muito Baixa = 1	Certa = 1	Média = 500
MF2	Muito Baixa = 1	Alta = 8	Certa = 1	Baixa = 250
MF3	Muito Baixa = 1	Muito Baixa = 1	Remota = 8	Muito Baixa = 85,6

Na comparação entre os valores de criticidade apresentados nas tabelas 03 e 04, verifica-se que os NPRs dos 3 modos de falhas analisados (MF1, MF2, MF3) na tabela 03 apresentam o mesmo valor, indicando que essas falhas possuem o mesmo peso na tomada de decisão. Porém, o indicador apresentado na Tabela 04, calculado pela metodologia Fuzzy-FMECA, distingue a criticidade de cada modo de falha, mostrando que o MF1 envolve mais risco na sua ocorrência (criticidade média = 500).

A análise de criticidade dos modos de falhas pela FMECA tradicional pode induzir o gestor ao erro na tomada de decisão, pois o indicador NPR não diferencia de forma efetiva o risco envolvido nas falhas analisadas. A metodologia Fuzzy - FMECA determina de maneira mais clara a criticidade dos modos de falhas pela variável linguística, facilitando ao gestor a estruturar atividades de manutenção mais eficazes para bloquear os modos de falhas que apresentam maior criticidade. O uso da Fuzzy-FMECA impacta positivamente nos critérios de tomada de decisão para escolha das melhores práticas que estruturam políticas de manutenção. Com base na criticidade dos modos de falhas também é possível identificar o modo de falha mais crítico e assim priorizar atividades de manutenção, otimizando os recursos financeiros, materiais e humanos, garantindo a confiabilidade no sistema de excitação de hidrogeradores.

4.0 – CONCLUSÃO

Diante da necessidade de decisões assertivas na gestão de ativos, as organizações têm aplicado principalmente os métodos e ferramentas baseados em análises de falhas, indicadores de desempenho e análises de risco. Quanto melhor a qualidade da informação para o gestor de manutenção, mais eficaz será o processo decisório. No presente trabalho a metodologia Fuzzy-FMECA, com o uso de variáveis linguísticas, determinou um indicador de com maior consistência e diferenciação da criticidade dos modos de falha analisados do sistema de excitação de um hidrogerador, quando comparado com os valores obtidos pela FMECA tradicional.

Assim, conclui-se que a implantação da Fuzzy-FMECA irá orientar com precisão a avaliação correta do indicador de criticidade, auxiliando no processo decisório da gestão da manutenção de hidrogeradores com uma abordagem lógica e estruturada, visando garantir confiabilidade na geração de energia com segurança pessoal, segurança patrimonial e segurança ambiental.

AGRADECIMENTOS

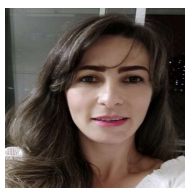
Os autores agradecem à COPEL (Companhia Paranaense de Energia) e ao MEC (Ministério da Educação) pelo apoio e financiamento.

REFERÊNCIAS

- (1) KUNDUR, P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill – Estados Unidos. 1994.
- (2) CIGRÉ-BRASIL. Guia para Especificação de Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas. Força Tarefa C2.11. Brasil. 2011.
- (3) SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE - J1739:2002. Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA). Society of Automotive Engineers, 2002.
- (4) SHARMA, S. R.; RAHI, O. P.; SINGH, A.; PATIL, A. J. "A New Methodology for Risk Analysis for Excitation System of Alternator in SHP using FIS," 2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2020, pp. 85-92, doi: 10.1109/ICICCS48265.2020.9121103.
- (5) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 55000:2014 Gestão de ativos-Visão geral, princípios e terminologia, 2014.
- (6) SOLTANALI, H., ROHANI, A., ABBASPOUR-FARD, M.H. et al. Development of a risk-based maintenance decision making approach for automotive production line. Int J Syst Assur Eng Manag 11, 236–251 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00927-1>.
- (7) STANOJEVIĆ, D, ĆIROVIĆ, V. Contribution to development of risk analysis methods by application of artificial intelligence techniques. Qual Reliab Engng Int. 2020; 36: 2268– 2284. <https://doi.org/10.1002/qre.2695>
- (8) RIGONI, E. Metodologia para implantação da manutenção centrada na confiabilidade: uma abordagem fundamentada em sistemas baseados em conhecimento e lógica Fuzzy. 2009. 342f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- (9) SUWANASRI, C; SARIBUT, S; SUWANASRI, T; PHADUNGTHIN R. Risk Analysis Using Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis for Transmission Network Assets. *Energies*. 2021; 14(4):977. <https://doi.org/10.3390/en14040977>.
- (10) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC/ISO 31010 - Risk management – Risk assessment techniques (Técnicas de avaliação e gestão de riscos). 2021
- (11) MILITARY PROCEDURE MIL-P-1629: 1980. Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), 1980.

- (12) MANUAL DE FMEA AIAG & VDA, 1ª ed. Michigan, USA: Automotive Industry Action Group (AIAG) & Verband der Automobilindustrie (VDA), 2019. ISBN 9781605344409
- (13) MANUAL ABB SISTEMA DE EXCITAÇÃO UNITROL P 6000. 2017
- (14) ZOU, B. et al., "Improved RCM method by AHP-FCE for the maintenance strategy of reciprocating compressor unit," 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020, pp. 124-129.
- (15) BALARAJU, J.; GOVINDA, M.; CHIVUKULA, R.; MURTHY, S. Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine – A case study, Journal of Sustainable Mining, v. 18, Issue 4, 2019, pp. 257-268.
- (16) TANSCHKEIT, R. Sistema Fuzzy. DEE-PUC-Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.inf.ufsc.br/~mauro/ine5377/leituras/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>. Acessado em 14 de setembro de 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



MARJORIE MARIA BELLINELLO - Pós-doutora em Engenharia Mecânica pela Università Politecnica delle Marche -UNIVPM (Ancona/Itália - 2021). Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo - USP (2015) e Mestrado em Engenharia de Produção pela UTFPR (2011). Possui experiência profissional na área de manutenção e gestão Industrial. Atualmente é professora na UTFPR - Câmpus GP e atua com pesquisas nos temas: Engenharia de manutenção e confiabilidade, Métodos decisórios multicritérios (MCDM) e Ferramentas de IA (Inteligência Artificial) aplicada em processos decisórios.

(2) YAGO LAFOURCADE BARACY. - Mestre em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC - 2020). Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS - 2016) - Atua nas áreas de: operação e manutenção em geração de energia elétrica; confiabilidade em sistemas elétricos de potência; qualidade de energia elétrica.

(3) RAPHAEL AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO - Possui Graduação em Eng. Elétrica Eletrotécnica pela UNESP de Ilha Solteira (2005), Mestrado (2007) e doutorado (2011) em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade de São Paulo - USP. Atualmente é Professor de ensino superior pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR e Professor Permanente do Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia - PPGSE, ambos do Câmpus Curitiba. Tem experiência em pesquisa na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando nos seguintes temas: operação em tempo-real, análise de estabilidade, controle automático de geração; geração de energia; estimação de estados.

(4) PAULO SÉRGIO WALENIA - Mestrando em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Especialista de Gerenciamento de Obras pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR - 2002) - Graduado em Engenharia Industrial Elétrica (CEFET-PR - 1994) - Técnico em Eletrotécnica (CEFE-PR - 1988) - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná desde 1994.

(5) MARCELO RODRIGUES - Doutor em Educação pela Universidade Del Mar (UDELMAR - Chile 2013). Mestre em Tecnologia pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR - 2003). Graduado em Física pela Universidade Federal do Paraná (UFPR - 1998). Técnico em Eletrotécnica (CEFET-PR - 1989). Eletricista Diesel-elétrica de Locomotivas (SENAI / RFFSA - 1988). Desde 1989 é professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Coordenador dos Cursos de Especialização em: Gerência de Manutenção e Energias renováveis. Membro do comitê da ABRAMAN Regional Sul PR/SC/RS (desde 2001). Autor de livros e artigos na área de Manutenção.

(6) CARLOS HENRIQUE MARIANO - Carlos Henrique Mariano, engenheiro eletricista de formação em 1989 pelo CEFET-PR. É Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) lotado no Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT UTFPR-CT. Doutor em engenharia de sistemas pela Universidad Nacional Autonoma de México - UNAM, 2013, área de interesse Pesquisa Operacional - sub área otimização evolutiva. Áreas de interesse - otimização em engenharia, análise de dados de vida, análise da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de sistemas, otimização da confiabilidade de sistemas e educação em engenharia.

(7) GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA – Professor Associado do Depto. Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Possui doutorado em Eng. Mecânica pela USP e executa pesquisas na área de confiabilidade, manutenção e análise de risco de sistemas eletromecânicos. Coordena projetos de pesquisa junto à empresas de geração de energia visando a análise de disponibilidade de sistemas de geração, incluindo a melhoria deste indicador com o emprego de técnicas de gestão

de ativos, ressaltando-se a implantação das filosofias de MCC e análise de risco, com ênfase na detecção e diagnose de defeitos.

(8) GISELE MARIA DE OLIVEIRA SALLES - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em 2006, Especialização em Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade pela UTFPR (2012) e Mestrado em Sistemas de Energia também pela UTFPR (2020). Atua como Engenheira de Gestão de Manutenção de Usinas Sênior na Copel Geração e Transmissão desde 2008.

(9) EMERSON RIGONI – Professor Titular do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da UTFPR, atuando na graduação e na pós-graduação junto aos seguintes temas: engenharia da confiabilidade, metodologias para gestão da manutenção e métodos decisórios multicritérios. Doutorado em Engenharia pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (UTFPR). Graduação em Engenharia Elétrica pela (UTFPR). Coordenador dos seguintes cursos de Pós-Graduação (Lato-Sensu) da UTFPR: Engenharia da Confiabilidade, MBA em Gestão de Ativos e Lean Six Sigma - Certificação Black Belt.