

METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS USANDO CONCEITOS DE LÓGICA DIFUSA (CONEM2014-1337)

Iván Patricio Moreno Marcos, morenomarcos@unb.br
Alberto José Álvares, alvares@AlvaresTech.com
Manuel Rodrigo Urbano Abadia, manuel487@gmail.com

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Grupo de Inovação em Automação Industrial (GIAI), CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Resumo: No presente trabalho é apresentada uma proposta metodológica que aborda a problemática do diagnóstico de falhas em equipamentos de geração de energia hidrelétrica pertencentes às Unidades Geradoras Hidráulicas (UGHs) em usinas hidrelétricas. A detecção precoce de falhas em UGHs melhora a precisão da programação de tempos e reduz os custos em atividades de manutenção preventiva e corretiva a nível empresarial. A proposta metodológica estabelece as linhas gerais de pensamento que conduzem à criação e estruturação de uma base de regras de produção e propõe o uso de conceitos da lógica difusa para representar o conhecimento adquirido através de entrevistas feitas aos operadores e mantenedores das UGHs, pertencentes à usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no que diz respeito ao raciocínio envolvido no diagnóstico e reparo de falhas em equipamentos de geração de energia hidrelétrica. Por último é feito um estudo de caso no sistema de resfriamento do gerador elétrico que pertence a cada UGH da referida usina. A metodologia proposta é capaz de criar uma base de conhecimento para diagnóstico de falhas em equipamentos de geração de energia hidrelétrica, além de gerar um conjunto de atividades operacionais de manutenção para cada falha mapeada que por sua vez auxiliam à tomada de decisão dos operadores e mantenedores com relação ao equipamento que apresenta algum tipo de comportamento anormal.

Palavras-chave: Tomada de decisão, Diagnóstico de falhas, Unidades Geradoras Hidráulicas, Regras de produção, Lógica difusa

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, sem necessidade de ser especialista no assunto, é fácil perceber no cotidiano, que há uma exigência cada vez maior no que diz respeito ao consumo de energia elétrica em termos de qualidade, eficiência e custos, tanto a nível empresarial quanto de consumidor final. Por tanto há uma necessidade, no contexto de sistemas elétricos de potência, das concessionárias aperfeiçoarem os seus processos industriais envolvidos para um fornecimento contínuo de energia elétrica de maior qualidade; como exemplos de sistemas elétricos de potência podem-se citar: usinas hidrelétricas, usinas termelétricas, usinas eólicas, etc. Segundo a norma técnica NBR-5462, (1994), pode-se definir um sistema elétrico de potência como um conjunto de instalações que albergam uma rede de equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, cujos limites de operação são determinados por meio de critérios apropriados, tais como localização geográfica, concessionário, tensão, entre outras.

Por outro lado, um equipamento elétrico pode ser visto como qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional ou sistema que possa ser considerado individualmente, o qual possui características de função requerida, modo de funcionamento, disponibilidade, confiabilidade, manutenibilidade, vida útil; assim sendo, equipamentos elétricos podem experimentar, no decorrer do seu funcionamento, defeitos, falhas e panes que por sua vez podem ser mitigados total ou parcialmente através de programas de manutenção corretiva, manutenção preventiva, manutenção preditiva, entre outras filosofias de manutenção NBR-5462, (1994).

Dentre as filosofias de manutenção, que contribuíram de forma qualitativa à metodologia proposta, encontra-se a Manutenção Baseada em Condição (MBC), que pode ser definida como um processo cujo foco está centrado na detecção/coleta de informações e dados que definem o estado de um equipamento em particular ISO-13372, (2004). Por outro lado temos a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) que pode ser definida como um processo usado para determinar os requerimentos de manutenção de qualquer ativo físico (equipamento) no seu contexto de operação. Assim mesmo a MCC usa ferramentas de confiabilidade como a tabela FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) ou Análise dos modos e efeitos de falhas, a qual também foi utilizada na metodologia Moubray, (1997).

No contexto específico de geração de energia hidrelétrica, uma usina, pode ser considerada como uma instalação de grande porte na qual a energia elétrica é obtida por conversão da energia gravitacional da água proveniente geralmente de rios NBR-5460, (1992). Uma usina hidrelétrica geralmente possui, segundo a sua capacidade de geração de energia elétrica, um conjunto de Unidades Geradoras Hidráulicas (UGHs) as quais albergam equipamentos de diferentes naturezas (geralmente elétrica, mecânica ou eletromecânica) tais como: Geradores Elétricos, Turbinas Hidráulicas, Reguladores de Velocidades, Mancais, entre outros. Dependendo das políticas de manutenção e operação de cada usina hidrelétrica, esses equipamentos, de modo geral, são hierarquizados em sistemas, subsistemas e componentes.

Devido à diversidade e complexidade de equipamentos, os quais estão inseridos nas diversas fases de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, as áreas de manutenção e operação em usinas hidrelétricas têm a necessidade de integrar em seus sistemas de monitoramento e supervisão de processos, sistemas computacionais o suficientemente eficientes para detecção, diagnóstico e prognóstico de falhas e/ou defeitos nesses equipamentos de geração de energia hidrelétrica, com o intuito de possuir um auxílio à tomada rápida de decisões no que diz respeito ao tipo de atividades operacionais de manutenção a executar para mitigar parcial ou totalmente a falha que descreve algum equipamento em estado anormal Li *et al.* (2012).

Segundo o parágrafo anterior, o processo de diagnóstico pode ser definido como o tratamento, por parte do especialista, dos sintomas que experimenta um equipamento para determinar a natureza da falha ou defeito, enquanto que, o processo de prognóstico está relacionado à análise dos sintomas das falhas para prever uma condição e tempo de vida útil restante do equipamento. Por outro lado, entenda-se defeito como a condição que se origina em um equipamento quando um dos seus componentes eletrônicos ou partes de mecânicas sofreram alguma degradação ou apresentam algum comportamento anormal, o que pode levar o equipamento a uma condição de falha; em contraste, o conceito de falha está relacionado ao término da habilidade de um equipamento em desempenhar sua função requerida ISSO-13372, (2004).

Na medida em que o problema de pesquisa vai ganhando ressonância, na literatura científica vão se acrescentando novos paradigmas emergentes, como uma tentativa de abordar de forma mais produtiva o problema de diagnóstico e/ou prognóstico de falhas/defeitos em equipamentos elétricos, mecânicos ou eletromecânicos de modo geral, independentemente do contexto de aplicação, desde um nível mais empresarial. Além disso, nasce também um conjunto de *Standards* industriais no contexto de manutenção de ativos físico ou equipamentos como a PAS 55, que define a necessidade de um plano estratégico global de manutenção que descreva a visão, políticas, objetivos e estratégias organizacionais BSI, (2011).

Dentre os mais destacados paradigmas emergentes temos a *e-maintenance* (manutenção eletrônica) que é definida como parte da gestão da manutenção, onde as máquinas são monitoradas e gerenciadas pela internet Lee *et al.* (2006). Por outro lado a PHM (*Prognostic Health Management*) ou Gestão do Prognóstico da Saúde do equipamento (ativo físico) é considerada como uma técnica de engenharia e tecnologia que pode ser usada para dar suporte à MBC Valavanis, (2009). Por último o padrão OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition Based Maintenance*) ou Arquitetura de um Sistema Aberto para Manutenção Baseada em Condição, a qual especifica uma arquitetura padrão baseada em camadas (aquisição de dados, processamento de sinal, monitoramento de condição, avaliação de saúde, avaliação de prognóstico e tomada de decisão) para a implementação de sistemas MBC MIMOSA, (2008). Vale mencionar que a estrutura da base de conhecimento gerada a partir da metodologia segue esse padrão.

Basicamente, a proposta metodológica nasceu com o objetivo de dar continuidade à metodologia e sistema computacional SIMPREBAL (Sistema Inteligente de Manutenção Preditiva de Balbina) que foi concebido como um sistema baseado em regras de produção cujo núcleo metodológico se baseia na utilização do padrão OSA-CBM e a tabela FMEA para a estruturação e computação das suas regras de produção, além de utilizar conceitos de MCC e MBC (Amaya, 2008; Souza, 2008 e Tonaco, 2008). Para uma maior compressão da metodologia e sistema computacional SIMPREBAL vejam-se (Álvares e Amaya, 2012; Álvares e Amaya, 2010; Álvares *et al.* 2009; Álvares *et al.* 2007a; Álvares *et al.* 2007b; Álvares e Amaya, 2007 e Álvares *et al.* 2007c). Através da implementação computacional da proposta metodológica nasceu o novo sistema SIMPO (Sistema Integrado de Manutenção Preditiva e Operação) que herda toda a infraestrutura de *software* e a base de conhecimento do sistema SIMPREBAL.

Por outro lado, o grande diferencial que traz a nova metodologia proposta em relação à metodologia SIMPREBAL é o uso de conceitos de lógica difusa para representar o conhecimento do especialista (operador/mantenedor) no que diz respeito ao raciocínio envolvido no diagnóstico/reparo de falhas/defeitos em equipamentos elétricos.

Dentre as principais contribuições ou *insights* que traz a proposta metodológica ao estado da arte em diagnóstico de falhas/defeitos em equipamentos de geração de energia elétrica, podem-se sintetizar as seguintes:

- ✓ Uma metodologia genérica, independente do contexto de aplicação, para geração de uma lista de diagnóstico de defeitos/falhas além de um conjunto de atividades operacionais de manutenção/operação para mitigação desses defeitos/falhas em equipamentos elétricos usando uma arquitetura cliente-servidor e tecnologia *Applets*;
- ✓ O uso diferenciado de conceitos da lógica difusa (conjuntos difusos) para representar e lidar com a incerteza contida nas informações provenientes dos operadores e mantenedores, realizadas através de entrevistas que se valem da tabela FMEA, no que diz respeito ao diagnóstico de defeitos/falhas baseados nas condições do equipamento que experimenta algum comportamento anormal seguindo a filosofia da MBC;
- ✓ A partir da metodologia, a implementação computacional de uma base de conhecimento baseada em regras de produção difusas e não difusas desenvolvidas em linguagem *Jess* Friedman, (2003), usando a biblioteca *FuzzyJess* Orchard, (2011) e seguindo a estrutura do padrão OSA-CBM.

2. ESTADO DA ARTE: DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Desde uma ótica de chão de fábrica, na literatura científica, existe uma vasta quantidade de abordagens usando técnicas de Inteligência Computacional (IC), como a lógica difusa, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e sistemas baseados em conhecimento, como sistemas baseados em regras de produção, sistemas baseados em modelos, etc., além disso, existem também abordagens híbridas que integram duas ou mais técnicas de IC isoladas com o objetivo de superar as limitações encontradas em cada técnica de IC quando empregadas independentemente, que tratam o problema descrito neste artigo.

Para tanto, há a necessidade de alocar a pesquisa bibliográfica dentro dessas linhas de pesquisa específicas, uma tentativa não exaustiva, desde uma visão internacional. A presente pesquisa enquadra-se de forma genérica em: *sistemas de diagnóstico de falhas em equipamentos elétricos usando técnicas de IC delimitado a um contexto de geração de energia elétrica*. No caso particular da pesquisa, as técnicas de IC empregadas se reduzem ao uso da teoria da lógica difusa somada ao desenvolvimento de um sistema especialista (ou sistema baseado em regras de produção). Cabe mencionar que esta alocação metodológica utilizou um conjunto de palavras-chave para busca de artigos procedentes de conferências e revistas utilizando basicamente a plataforma de bases de dados digitais: *IEEE Xplore*.

Por outro lado, para elaborar uma discussão mais acurada da importância de abordar o problema em questionamento deste artigo, deveria ser feita uma revisão de literatura exaustiva abrangendo décadas de pesquisa afim de que desse modo se possa vislumbrar os possíveis caminhos alternativos de solução cuja base empírica reflete uma análise e inferência profunda no que diz respeito às principais vantagens, desvantagens, contexto de aplicação, base matemática, entre outros fatores que determinam as diferentes abordagens encontradas no estado da arte. Porém, este artigo oferece um levantamento não exaustivo, reunindo alguns artigos importantes segundo a visão dos autores e salienta algumas características evidenciadas nessas abordagens.

Sem adentrar em um contexto histórico detalhado relacionado ao problema de pesquisa, de início houve várias pesquisas que tentaram relacionar conceitos da teoria de decisão com técnicas de IC e sistemas especialistas para abordar basicamente o problema de representação do conhecimento especialista Horvitz *et al.* (1988). Posteriormente percebeu-se uma tendência, no decorrer dos anos 80, de aplicações de sistemas especialistas em sistemas elétricos de potência, abordando diversos problemas como diagnóstico, prognóstico e controle, devido basicamente às suas vantagens de flexibilidade, entendimento, universalidade e rapidez como sintetizado no trabalho de Zhang *et al.* (1989).

No começo dos anos 90, durante os 5 primeiros anos, deu-se uma peculiar ênfase na aplicação da teoria da lógica difusa e redes neurais artificiais em sistemas de potência abordando o problema de detecção de falhas em equipamentos, salientando a avaliação da segurança em sistemas elétricos como explicado em Ping e Shiheng, (1993) e Chow, (1994). Além do surgimento de alguns tutoriais substanciais publicados em revista relatando as principais características promissórias do uso de sistemas de lógica difusa em aplicações de engenharia Mendel, (1995).

Na metade dos anos 90, surgiu uma maior ênfase, no que diz respeito à contextualização, de técnicas de IC (teoria de conjuntos difusos, redes neurais e sistemas especialistas aplicadas a sistemas elétricos de potência, salientando suas potencialidades de aplicação em problemas relacionados ao controle em tempo real, operações, planejamento de operações e planejamento através do uso de sistemas especialistas, redes neurais artificiais, teoria de conjuntos difusos e busca heurística, salientando principalmente suas principais vantagens e desvantagens como sintetizado em Dabbaghchi *et al.* (1997) e Madan e Bollinger, (1997), além de possíveis abordagens dessas técnicas de IC ao diagnóstico de falhas em transformadores de sistemas de potência Zhou *et al.* (1997).

No decorrer do ano 2000 até 2005, cresceu o número de trabalhos procurando estabelecer as diretrizes para a utilização de sistemas especialistas, lógica difusa e redes neurais em aplicações industriais, abordando basicamente os problemas de representação, aquisição e processamento do conhecimento, além de elaborar um exaustivo levantamento relacionando as principais metodologias na literatura e ainda sugerir possíveis integrações de conceitos de sistemas especialistas e lógica difusa com outras ciências, como as ciências cognitivas, psicologia e comportamento humano com o objetivo de atingir um sistema de inferência o mais próximo ao raciocínio humano (Dote e Ovaska, 2001 e Liao, 2005). Por outro lado, trabalhos de revisão de literatura relacionando técnicas de monitoramento de condição de equipamentos elétricos e abordagens de IC para resolver problemas relacionados ao diagnóstico e prognóstico de falhas em sistemas elétricos de potência são encontradas nesse espectro de tempo Han e Song, (2003).

Já a partir do ano 2006 até o 2010 surgiram alguns artigos de pesquisa que relacionavam a metodologia de MBC com técnicas de IC com o objetivo de abordar problemas relacionados a representação do conhecimento técnico lidando com características como inconsistência, redundância e falta de informações contidas nesse conhecimento, em um contexto de usinas hidrelétricas (Zhong *et al.* 2006 e Falqueto e Telles, 2007). No decorrer dos anos 2008, 2009, 2010 e 2011, buscaram-se novos horizontes de aplicação para a lógica difusa e sistemas especialistas. Em particular, salientou-se um esforço na procura do seu uso com outras metodologias como MCC, MBC, FMEA como o objetivo de abordar problemas de diagnóstico, prognóstico, monitoramento da condição, ótimo planejamento de manutenção, vida útil restante de equipamentos, segurança e integridade através do desenvolvimento de sistemas inteligentes de auxílio à tomada de decisão (Kumar *et al.* 2009; Niu *et al.* 2010 e Qingfeng *et al.* 2011).

Por fim, nos últimos dois anos, consolidou-se a produção científica voltada ao diagnóstico de falhas em transformadores de potência usando a lógica difusa e sistemas especialistas, além de técnicas específicas para detecção de falhas em transformadores (como a análise de gás dissolvido) foram desenvolvidos na literatura (Huang *et al.* 2012; Wu *et al.* 2012 e Ahmed *et al.* 2013). Assim, percebe-se toda uma trajetória notável envolvendo pesquisa relacionada à lógica difusa aliada a outras técnicas de IC e metodologias de manutenção abordando o problema em questão.

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Uma iniciativa precursora, desta abordagem metodológica, nasceu no trabalho de dissertação de Moreno, (2012), que propõe uma abordagem para o processamento inteligente de monitoramento, baseado na condição de equipamentos elétricos usando conceitos da lógica difusa em um estudo de caso da usina hidrelétrica de Balbina. Como uma consequência daquela proposta, nasceu uma das principais motivações que deram origem à proposta metodológica que está relacionada com o tema da representação do conhecimento, em outras palavras, tentar codificar o vasto conhecimento especialista em relação à detecção, diagnóstico e reparo de falhas/defeitos em equipamentos elétricos, que foi feito através de entrevistas aos mantenedores e/ou operadores da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, usando uma linguagem de alto nível orientada a objetos. Devido à natureza da representação do conhecimento optou-se por usar a lógica difusa por suas características conceituais e matemáticas, para lidar com as incertezas e subjetividades intrínsecas à linguagem usada pela equipe técnica em processos industriais.

Como resultado desta proposta e visando auxiliar a equipe técnica em relação à tomada rápida de decisões no que diz respeito ao diagnóstico/reparo de falhas/defeitos em equipamentos elétricos, usou-se e atualizou-se a infraestrutura de *software* oferecido pelo SIMPREBAL, que possui uma arquitetura cliente-servidor e uma interface homem-máquina usando tecnologia *java Applets*, resultando no sistema SIMPO, mais robusto e genérico em relação ao seu antecessor, refletindo as características metodológicas propostas neste artigo.

Para dar suporte e credibilidade à metodologia e desenvolvimento computacional (base de conhecimento), utilizou-se a tabela FMEA para mapeamento e estruturação das entrevistas feitas ao pessoal técnico da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHCN). Por outro lado, foi estruturada a base de conhecimento (base de regras de produção difusas e não difusas) seguindo a estrutura das camadas do padrão OSA-CBM, ou seja, Processamento de Sinal, Monitoramento da Condição, Avaliação da Saúde e Tomada de Decisão. Para uma melhor visualização da proposta metodológica, uma estrutura, em diagrama de blocos, apresentando o fluxo das suas informações é mostrada na Figura 1.

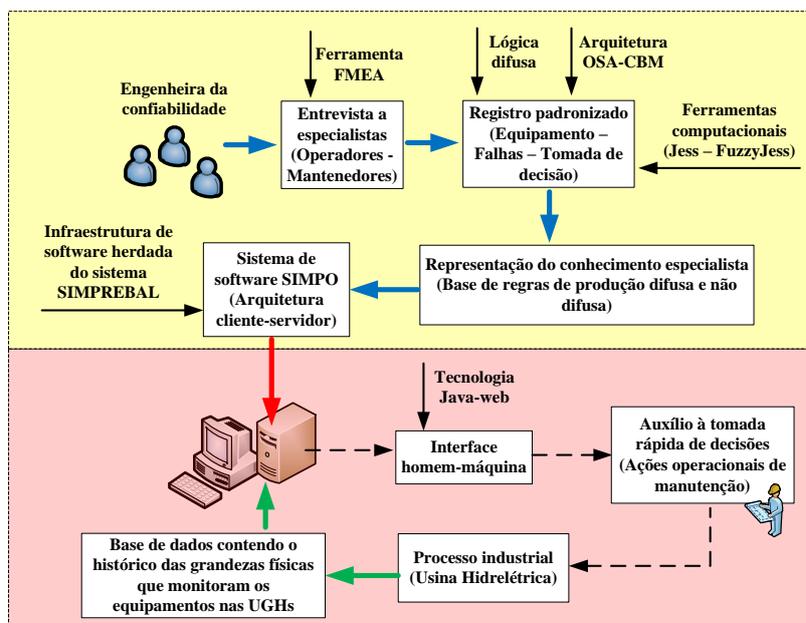


Figura 1. Diagrama de blocos relacionado ao fluxo de informações da metodologia e interação com o usuário final (mantenedor/operador).

Mesmo sendo a Fig. 1 autoexplicativa, cabe mencionar que a região em amarelo apresenta os blocos conceituais da proposta metodológica, enquanto que a região em vermelho reflete a interação do sistema SIMPO, instalado em um computador, através de uma interface homem-máquina, desenvolvida usando a tecnologia dos *Java Applets*, com o pessoal técnico (operador/mantenedor).

Nas seguintes subseções 3.1, 3.2 serão abordadas as fases metodológicas salientando a aquisição, representação e interpretação do conhecimento especialista do pessoal técnico da UHCN no que diz respeito ao raciocínio envolvido no diagnóstico de defeitos/falhas em equipamentos de geração de energia hidrelétrica.

3.1. Fase A: Processo de Coleta e Estruturação de Dados

Como em qualquer sistema elétrico de potência, em seus processos industriais, existem equipamentos hierarquizados segundo características técnicas de geração, segurança, qualidade, e normas internas de manutenção e operação que variam em cada usina hidrelétrica. No caso da UHCN, para o Sistema do Gerador Elétrico (SGE), a Tab. 1 mostra a hierarquia de equipamentos somente para o Sistema de Resfriamento do Gerador Elétrico (SRGE).

Tabela 1. Hierarquia de equipamentos para o SRGE.

Equipamento Superior	Equipamento	Sistema	Componente
Sistema do Gerador Elétrico	Gerador Elétrico	Sistema de Resfriamento do Gerador Elétrico	Radiadores
			Tubulações e Válvulas

Tendo presente uma hierarquia de equipamentos completa, para um sistema em particular, como o exemplo mostrado na Tab. 1, pode-se mapear um histórico de falhas para um sistema em estudo, através do uso da tabela FMEA como mostrada na Tabela 2. Na Tab. 2, exemplifica-se um exemplo para fins ilustrativos, das entrevistas feitas ao SRGE. No estudo de caso (sessão 4) foi usado todo o histórico relacionado ao SRGE para prova de conceito da metodologia. O método de preenchimento da tabela FMEA é simples: primeiro estabelece-se a hierarquia do sistema em estudo (ver Tab. 1), segundo, faz-se um levantamento, através de entrevistas aos especialistas (mantenedores/operadores) relacionando o componente em estudo com seu histórico de falhas (identificando o seu modo-efeito-causa) e tomada de decisão para mitigar parcialmente ou totalmente dita falha. Cabe ressaltar que para novas falhas mapeadas pelos especialistas, para um equipamento em particular, a tabela FMEA deve ser atualizada.

Tabela 2. Tabela parcial FMEA para o SRGE.

SISTEMA DO GERADOR ELÉTRICO					
Gerador Elétrico – Sistema de Resfriamento do Gerador Elétrico					
Função: Manter o gerador elétrico em uma temperatura operável					
COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	EFEITO DE FALHA	CAUSA DE FALHA	TOMADA DE DECISÃO
Radiadores	Elementos do tipo trocador de calor que ajudam a resfriar o ar quente de saída produzido pelo gerador elétrico	Possível entupimento nas tubulações ou aquecimento nos radiadores	Sinalização de ALERTA no sistema SIMPO	Possível sujeira nas tubulações ou resíduos nos radiadores	Verificar o estado das tubulações e/ou radiadores (não emitir CA)
Tubulações e válvulas	Conjunto de peças que canalizam o fluxo de água para resfriamento dos radiadores	Possível vazamento de água nas tubulações	Sinalização de ALARME no sistema SIMPO	Possíveis furos ou desgastes nas tubulações	Trocar a zona de tubulação com vazamento (emitir CA)

Uma vez estruturado o conhecimento técnico, usando a tabela FMEA, para todos os equipamentos que compõem as UGHs em relação ao seu histórico de falha/defeito e atividades operacionais de manutenção/operação associadas, a fase seguinte é codificar esse conhecimento através de um sistema baseado em regras de produção usando conceitos da lógica difusa para lidar com o tema da subjetividade nas informações como é descrito na subseção 3.2.

3.2. Fase B: Criação e Casamento da Base de Conhecimento usando Conceitos de Lógica Difusa

Uma vez completa a tabela FMEA, pode-se codificar dito conhecimento em um formato de regras de produção usando as ferramentas computacionais *Jess* e *FuzzyJess*. A sequência geral para a criação da base de regras difusas e não difusas para diagnóstico de falhas/defeitos em equipamentos elétricos é mostrada na Tab. 3.

Tabela 3. Exemplo de estrutura de regras difusas e não difusas para o SRGE.

Camadas OSA-CBM	Tipo de Regra	Estrutura da Regra de Produção	Observações
Processamento de Sinal	Não difusa	SE (0 < T ₁ & T ₁ < 200°C) ENTÃO (Signal-GOOD) SENÃO (Signal-BAD)	T ₁ : Temperatura de ar de entrada dos radiadores. T ₂ : Temperatura de ar de saída dos radiadores.
Monitoramento da condição	Não difusa	SE (65 <= T ₁ & T ₁ < 73°C) ENTÃO (Condition-NORMAL)	T ₃ : Temperatura máxima dos enrolamentos do estator.
		SE (73 <= T ₁ & T ₁ < 75°C) ENTÃO (Condition-ALTO)	V ₁ : Vazão de água dos radiadores.
Avaliação de Saúde	Difusa (1 antecedente)	SE T ₁ é ALTO _{v1} ENTÃO (Printout gui11 “G1TaerFuzzyAlto##”)	*T ₁ , ..., P ₁ : foram representadas como funções <i>singleton</i> . *ALTO _{v1} , ALARME _{v1} , NORMAL _{v1} : Variáveis linguísticas representadas por funções trapezoidais e triangulares.
	Difusa (5 antecedentes)	SE T ₁ é NORMAL _{v1} e T ₂ é ALTO e T ₃ é NORMAL e V ₁ é NORMAL e P ₁ é ALTO ENTÃO (Printout gui11 “Ga1DiagFuzzyRule1##”)	

A Tab. 3 apresenta parte do conjunto de regras de produção (difusas e não difusas) para o SRGE seguindo as camadas OSA-CBM. Por outro lado, vale ressaltar que a camada de Tomada de Decisão está implícita nas saídas das regras de produção, por exemplo, o código: (Printout guil1 “G1TaerFuzzyAlarme##”), escrito em linguagem Jess, indica uma saída gráfica e textual na GUI (Interface de Usuário Gráfica) do sistema SIMPO expondo as principais informações mapeadas nas tabelas FMEA para o SRGE em particular (ver Tab. 2).

De maneira simples, a lógica difusa foi usada nesta metodologia com o objetivo de *fuzzificar* (criar conjuntos difusos adequados) as *faixas de operação* (por exemplo, NORMAL (65-73°C), ALTO (73-75°C), etc.) das grandezas físicas que monitoram um determinado equipamento elétrico como mostrado na Fig. 2. Vale ressaltar que na Fig. 2 a leitura do sensor é *fuzzificada* com uma função singleton (90°C) e suas faixas de operação com funções triangulares e trapezoidais respectivamente. É através das leituras da instrumentação relacionada a um equipamento elétrico especificamente (ver Fig. 2), que o operador/mantenedor deduz algum tipo de defeito/falha que possa apresentar dito equipamento. Por tanto surgiu a noção de *fuzzificar* as faixas de operação das grandezas físicas e relacioná-las segundo o raciocínio envolvido pelos operadores/mantenedores (na forma de regras de produção SE-ENTÃO, ver Tab. 3) que resulta em algum tipo de diagnóstico do equipamento. Contudo, podem-se criar regras mais complexas através do uso da lógica difusa relacionando várias grandezas físicas para um determinado equipamento.

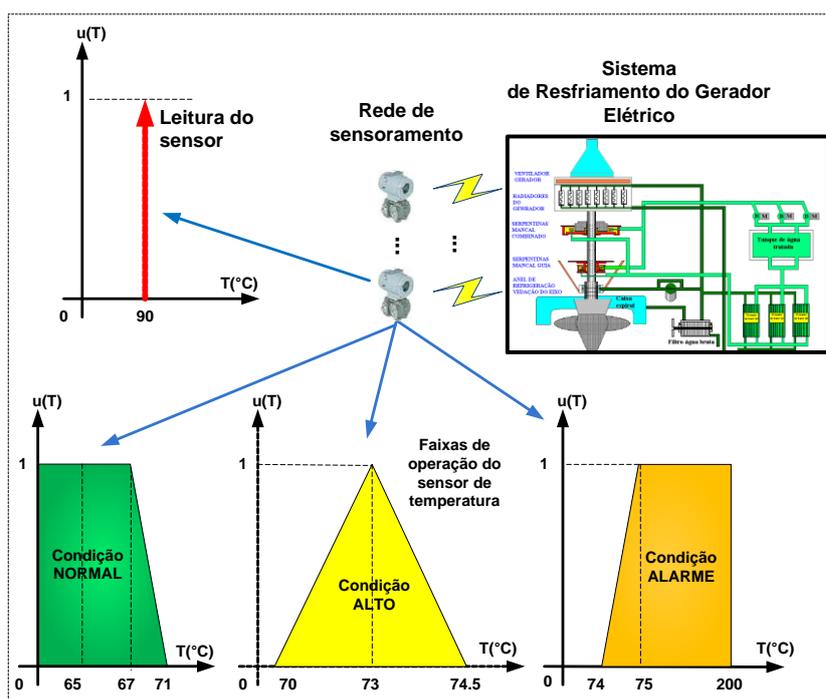


Figura 2. Fuzzificação das variáveis físicas para o SRGE.

Por outro lado, segundo a literatura, existe uma tendência nos sistemas baseados em regras difusas em desempenhar três fases metodológicas: fuzzificação, inferência e defuzzificação; com o intuito de gerar algum valor numérico que seja interpretável em termos de controle de alguma grandeza física cuja natureza seja mensurável, por exemplo, abrir ou fechar numa certa porcentagem uma válvula em um processo de controle em particular.

O processo anterior é válido geralmente no contexto de controle de alguma variável física de saída para controlar algum processo industrial em particular, mas, no contexto de diagnóstico e defeitos/falhas esse raciocínio já não é tão viável, pelo fato de que na área de manutenção é requerido saber primeiro quais são as condições dos equipamentos (em que faixas oscilam os valores das suas grandezas físicas que os monitoram) e desse ponto em diante, realiza-se uma inferência por parte dos operadores/mantenedores para obter uma lista com os possíveis modos, causas e efeitos de falha, que por sua vez geram um conjunto de possíveis ações operacionais de manutenção/operação para mitigar esses defeitos/falhas que experimentam equipamentos em condições anormais. Portanto não foram usados/implementados os processos de inferência e defuzzificação.

Assim, a proposta metodológica está baseada no raciocínio linguístico tomando apenas como referências numéricas as faixas das grandezas físicas que monitoram equipamentos em UGHs através de sensores/transdutores. O processo de casamento de regras do sistema SIMPO é feito usando o motor de inferência das ferramentas *Jess* e *FuzzyJess*. A saída desse processo é basicamente uma lista de atividades operacionais de manutenção, além de informações relacionadas ao modo e causa da falha mapeada na tabela FMEA (ver Tab. 2) que por sua vez serve de auxílio à tomada rápida de decisões sobre o equipamento elétrico que experimenta algum tipo de comportamento anormal, restando somente ao operador/mantenedor que interage com a interface homem-máquina decidir qual questão, dentre as oferecidas pelo sistema se adapta melhor ao equipamento em questão, considerando as características de um dado cenário em particular.

4. ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE RESFRIAMENTO DO GERADOR ELÉTRICO

Com o objetivo de validar a metodologia, uma simulação computacional em laboratório das variáveis físicas pertencentes ao SRGE da UHCN no sistema SIMPO é desempenhada nesta sessão. Para tanto, criou-se um cenário para simulação de alguns casos de falhas no SRGE (segundo a visão dos operadores/mantenedores da UHCN) com o objetivo de executar a base de conhecimento adquirida a partir da metodologia proposta. Vale ressaltar que a base de conhecimento encontra-se em fase final de teste e dentro de alguns meses estará disponível para o seu funcionamento em campo através do sistema SIMPO e posterior refinamento e/ou adequação final.

Sendo assim, a Fig. 3 mostra um comportamento simulado de falha dos radiadores através da simulação das grandezas físicas pertencentes ao SRGE, onde o sistema SIMPO analisa suas tendências, que por sua vez auxiliam ao operador/mantenedor na rápida identificação preventiva de algum tipo de defeito/falha que possa estar experimentando o equipamento (radiadores) conseguindo assim incrementar a confiabilidade do equipamento em análise.

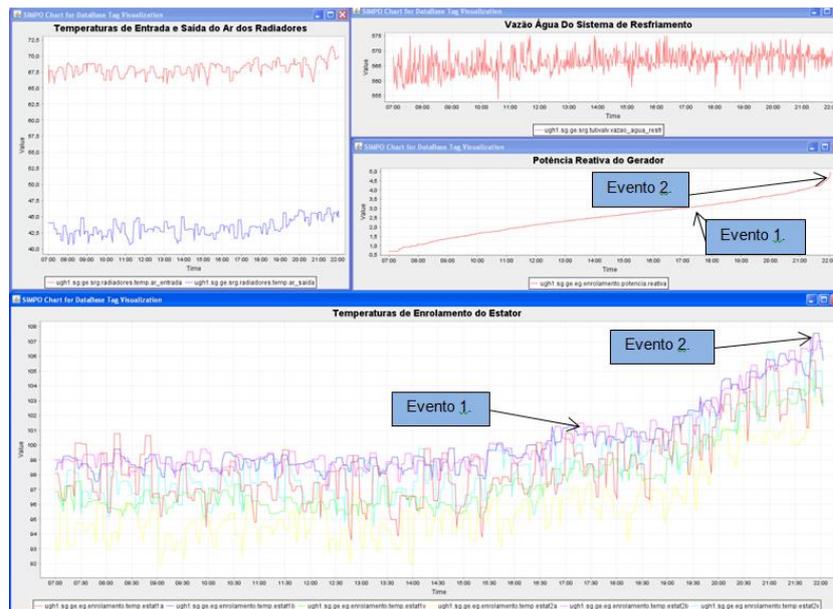


Figura 3. Tendências das grandezas físicas pertencentes ao equipamento (radiadores) do SRGE.

Na Fig. 3 pode-se observar como as grandezas físicas relacionadas ao equipamento radiadores pertencente ao SRGE se afastam das suas faixas de operação normal (ver etiquetas: Evento 1 e 2). O sistema computacional SIMPO foi concebido como uma ferramenta de apoio aos operadores para a tomada rápida de decisões quando diagnosticarem possíveis defeitos/falhas em equipamento elétricos, sendo assim, a Fig. 4 mostra a interface gráfica do sistema SIMPO onde é apresentada uma série de informações relevantes ao diagnóstico da falha em particular.

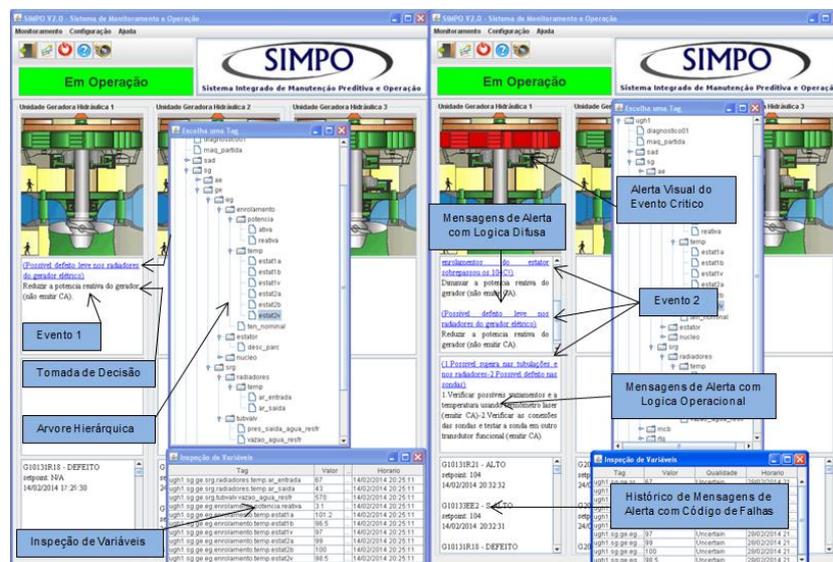


Figura 4. Interface gráfica do sistema SIMPO exibindo suas principais informações de diagnóstico de falhas e auxílio à tomada de decisão.

Por outro lado, o sistema SIMPO possui um mecanismo de verificação do seu próprio diagnóstico inferido através de uma janela que interage com o operador para conferir as informações oferecidas pelo SIMPO como é mostrada na Fig. 5. Nesta figura é apresentada a estrutura de informações do FMEA do equipamento que apresenta algum defeito/falha, assim o operador terá uma visão mais ampla para validação das informações oferecidas pelo SIMPO.

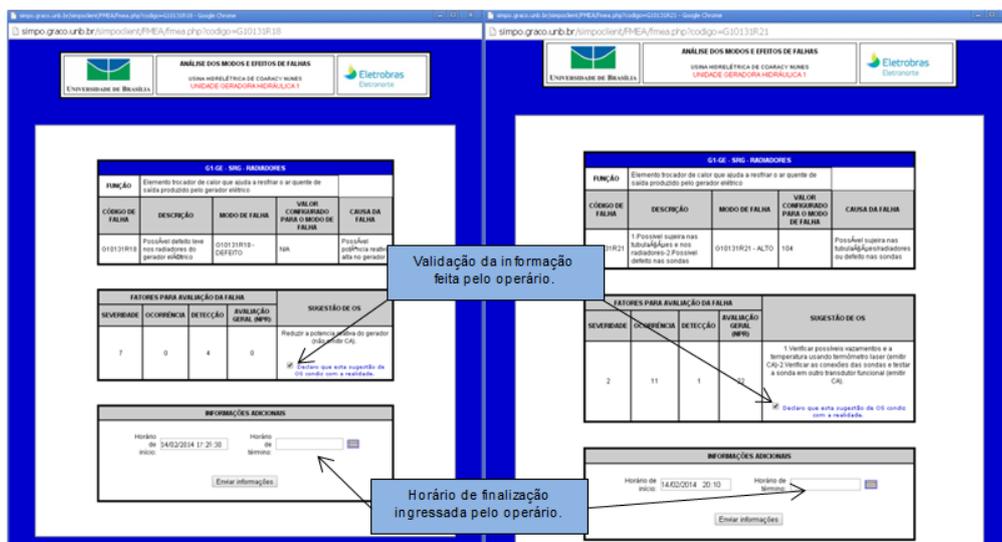


Figura 5. Janelas para verificação das informações de diagnóstico inferidas pelo sistema SIMPO

Por último, os diagnósticos de falhas e suas sugestões de atividades operacionais de manutenção, que oferece o processo de inferência do sistema SIMPO, em relação a um equipamento em particular que experimenta algum tipo de comportamento anormal ainda não são completamente conclusivos, dado que a base de regras ainda deverá ser executada em campo e verificada pelos mantenedores/operadores em tempo real. Assim sendo, cabe ao operador/mantenedor discernir quais atividades operacionais de manutenção, oferecidas pelo sistema SIMPO, devem ser executadas para um determinado equipamento com falha dado um cenário em particular.

5. CONCLUSÕES

A metodologia e implementação computacional (base de regras de produção no sistema SIMPO) abordou o problema do diagnóstico de falhas em equipamentos de geração de energia hidrelétrica desde uma ótica de sistemas baseados em conhecimento (sistemas baseados em regras de produção) e lógica difusa.

Trata-se de uma proposta e sistema computacional genéricos (podendo ser adaptada esta metodologia a outros setores da indústria) que usufruem das vantagens inerentes ao uso das seguintes tecnologias abertas como: Java, Banco de Dados, lógica difusa, OSA-CBM, MBC, MCC e FMEA principalmente.

Entre as principais limitações do presente trabalho cabe salientar que o sistema SIMPO produz uma saída gráfica (Applet/GUI) que especifica cada falha/defeito diagnosticado e as atividades operacionais de manutenção específicas relacionadas ao equipamento que experimenta anormalidade comportamental, mas este resultado não é de todo conclusivo. Contudo é suficientemente aproximado para orientar os operadores/mantenedores menos experientes à tomada rápida de decisões, restando à equipe de manutenção/operação decidir quais atividades operacionais de manutenção sugeridas pelo SIMPO deveriam ser executadas segundo características específicas de cada situação.

Como qualquer outro sistema baseado em regras de produção, uns dos grandes inconvenientes conhecidos é a falta de um mecanismo de aprendizado para evolução contínua da sua base de conhecimento. Assim sendo, as atividades operacionais de manutenção oferecidas pelo SIMPO não é de todo conclusivo; isto deve-se ao fato de que o sistema não implementa nenhum mecanismo de aprendizado, por tanto não existe forma de atualização automática da sua base de conhecimento para o seu refinamento progressivo, logo tem-se a necessidade de atualizar a sua base de conhecimento para cada novo defeito/falha detectado através de regras de produção de formal manual. Por fim, como um trabalho futuro para superar o inconveniente descrito, seria necessário conceber algum tipo de mecanismo de aprendizado amplamente utilizado na literatura como as Redes Neurais Artificiais (RNA) ou algum tipo de arquitetura cognitiva que implemente algumas características do aprendizado humano.

6. AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar os autores agradecem a Deus pelo *brainstorming* de ideias que inspiraram este trabalho. Consequentemente os autores agradecem à ELETRONORTE pelas informações disponibilizadas dos seus sistemas que esboçaram a proposta metodológica e por último, e não menos importante, à CAPES pela bolsa de estudo outorgada ao doutorando e mestrando que redigiram este artigo.

7. REFERÊNCIAS

- Ahmed, M.R., Geliel, M.A., Khali, A., 2013, “Power Transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic Technique Based On Dissolved Gas Analysis”, 21st Mediterranean Conference on Control and Automation.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., 2010, “SIMPREGAL: An expert System for Real-Time Fault Diagnosis of Hydrogenerators Machinery”, Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE Conference, 13 – 16 September.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., Souza, R.Q., Tonaco, R.P., Lima, A.A., 2009. “Sistema Inteligente de Manutenção Baseada em Condição para Usina Hidrelétrica de Balbina”, Anais do V congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – V CITENEL, Belém/PA, 22 a 24 de Junho.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., Tonaco, R.P., 2007a, “Sistema de Manutenção Baseada em Condição para Usina Hidrelétrica de Balbina”, Congreso de Computación Aplicada CAIP’2007.
- Álvares, A.J., Gudwin, R.R., Souza, R.Q., Amaya, E.J., Tonaco, R.P., 2007b, “An Intelligent Kernel for Maintenance System of a Hydroelectric Power Plant”, In: COBEM 2007 – 19th International Congress of Mechanical Engineering: TT1681, Anais, Brasília, Brazil.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., 2007, “Different Control Estrategies used in Didactic Plant PD-3 of Smar through OPC Technology”, 19th International Congress of Mechanical Engineering, November 5 – 9, Brasília, DF.
- Álvares, A.J., Tonaco, R.P., Fernandes, L.P., 2007c, “Análise FMEA para Aplicação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade: Estudo de Caso em Turbinas Hidráulicas”, Congreso de Computación Aplicada CAIP’2007.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., 2012, “Expert System for Power Generation Fault Diagnosis using Hierarchical Meta-Rules”, Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), IEEE 17th Conference, 17 – 21 September.
- Amaya, E.J., 2008, “Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Baseada em Condição”, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-21A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 172p.
- BSI., 2011, “Web site: <http://www.standardcentre.co.uk>”, British Standard Institution.
- Chow, Mo-yuen., 1994, “The Advantages of Machine Fault Detection using Artificial Neural Network and Fuzzy Logic Technologies”, Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Industrial Technology – ICIT’94.
- Dahghaghi, I., Christie R.D., Rosenwald, G.W., Liu, Chen-Ching., 1997, “AI Applications Areas in Power Systems”, IEEE Expert, Vol. 12, No. 1.
- Dote, Y., Ovaska, S.J., 2001, “Industrial Applications of Soft Computing: A Review”, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 9.
- Falqueto, J., Telles, M.S., 2007, “Automation of Diagnosis of Electric Power Transformer in Itaipu Hydroelectric Plant with a Fuzzy Expert System, IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2007).
- Han, Y., Song, Y.H., 2003, “Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, No. 1.
- Horvitz, E.J., Breese, J.S., Henrion, M., 1988, “Decision Theory in Expert Systems and Artificial Intelligence”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2, No. 2.
- Huang, Y., Huang, C., Huang, K., 2012, “Fuzzy Logic Applications to Power Transformer Fault Diagnosis using Dissolved Gas Analysis”, Procedia Engineering, Vol. 50.
- ISO-13372., 2004, “Condition Monitoring and Diagnosis of Machines – Vocabulary”, International Standard, Switzerland.
- Kumar, E.V., Chaturvedi, S.K., Deshpandé, A.W., 2009, “Maintenance of Industrial Equipment: Degree of Certainty with Fuzzy Modelling using Predictive Maintenance”, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 26, No. 2.
- Li, S., Lv, C., Guo, Z., Wang, M., 2012, “Health Condition-Based Maintenance Decision Intelligent Reasoning Method”, International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), pp. 405-408.
- Liao, S., 2005, “Expert System Methodologies and Applications – A Decade Review from 1995 to 2004”, Expert Systems with Applications, Vol. 28, No. 1.
- Mandan, S., Bollinger, K.E., 1997, “Applications of Artificial Intelligence in Power Systems”, Electric Power System Research, Vol. 41, No. 2.
- Mendel, J., 1995, “Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial”, Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 3.
- MIMOSA., 2008, “Web site: <http://www.mimosa.org>”, Machinery Information Management Open Systems Alliance.
- Moreno, I.P., 2012, “Metodologia para Monitoramento Inteligente de Condição de Máquina: Uma Abordagem usando Funções de Pertinência *Fuzzy*”, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-10E/12, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153p.
- Moubray, J., 1997, “Reliability-Centered Maintenance”, 2Ed, Industrial Press Inc, Woodbine, New Jersey, 412p.
- NBR-5460., 1992, “Sistemas Elétricos de Potência”, Terminologia, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- NBR-5462., 1994, “Confiabilidade e Manutenibilidade”, Terminologia, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- Niu, G., Yang, B., Pecht, M., 2010, “Development of an Optimized Condition-Based Maintenance System by Fusion and Reliability-Centered Maintenance”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 95, No. 7.

- Ping, Z., Shiheng, X., 1993, “A Fuzzy Logic Expert System for Fault Diagnosis and Security Assessment of Power Transformers”, Proceedings of 1993 IEEE Conference on Tools with AI (TAI-93).
- Qingfeng, W., Wenbin, L., Xin, Z., Jianfeng, Y., Qingbin, Y., 2011, “Development and Application of Equipment Maintenance and Safety Integrity Management System”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 24, No. 4.
- Souza, R.Q., 2008, “Metodologia e Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Preditiva Visando à Melhora da Confiabilidade de Ativos de Usinas Hidrelétricas”, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-23A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 226p.
- Tonaco, R.P., 2008, “Metodologia para Desenvolvimento de Base de Conhecimento Aplicada à Manutenção Baseada em Condição de Usinas Hidrelétricas”, Publicação ENM.DM-22/08, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.
- Valavanis, P.K., 2009, “Applications of Intelligent Control to Engineering Systems”, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, Springer, 393p.
- Wu, K., An, S., Ma, G., Tao, Y., 2012, “Research and Application of Fuzzy Expert System on Transformer Fault Diagnosis”, International Conference on Computer Science and Electronics Engineering.
- Zhang, Z.Z., Hope, G.S., Malik, O.P., 1989, “Expert Systems in Electric Power Systems – A Bibliographical Survey”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4.
- Zhong, L., Jian-zhong, Z., Min, Z., 2006, “Condition Based Maintenance System of Hydroelectric Generating Unit”, IEEE International Conference on Industrial Technology.
- Zhou, Z., Xu, W., Chen, H., Wang, D., 1997, “Fault Diagnosis of Power Transformers: Application of Fuzzy Set Theory, Expert Systems and Artificial Neural Networks”, IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, Vol. 144, No. 1.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

METHODOLOGY FOR FAULT DIAGNOSIS ON HYDRAULIC GENERATING UNITS USING FUZZY LOGIC CONCEPTS (CONEM2014-1337)

Iván Patricio Moreno Marcos, morenomarcos@unb.br
Alberto José Álvares, alvares@AlvaresTech.com
Manuel Rodrigo Urbano Abadia, manuel487@gmail.com

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Grupo de Inovação em Automação Industrial (GIAI), CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Abstract. *This paper introduces a methodology that tackle the problem related to fault diagnosis in hydroelectric power equipments that belong to Hydraulic Generating Units (HGUs) delimited to a hydroelectric power plant context. Early detection of faults in HGUs improves the accuracy related to time scheduling and reduces costs for preventive and corrective maintenance activities at the enterprise level. The methodology establishes the road that brings to conception of a production rule base and use fuzzy logic to represent the acquired knowledge through interviews done to technical teams (operators and maintainers), which operate the HGUs that belong to Coaracy Nunes Hydroelectric Power Plant, related to involved reasoning in diagnosis and repair of faults in hydroelectric power equipments. Finally, it accomplished a study case related to cooling system of electric generator that belongs to the HGUs. As a scope, the methodology is capable to build a knowledge base for fault diagnosis related to faults in hydroelectric power equipments, besides generate a operational activities list related to each identified fault that concurrently assists to technical team at the decision making in relation to the equipment that experiment some kind of abnormal behavior.*

Keywords: *decision making, fault diagnosis, hydraulic generating units, production rules, fuzzy logic*