

APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NOS DIAGRAMAS DE DECISÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

Acires Dias, acires@emc.ufsc.br¹

Emerson Rigoni (Autor para Correspondência), erigoni@uol.com.br²

Jonny Carlos da Silva, jonny@emc.ufsc.br³

1 UFSC / Campus Universitário Trindade / C.E.P.: 88.040-970 / Florianópolis-SC

2 UTFPR / Avenida Sete de Setembro, 3165 / C.E.P.: 80.230-901 / Curitiba-PR

3 UFSC / Campus Universitário Trindade / C.E.P.: 88.040-970 / Florianópolis-SC

Resumo: Com a constante evolução tecnológica e o crescimento das demandas do setor produtivo, as exigências inerentes a garantia da perfeita funcionalidade dos produtos e processos tornou-se fundamental. Neste contexto a habilidade das empresas contemporâneas de gerir, com a necessária competência e eficiência, seus ativos em busca de um diferencial competitivo está fortemente vinculada a sua política de gestão da manutenção. Dentre as diversas metodologias desenvolvidas para otimizar o gerenciamento da manutenção destaca-se a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC). A MCC é uma metodologia para analisar as funções do sistema e o modo como estas funções podem falhar para, então, aplicar um critério de priorização explícito baseado em fatores ambientais, econômicos, operacionais e de segurança, a fim de identificar as tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas. Para priorização das funções significantes, classificação de suas falhas funcionais e determinação das atividades de manutenção as diversas normas e bibliografias, inerentes a MCC, sugerem a utilização de diagramas de decisão. Tais diagramas sistematizam a tomada de decisão orientando-se por uma lista de verificações na forma de perguntas sobre os ativos ou sistemas a serem analisados. Entretanto tais diagramas de decisão não tratam as incertezas por imprecisão ou de natureza léxica do processo decisório. Este trabalho propõe a aplicação de um Sistema Baseado em Conhecimento Fuzzy (SBC-Fuzzy), para orientar a aplicação dos diagramas de decisão da MCC nas etapas de: Seleção das Funções Significantes e Classificação de seus Modos de Falha; e Seleção das Tarefas de Manutenção Aplicáveis e Efetivas. Assim será possível incorporar, nos pontos de decisão dos diagramas, os aspectos relevantes das principais normas e bibliografias sobre MCC, além de, tratar as incertezas por imprecisão inerentes ao processo decisório, levando em conta: os aspectos técnicos, gerenciais, a experiência de programas consolidados de MCC e o conhecimento institucional. A utilização de termos primários (lingüísticos) Fuzzy se contrapõe às respostas simplistas do tipo "Sim" ou "Não", propostas pelas normas e bibliografias pesquisadas, para os questionamentos dos diagramas de decisão da MCC. Os quesitos ponderados alimentam um processo de inferência Fuzzy que irá indicar qual o melhor caminho a seguir no diagrama de decisão.

Palavras-chave: Sistema Baseado em Conhecimento, Lógica Fuzzy, Manutenção Centrada na Confiabilidade.

1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MCC

De acordo com Siqueira (2005) a MCC teve início no final dos anos 60 como uma necessidade de certificação da linha de aeronaves Boeing 747 pela FAA (*Federal Aviation Authority*). Em 1968 foi criado o MSG-1 (*Maintenance Steering Group*) que foi encarregada de rever a aplicabilidade dos métodos existentes às aeronaves existentes na época, esse relatório introduziu os conceitos da MCC. Em 1970 foi formado um segundo grupo, o MSG-2, que gerou o Documento de Planejamento do Programa de Manutenção dos Fabricantes de Aeronaves, este documento generalizava os procedimentos específicos de manutenção do MSG-1, de modo a torná-lo aplicável a todas as aeronaves.

Em 1978 Nowlan e Heap, sob contrato do departamento de defesa americano, determinou normas e procedimentos com base em uma ampla análise estatística, este documento denominado de MSG-3 inclui a visão conjunta dos fabricantes e operadores de aeronaves, além da autoridade regulatória. Desse estudo emergiu duas conclusões (Siqueira, 2005):

- 1) Revisões programadas têm pouco efeito na confiabilidade total de um equipamento complexo, a menos que exista um modo de falha dominante;

2) Existem muitos equipamentos para os quais não há forma efetiva de manutenção programada.

Segundo Siqueira (2005) com a disseminação da MCC foram desenvolvidas novas versões ligeiramente diferentes da versão original da MSG-3. Moubrey (2001) propôs modificações na lógica da MCC visando introduzir questões ambientais a metodologia inicial, ele chamou essa versão de RCM-2 (*Reliability Centered Maintenance*). Visando reduzir o esforço dispendioso na aplicação, o EPRI (*Electric Power Research Institute*) propôs uma versão simplificada da MCC, denominada SRCM (*Streamlined RCM*). Smith e Hincheliffe (2004) propuseram novas versões baseadas no método clássico e na experiência (*ECM – Experience Centered Maintenance*).

Com tantas versões da MCC foi publicada, em 1999, a norma IEC 60300-3-11, seguindo as linhas básicas da MSG-3. No mesmo ano foi publicada a norma internacional SAE JA1011 contendo os critérios mínimos que um processo deve apresentar para que seja chamado de MCC, na visão da SAE. Em 2002 foi publicada a norma SAE JA1012, que interpreta cada um dos itens da norma SAE JA1011. Paralelo a isso o relatório MSG-3 continua sendo referência na elaboração dos programas de manutenção, tendo sua última revisão datada de 2009.

2. PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DA MCC

A implantação e a gestão da MCC nem sempre acontecem de maneira adequada, harmoniosa e consistente, resultando em falta de comprometimento e, em casos críticos, em abandono do programa de MCC pela falta de sinergia com os objetivos da empresa. Além dos aspectos técnicos, os aspectos gerenciais e organizacionais também influenciam o sucesso de um programa de MCC (Moubrey, 2001). Alguns dos principais problemas relacionados ao insucesso da MCC são: equívocos na previsão e gerenciamento de custos tanto de horas/homem como de equipamentos, resultando em aumento do tempo de retorno dos investimentos; falta de apoio da alta gerência, o que pode ter como consequência baixo comprometimento, limitações ou abandono do programa de MCC; e falta das condições prévias necessárias para cumprimento do programa de MCC (históricos de falha, conhecimento profundo da planta ou equipamento e cultura da equipe de manutenção e operação). Outro aspecto a ser analisado é a diferença de abordagem dos processos tradicionais de implantação e gestão da MCC, originalmente concebidos para a indústria de aviação, e os aspectos peculiares de outros ramos industriais, como por exemplo: o petroquímico e o de energia elétrica. Um dos exemplos desta diferença é o conhecimento sobre o histórico de falhas dos ativos. Na indústria de aviação este conhecimento, por força de regulamentações, é minuciosamente explicitado, porém, em outros ramos industriais, grande parte deste conhecimento é de natureza tácita, o que enseja a necessidade da gestão de conhecimento.

Os fatores supracitados somados ao contexto atual da manutenção evidenciam, por sua vez, os seguintes aspectos: a manutenção assumiu importância estratégica para a gestão dos ativos nas empresas contemporâneas; a política de gestão da manutenção deve ser condizente com o contexto operacional da empresa/sistema; a necessidade de técnicas de Gestão do Conhecimento (GC) é premente, principalmente como aliadas da política de gestão da manutenção, para explicitação do conhecimento tácito dos operadores e manutentores; ferramentas para tratamento das incertezas do processo decisório, frente a dados qualitativos, podem auxiliar a condução do processo de implantação das políticas de gestão da manutenção; a MCC possui requisitos desejáveis à gestão de ativos cuja aderência da empresa/sistema deve ser ratificada para maximizar seus resultados. Tais aspectos ensejam as seguintes premissas:

- A implantação da MCC como metodologia de gestão da manutenção depende da sua aderência ao contexto da empresa/sistema;
- Os benefícios de um programa de MCC são maximizados a partir de sua correta implantação e condução;
- Para consolidação dos pré-requisitos anteriores, entende-se ser importante a utilização de técnicas de GC vinculadas a ferramentas para tratamento das incertezas do processo decisório;
- O sucesso da implantação da MCC é dependente da correta tomada de decisão frente a dados invariavelmente qualitativos (Alkain, 2003). Portanto, o tratamento das incertezas inerentes a este processo decisório pode ser facilitado com o uso de técnicas de IA, mais precisamente a lógica Fuzzy (Campos, 2004 e Garcia, 2006).

Uma questão recorrente no processo de implantação da MCC é a impossibilidade de se tratar as incertezas presentes na aplicação dos diagramas de decisão, sugeridos pela MCC. Vale ressaltar que uma aplicação equivocada dos diagramas de decisão, ou seja, sem a devida coerência técnica e heurística, pode resultar em um programa de MCC destituído da realidade e objetivos da empresa e que, devido a isso, dificilmente terá o respaldo necessário dos operadores e manutentores.

As dificuldades e, por vezes, insucessos na implantação de MCC, e/ou na sua gestão, ocorrem por não se dispor de ferramentas de diagnóstico e de decisão que facilitem avaliar o conjunto de incertezas no ambiente corporativo, no campo técnico, na formação de recursos humanos, na gestão e na identificação do nível de maturidade da corporação. Neste contexto, a aplicação dos diagramas de decisão com o suporte de um SBC-Fuzzy, que trate as incertezas inerentes ao processo decisório, pode trazer benefícios e aumentar a aderência da empresa/sistema ao programa de MCC.

Hauge e Johnston (2001) sugerem que a aplicação dos diagramas de decisão da MCC, deve ser mais consistente, evitando o tratamento simplista de “Sim” ou “Não” comumente utilizado para responder cada etapa do processo decisório. Segundo os autores esta constatação é particularmente válida para as questões relacionadas à análise de risco. Deste fato pressupõem-se a necessidade da interposição de parâmetros mais abrangentes em cada ponto de deliberação do diagrama de decisão.

Segundo Moubray (2001), Smith e Hinchcliffé (2003) e Bloom (2006) a implantação da MCC, incluindo a aplicação de seus diagramas de decisão, se processa em bases majoritariamente qualitativas. Desta constatação é possível depreender a necessidade, nos diagramas de decisão da MCC, de mecanismos para tratamento da incerteza por imprecisão, comum à análise qualitativa. Rigoni (2009) propõe uma ferramenta computacional nomeada DALF-Diagramas (Decisão Apoiada por Lógica Fuzzy para aplicação dos Diagramas de Decisão da MCC) para tratar as incertezas dos diagramas de decisão da MCC utilizando-se dos benefícios da lógica Fuzzy.

3. PROCEDIMENTO DE REFERÊNCIA PARA IMPLANTAÇÃO DA MCC

Quando comparadas entre si, a bibliografia e as normas de referência (Nowlan e Heap, 1978; Smith, 1993; Smith e Hinchcliffé, 2004; Moubray, 2001; NASA, 2000; IEC 60300-3-11, 1999; SAE JA 1011, 1999; SAE JA 1012, 2002; ABS, 2004) revelam que a metodologia para aplicação dos diagramas de decisão da MCC é divergente em alguns aspectos. Tal constatação revela uma das dificuldades associadas à implantação da MCC, relacionada à escolha do procedimento mais adequado para a condução do processo, respeitando-se as características da empresa/sistema. Quanto às questões conceituais e de escopo, as seguintes observações podem ser feitas em relação às normas e bibliografias pesquisadas:

- A Norma IEC 60300-3-11 é de âmbito internacional e foi concebida para ser aplicada ao setor elétrico;
- As Normas SAE JA1011 e JA1012 propõem uma metodologia para implantação da MCC muito semelhante à proposta por Moubray (2001), a qual foi uma das referências da SAE. Destaca-se, neste caso, a preocupação com as questões ambientais nos diagramas de decisão;
- Os guias da NASA e da ABS apresentam abordagens mais específicas, respectivamente para: instrumentos e equipamentos de segurança; e embarcações e instalações em terra onde a MCC é parte de uma estratégia para gerenciamento de risco;
- As bases da MCC foram propostas por Nowlan e Heap (1978), entretanto a abordagem destes autores está fortemente vinculada à manutenção de aeronaves e equipamentos militares. A aplicação da MCC no setor industrial, a partir dos conceitos de Nowlan e Heap (1978), se deve a Antony M. Smith (1993). Posteriormente Smith e Hinchcliffé, (2004) aprimoraram a metodologia inicial, proposta por Antony M. Smith (1993), enfatizando a MCC como um programa contínuo, ressaltando a necessidade de realimentações e atualizações.

Para equacionar as disparidades existentes entre os diagramas de decisão das metodologias supracitadas, este trabalho propõe um procedimento de referência para implantação da MCC. Este procedimento segue as etapas mostradas na Fig. (1). Cada etapa pressupõe requisitos específicos de entrada e fornecem saídas que serão utilizadas nas etapas seguintes ou que irão compor o manual de MCC da empresa. Além disso, cada etapa demanda determinadas tarefas, mecanismos e controles para sua execução. O procedimento de referência foi desenvolvido para contemplar todas as etapas do ciclo de vida da MCC, desde a verificação de sua adequação para o sistema pretendido até a realimentação das decisões tomadas ao longo do processo de implantação, em função de critérios de desempenho do programa de MCC. Cinco macro-etapas compõem o procedimento de referência proposto, as quais são: Pré-Implantação; Análise; Tomada de Decisão; Implementação; e Execução.

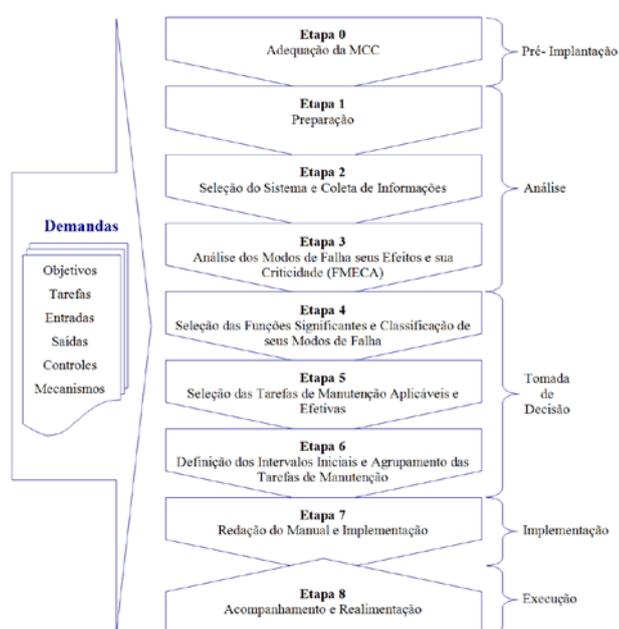


Figura 1 – Procedimento de Referência para Implantação da MCC.

O foco deste trabalho são as etapas 4 e 5 do procedimento de referência, as quais se utilizam de diagramas de decisão para:

- Na etapa 4 analisar cada função identificada na etapa 3 e determinar se a falha funcional tem efeito significativo, e caso afirmativo, classificar seus modos de falha levando em conta os impactos nos aspectos pilares da MCC: segurança, meio ambiente, operação e economia do processo. A Fig. 2 mostra o diagrama de decisão utilizado nesta etapa;

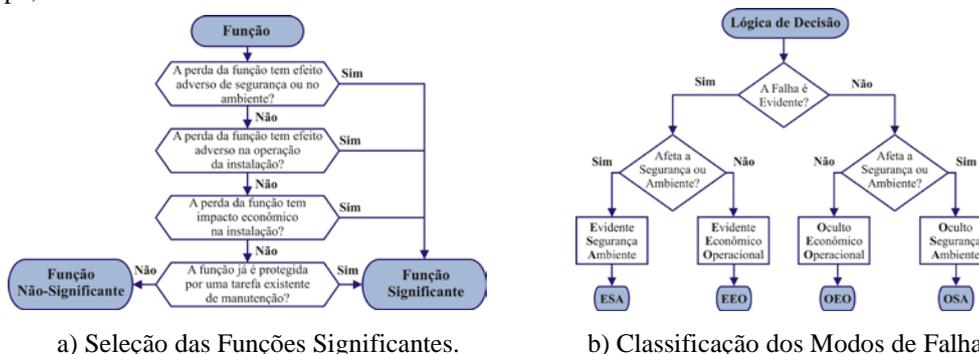


Figura 2 – Seleção das Funções Significantes e Classificação dos seus Modos de Falha, Siqueira (2005).

- Na etapa 5 determinar quais as tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas para cada uma das funções significantes identificadas e caracterizadas na etapa 4. A Fig. 3 mostra o diagrama de decisão utilizado nesta etapa;

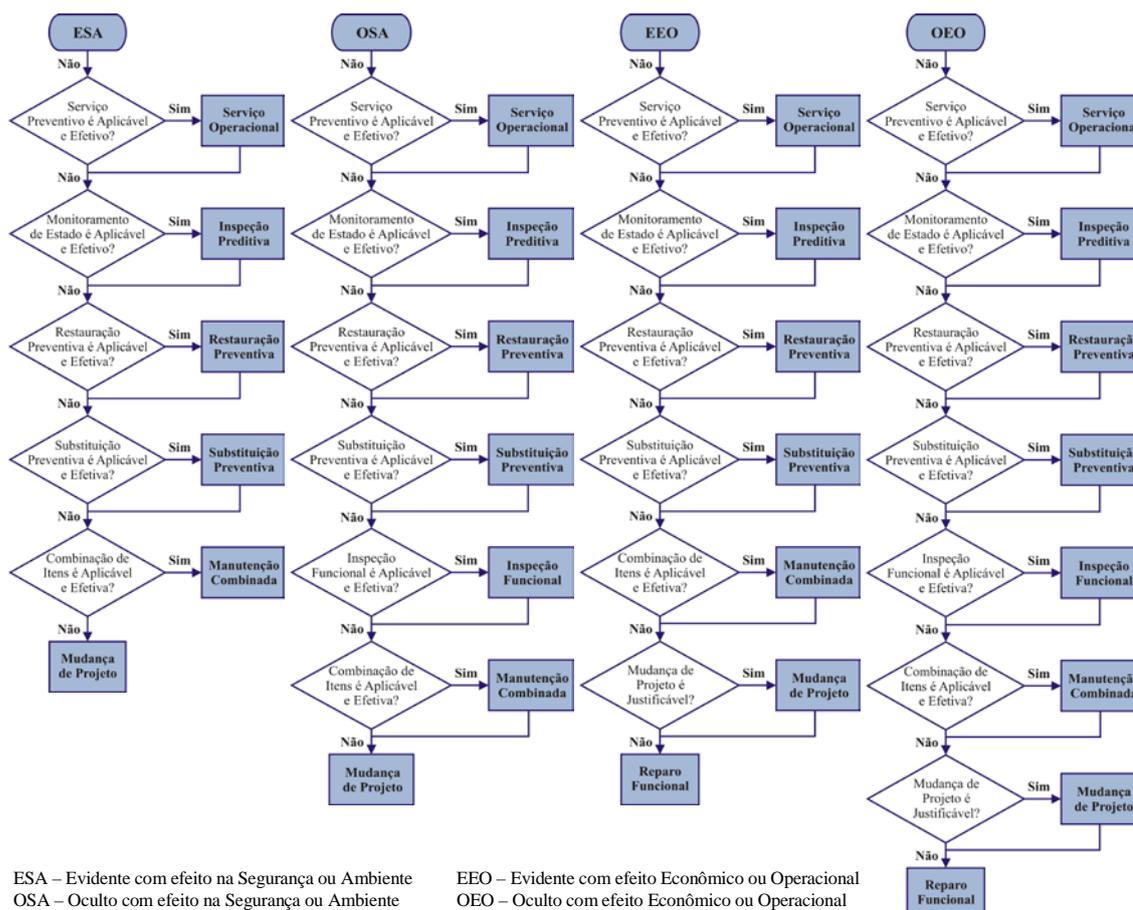


Figura 3 – Seleção das Tarefas de Manutenção, Siqueira (2005).

4. APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NOS DIAGRAMAS DE DECISÃO DA MCC

A lógica Fuzzy representa a incerteza por imprecisão, isto é, trabalha com conjuntos com limites 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, este grau é obtido por meio da função de pertinência que representa o conjunto.

Neste trabalho a lógica Fuzzy é utilizada para auxiliar o processo de inferência do SBC-Fuzzy que irá armazenar o conhecimento heurístico de especialistas e o conhecimento explícito das normas e bibliografias inerentes à implantação da MCC. Ao mesmo tempo, durante a utilização da metodologia proposta, as incertezas nos dados de entrada, estarão contempladas com o uso de variáveis lingüísticas e seus respectivos termos primários, para auxiliar o processo decisório.

Para compor o processo de inferência (ponderação, implicação, agregação e desfuzzyficação) por intermédio da lógica Fuzzy, são apresentadas determinadas afirmações, as quais o decisor deve ponderar o grau de aderência de sua empresa/sistema àquelas afirmações. Esta ponderação é feita utilizando-se termos primários (lingüísticos) Fuzzy, o conjunto de termos utilizados para ponderação incluem: Ruim, Baixa, Boa, Alta e Ótima. A utilização de termos primários Fuzzy se contrapõe às respostas simplistas do tipo “Sim” ou “Não”, propostas pelas normas e bibliografias pesquisadas, para os questionamentos dos diagramas de decisão da MCC. Os quesitos ponderados alimentam um processo de inferência Fuzzy que irá indicar qual o melhor caminho a seguir no diagrama de decisão.

Para exemplificar o processo de inferência Fuzzy proposto, será tomando como exemplo, o questionamento proposto pelo primeiro diagrama de decisão da MCC apresentado na Fig. 2a, o qual é:

- A perda de função tem efeito adverso na segurança ou meio ambiente?

Para responder essa questão, os seguintes quesitos devem ser ponderados pelo decisor:

- A falha funcional representa uma ameaça à vida pessoal do operador dentro ou fora dos limites do sistema/empresa.
- A falha funcional representa uma ameaça à vida coletiva dentro ou fora dos limites do sistema/empresa.
- A falha funcional resulta em infração de uma lei ou padrão ambiental dentro ou fora dos limites do sistema/empresa.
- A Severidade das conseqüências da falha funcional ou do modo de falha é: Moderada, Crítica ou Muito Crítica.
- O Grau de Risco relativo à falha funcional ou ao modo de falha é Crítico, Sério ou Moderado.

A Fig. 3 mostra um exemplo de processo de inferência com as respectivas ponderações para os quesitos acima. Neste caso a ponderação resultou, ao final do processo de inferência, em uma nota de 6,08 em uma escala de 0 a 10. Isso significa que a função sob análise é considerada significativa com um grau de aderência de 60,8%. A nota de corte, entre o “Sim” e o “Não” do diagrama foi considerada 5,0, ou seja: se $0 < \text{Nota} < 5$ a resposta mais aderente frente aos quesitos ponderados seria “NÃO”, ou seja, a função não é significativa”; se $5 < \text{Nota} \leq 10$ a resposta mais aderente frente aos quesitos ponderados seria “SIM”, ou seja, a função é significativa. Vale ressaltar que a definição da nota de corte cabe ao decisor, antes do início do processo de inferência.

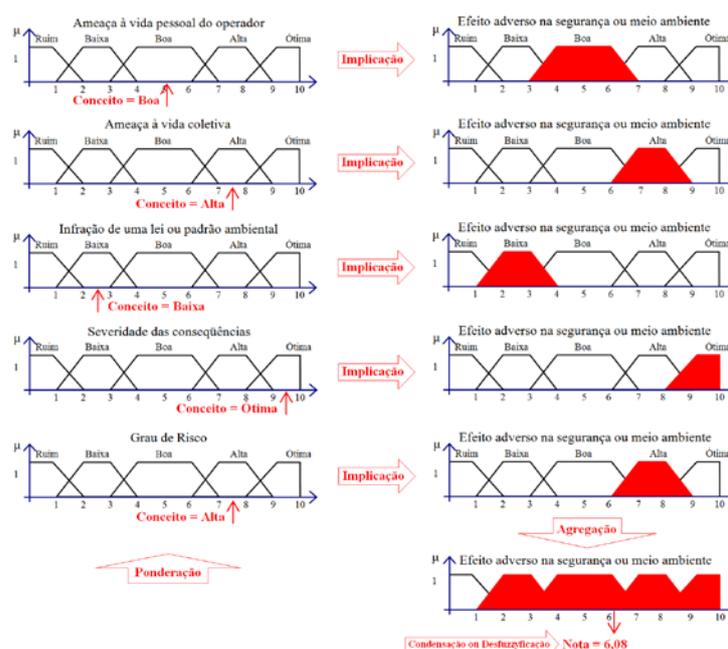


Figura 4 – Processo de Inferência Fuzzy, Rigoni (2009).

A nota resultante ao final do processo de inferência foi calculada utilizando-se a Eq. (1). Esta nota corresponde ao baricentro geométrico do conjunto formado pela agregação dos consequentes das regras de inferência a partir dos quesitos ponderados pelo decisor, tal processo é comumente chamado de condensação ou desfuzzyficação.

$$CI = \frac{\sum_{\square_{C_i} U_C} x_{C_i} \cdot (A_{C_i})}{\sum_{\square_{C_i} U_C} (A_{C_i})} = \frac{\left[5 \cdot \left(\frac{(4+2) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[7,5 \cdot \left(\frac{(3+1) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[2,5 \cdot \left(\frac{(3+1) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[9,2 \cdot \left(\frac{(2+1) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[7,5 \cdot \left(\frac{(3+1) \cdot 1}{2} \right) \right]}{\left[\left(\frac{(4+2) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[\left(\frac{(3+1) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[\left(\frac{(3+1) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[\left(\frac{(2+1) \cdot 1}{2} \right) \right] + \left[\left(\frac{(3+1) \cdot 1}{2} \right) \right]} = 6,08 \quad (1)$$

Onde:

- CI é o valor escalar de saída (valor *crisp*), resultante do processo de inferência para o critério sob análise;
- A_{C_i} é a área de cada subconjunto Fuzzy pertencente ao universo de discurso modelado pela sua respectiva função de pertinência;
- x_{C_i} é o baricentro geométrico de cada elemento A_{C_i} .

Concluída a análise da significância da função, inicia-se a classificação das conseqüências dos modos de falha das funções significantes, Fig. 2b. Este procedimento classificará as conseqüências dos modos de falha em uma das quatro possibilidades: ESA – Evidente com efeito na Segurança ou Ambiente; EEO – Evidente com efeito Econômico ou Operacional; OSA – Oculto com efeito na Segurança ou Ambiente; ou OEO – Oculto com efeito Econômico ou Operacional. A metodologia segue os mesmos preceitos utilizados para determinação da significância da função, ou seja, ponderação de quesito que alimentam um processo de inferência Fuzzy.

Concluídas as análises referentes à Etapa 4 e, levando em consideração os resultados do processo de inferência e as opções do decisor, inicia-se o processo de inferência referente à Etapa 5 (Fig. 1). O objetivo desta etapa é inferir sobre qual é a atividade de manutenção mais adequada para cada um dos modos de falha das funções significantes, classificadas na Etapa 4. Assim como na Etapa 4, os quesitos, que alimentam o processo de inferência, são apresentados para o decisor como “afirmações” cuja aderência da empresa/sistema, a tais afirmações, deve ser ponderada. Os quesitos a serem ponderados atrelados às respectivas atividades de manutenção que se quer inferir têm como base o Diagrama de Decisão mostrado na Fig. (3).

5. SBC-FUZZY PARA APOIAR A APLICAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE DECISÃO DA MCC

Para apoiar a aplicação dos diagramas de decisão da MCC foi desenvolvido um SBC-Fuzzy, cuja distribuição é gratuita e o qual atende aos requisitos e funcionalidades explanados no item precedente.

A primeira providência para utilização do SBC-Fuzzy desenvolvido é configurar a função de pertinência dos termos lingüísticos, essa configuração é feita na tela de Parametrização Fuzzy mostrada na Fig. 5. Os parâmetros inseridos nesta tela serão utilizados para a ponderação de todos os quesitos, os quais alimentarão o processo de inferência Fuzzy para identificação das funções significantes, classificação dos seus modos de falha e identificação das tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas, seguindo a lógica dos diagramas de decisão da MCC.

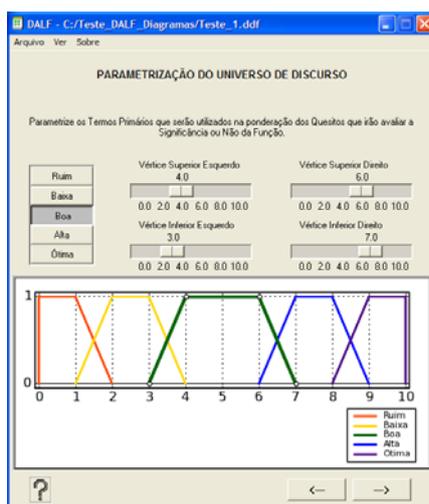


Figura 5 – Tela de Parametrização dos Termos Primários.

Concluída a parametrização dos termos lingüísticos utilizados para ponderação dos quesitos, o decisor é submetido a uma série de afirmações cujo grau de aderência da empresa/sistema a estas afirmações deve ser ponderado. Este procedimento é orientado conforme as telas mostradas na Fig. 6.

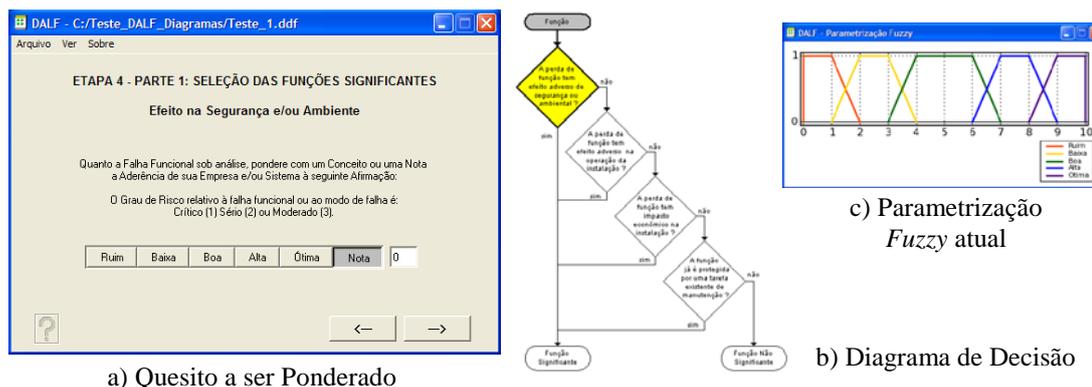


Figura 6 – Tela de Ponderação dos Quesitos – Etapa 4 – Parte 1.

Ao final do processo de inferência o SBC-Fuzzy mostra o conjunto Fuzzy resultante e o caminho, sugerido como o mais aderente, a ser seguido no diagrama de decisão da MCC sob análise. A Fig. 7 ilustra este processo.

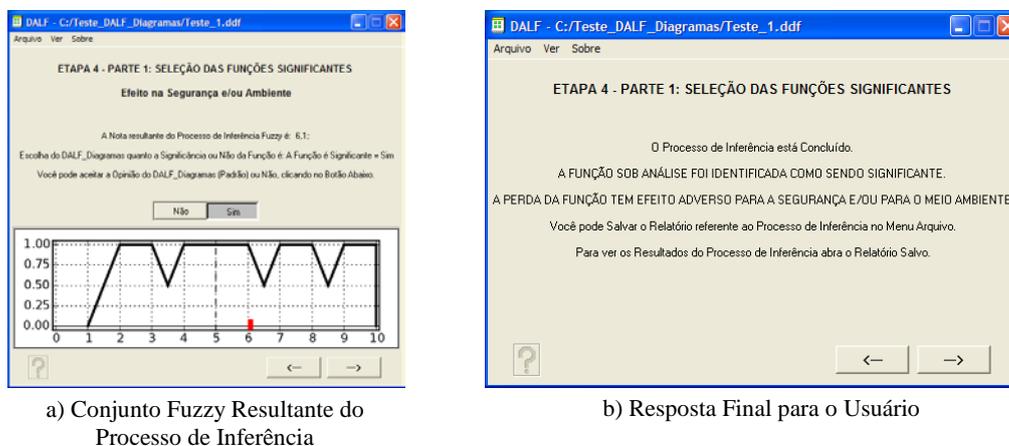


Figura 7 – Tela de Resultados do Processo de Inferência Fuzzy – Etapa 4.

6. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

A etapa de verificação e validação foi utilizada para ratificar as características almeçadas do protótipo desenvolvido com relação à: interface com o usuário; funcionalidades requeridas; e exatidão da base de conhecimento. Tais quesitos estão em conformidade com as considerações de Gonzalez e Dankel (1993), quanto aos erros mais comuns cometidos em SBC's, os quais são: falta de especificações ou simplesmente não utilização das especificações inicialmente estabelecidas; erros de operação do programa computacional (*bugs*); e representação incorreta do conhecimento, gerando soluções incorretas ou impossibilidade de se alcançar a solução correta.

O processo de verificação foi desenvolvido pelo autor, por usuários do protótipo durante sua fase de implementação e, em alguns aspectos, pelos especialistas que validaram o protótipo e suas ferramentas complementares. Neste processo os seguintes itens foram verificados: erros na lógica de programação; erros de comunicação/interação entre os softwares utilizados; funcionalidade dos atributos implementados na interface com o usuário (links externos, arquivo de ajuda, menus, parametrização dos conjuntos Fuzzy e restrições ao usuário); e erros de ortografia e gramática na interface com o usuário.

O objetivo da validação de um protótipo de SBC, no sentido mais amplo, é determinar se o sistema realiza aquilo para o qual ele foi desenvolvido. No modelo incremental, adotado neste trabalho, a validação é a etapa que fecha um ciclo de desenvolvimento do protótipo, e neste caso transcorreu de 3 maneiras distintas, a saber:

- Validação parcial em seminários, congressos e palestras de apresentação do protótipo e suas ferramentas complementares;
- Aplicação do protótipo em campo em uma empresa da cidade industrial de Curitiba e sua comparação com os resultados obtidos pela metodologia proposta por Fuentes (2006). Os critérios, procedimentos e resultados deste processo estão detalhados em Gober (2008);
- Validação por especialistas em MCC, os quais participaram do processo de aquisição do conhecimento do DALF-MCC.

O processo de verificação e validação do protótipo foi de substancial contribuição para seu aprimoramento e ratificação de suas potencialidades. Novas perspectivas de estudo foram vislumbradas e as intervenções implementadas aumentaram a robustez, as funcionalidades e a credibilidade do protótipo e suas ferramentas complementares. Mais detalhes do embasamento teórico, além do processo de desenvolvimento, verificação e validação das ferramentas computacionais aqui mencionados podem ser vistos em Rigoni (2009).

7. RESULTADOS DA APLICAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA PROPOSTA

A utilização em campo do protótipo desenvolvido se deu em dois momentos distintos, a saber: durante o processo de validação da base de conhecimento com os critérios e procedimentos detalhados em Gober (2008) e durante cursos sobre a implantação e auditoria de MCC.

No primeiro caso, a aplicação do protótipo em campo foi viabilizada por intermédio de um trabalho de conclusão de curso desenvolvido no Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Neste trabalho foi adotada a seguinte estratégia:

- 1) Em um grupo selecionado de empresas de Curitiba e região metropolitana foi aplicada a Sistemática para Seleção da Concepção de Manutenção (SSCM) proposta por Fuentes (2006). Participaram deste processo, operadores e manutentores das empresas selecionadas;
- 2) Em um dos casos, a SSCM revelou a aptidão da empresa em adotar a MCC como metodologia para gestão da manutenção. Mais especificamente, a aplicação da SSCM revelou que: 74% dos requisitos exigidos pela MCC poderiam ser atendidos pela empresa com facilidade e, destes 50% seriam de atendimento imediato, isto é, o que a empresa já utilizava para gestão de sua manutenção já atenderia às necessidades da MCC;
- 3) Nesta empresa foi, então, aplicado o protótipo em pauta para auxiliar a implantação da MCC.

Na aplicação em campo do protótipo constataram-se como pontos positivos:

- Facilitação da coleta das opiniões relativas a cada ponto do diagrama de decisão da MCC. Este aspecto contribuiu para um maior envolvimento dos manutentores no processo de implantação da MCC que, ao longo do ciclo de vida do programa de MCC, pode resultar em maior comprometimento da equipe;
- Nem todos os participantes conheciam a metodologia de gestão da manutenção proposta pela MCC, particularmente as questões relativas à sua implantação e auditoria. Neste aspecto, a aplicação do protótipo permitiu um maior entendimento da metodologia e dos diversos aspectos relacionados à tomada de decisão em cada um dos pontos presentes nos diagramas propostos pela MCC;

Os pontos desfavoráveis detectados na aplicação em campo, e que posteriormente realimentaram o processo de melhoria do protótipo foram: *bugs* na interface com o usuário e falta do conhecimento heurístico necessário para parametrização dos conjuntos fuzzy utilizados para ponderação dos quesitos que orientam a tomada de decisão em cada ponto do diagrama da MCC.

Já na aplicação do protótipo, em cursos sobre a implantação e a auditoria da MCC, foi constatado seu atributo mais importante: a facilitação do aprendizado dos alunos. Ficou evidente que os quesitos que devem ser ponderados em cada ponto de decisão dos diagramas da MCC são evidenciados com a utilização do protótipo facilitando, portanto, o aprendizado.

8. CONCLUSÃO

As considerações e contribuições apontadas ao longo deste trabalho foram validadas em campo e ratificaram as potencialidades da metodologia proposta. Como resultado deste processo foi possível inferir que:

- Além de auxiliar a tomada de decisão, durante os procedimentos de implantação da MCC, a metodologia proposta contribui para a inclusão, no processo decisório, de todos os elementos que interferem na decisão;
- A utilização da lógica Fuzzy para tratamento das incertezas e incompletudes do conhecimento, inerente a utilização dos diagramas de decisão da MCC, se mostrou eficiente. Sendo a ponderação, com base em dados qualitativos e a partir da utilização de variáveis lingüísticas, adequada aos objetivos deste trabalho;
- A abordagem utilizada, fundamentada em normas e no conhecimento heurístico dos especialistas envolvidos e associada aos cuidados e a atenção dispensada ao procedimento de verificação e validação, contribuíram para a completude e robustez da base de conhecimento e credibilidade dos resultados alcançados;
- O protótipo desenvolvido e suas ferramentas complementares são de fácil utilização. Contribuíram para tanto, a interface intuitiva e a abrangência do arquivo de ajuda.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) e a UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) pelo concedido.

10. REFERÊNCIAS

- ALKAIM, João Luiz, Metodologia para Incorporar Conhecimento Intensivo às Tarefas de Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada em Ativos de Sistemas Elétricos. Tese de Doutorado apresentada ao programa de Engenharia de Produção da UFSC, Florianópolis, 2003.
- BLOOM, Neil B., Reliability Centered Maintenance: Implementation Made Simple. Editora McGraw-Hill Inc., 2006.
- CAMPOS, Pio Filho, Método para Apoio à Decisão na Verificação da Sustentabilidade de uma Unidade de Conservação, Usando Lógica Fuzzy. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2004.
- FUENTES, Fernando Félix Espinosa, Metodologia para Inovação da Gestão da Manutenção Industrial. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Outubro 2006.
- GARCIA, Pauli Adriano de Almada, Uma Abordagem Fuzzy com Envolvimento dos Dados da Análise dos Modos e Efeitos de Falha. Tese de Doutorado apresentada a UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- GOBER, Cristiano José; SILVA, Luís Carlos Santos da; SANTOS, Rogério José dos. Aplicação de Ferramentas Computacionais para Definição de uma Metodologia de Gestão da Manutenção. 2008, 132f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Tecnologia em Gestão Comercial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- GONZALEZ, Avelino J.; DANKEL, Douglas D., The Engineering of Knowledge Based Systems - Theory and Practice. New Jersey, Editora Prentice Hall, 1993.
- HAUGE, B. S.; JOHNSTON, D. C., Reliability Centered Maintenance and Risk Assessment. Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE Proceedings, 2001.
- IEC-60300-3-11. Dependability Management – Part 3-11: Application Guide – Reliability Centred Maintenance. Primeira Edição, IEC – International Electrotechnical Commission, 1999.
- MOUBRAY, J., Reliability Centered Maintenance. New York, Editora Industrial Press, Revisão da 2ª Edição, 2001
- NOWLAN, F. S., HEAP, H. F., Reliability Centered Maintenance. National Technical Information Service, USA, Report N° AD/A066-579, 1978.
- RIGONI, Emerson, METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE: uma abordagem fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Florianópolis, 2009. Disponível em: <http://www.tede.ufsc.br/teses/PEMC1120-T.pdf>.
- SAE - JA1011. Evaluation Criteria for Reliability Centered Maintenance (RCM) Processes. Society of Automotive Engineers, 1999.
- SAE - JA1012. A Guide to the Reliability Centered Maintenance (RCM) Standard. Society of Automotive Engineers, 2002
- SMITH, A. M., Reliability Centered Maintenance. Boston Editora McGraw Hill, 1993.
- SMITH, A. M., HINCHCLIFFE, G. R., RCM – Gateway to World Class Maintenance. Editora Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- SIQUEIRA, Iony Patriota de, Manual Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

11. DIREITOS AUTORAIS

FUZZY LOGIC APPLICATION IN RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE DECISION DIAGRAMS

Acires Dias, acires@emc.ufsc.br¹

Emerson Rigoni (Correspondence Author), erigoni@uol.com.br²

Jonny Carlos da Silva, jonny@emc.ufsc.br³

1 UFSC / Trindade Academic Campus / Zip Code: 88.040-970 / Florianópolis-SC

2 UTFPR / 3165, Sete de Setembro Avenue / Zip Code: 80.230-901 / Curitiba-PR

3 UFSC / Trindade Academic Campus / Zip Code: 88.040-970 / Florianópolis-SC

Due to the constant technological evolution and the increase in demands of the productive sector, the requirements to guarantee a perfect functionality of both products and processes have become fundamental. Within this context, the capacity of modern companies to, competently and efficiently, manage their resources in order to reach competitive advantage is strongly related to their maintenance management policy. Among the several methodologies developed to optimize maintenance management, the Reliability Centered Maintenance (RCM) is highlighted. RCM is a methodology used to analyze the functions of the system and how they may fail. Then, it is possible to apply an explicit prioritization criteria based on security factors as well as environmental, economical and operational ones, so as to identify the correct and effective maintenance tasks. To prioritize the significant functions, classify its functional failures and determine the maintenance activities, norms and references inherent to RCM suggest the use of decision diagrams. Such diagrams systematize decision making guided by a list of verifications through questions about the resources or systems to be analyzed. However, such diagrams do not treat the uncertainties by imprecision or those from lexical nature of the decision process. Therefore, this paper proposes the application of a Fuzzy Knowledge Based System (SBC-Fuzzy) to guide the application of RCM decision diagrams within the steps of: Selection of Significant Functions and Classification of its Failure Modes and the Selection of Applicable and Effective Maintenance Tasks. As a result, it is possible to incorporate relevant aspects of the main norms and references about RCM in the decision points of the diagrams. Besides that, it is also possible to treat the uncertainties by imprecision inherent to the decision process, taking into account: technical and managerial aspects, the experience of already consolidated RCM programs as well as institutional knowledge. The usage of primary (linguistic) Fuzzy terms opposes to the simplistic answers like “Yes” or “No” for the questioning of RCM decision diagrams the majority of norms and references investigated suggest. The balanced questions provide a Fuzzy inference process, which indicates the best track to follow in the decision diagram.

Keywords: Knowledge Based System, Fuzzy Logic, Reliability Centered Maintenance.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.