

Aplicação de um método integrado com técnicas AHP e Fuzzy SAW para ordenação dos riscos de modos e efeitos de falhas: estudo de caso em uma indústria de papel e celulose

Ricardo Vinícius Bubna Biscaia (UTFPR Campus Guarapuava) ricardobiscaia@utfpr.edu.br

Anderson Khechinsk Correia (UTFPR Campus Guarapuava) andersonkche@gmail.com

João Luiz Kovaleski (UTFPR Campus Ponta Grossa) kovaleski@utfpr.edu.br

Marjorie Maria Belinelli (UTFPR Campus Guarapuava) belinelli@utfpr.edu.br

Aldo Braghini Junior (UTFPR Campus Ponta Grossa) aldo@utfpr.edu.br

Resumo:

Na busca pelo máximo desempenho do maquinário e do controle dos riscos de modos de falhas, técnicas como o FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falhas) são adotadas pela indústria. Estas técnicas visam a análise de modos de falhas por meio do número de prioridade de risco (RPN). Porém percebe-se que o cálculo do RPN limita-se a indicadores (severidade, ocorrência e detectabilidade) que não apresentam diferenças em seus níveis de importância para a análise, apenas é possível que o valor para cada indicador seja variado. Além disso, os resultados podem mascarar possíveis diferenças de riscos devido a valores muito próximos ou até mesmo iguais de RPN. O objetivo do presente artigo é priorizar riscos de modos de falha de equipamentos de uma caldeira de biomassa por meio da aplicação de um método híbrido adaptado do FMEA, com métodos de decisão por múltiplos critérios AHP (Processo hierárquico analítico) e Fuzzy SAW (Ponderamento somatório simples). Para isso, foi desenvolvido e estabelecido o procedimento da utilização do método aplicado nos modos de falha de equipamentos da caldeira de biomassa. Foi constatado que o método se mostrou uma ferramenta com vantagens em relação ao método FMEA tradicional. O método possibilitou a definição dos riscos e é ordenada individualmente em escala de intensidade, além da identificação da prioridade dos decisores na escolha dos pesos de cada critério.

Palavras chave: FMEA, AHP, Fuzzy SAW, Caldeira de Biomassa.

Application of an integrated method with AHP and Fuzzy SAW techniques to ordering the risks of modes and effects of failures: case study in a cellulose and paper industry

Abstract

In the search for the maximum performance of machinery and the control of the risks of failure modes, techniques such as FMEA (Failure Modes, Effects Analysis) are adopted by the industry. This technique aims at the analysis of failure modes through the risk priority number (RPN). However, it is noticed that the calculation of RPN is limited to indicators (severity, occurrence and detectability) that do not present differences in their levels of importance for the analysis, it is only possible that the value for each indicator is varied. In addition, the results may mask possible risk differences due to very close or even equal values of RPN. The objective of this paper is to prioritize risks of failure modes of biomass boiler equipment by applying a hybrid method adapted from the FMEA with multi-criteria AHP and Fuzzy SAW (Simple Additive Weighting) methods. For this, the procedure for the use of the method applied in failure modes of biomass boiler equipment was developed and established. It was verified that the method proved to be a tool with advantages over the traditional FMEA method. The method allowed

the definition of risks and is ordered individually in intensity scale, in addition to identifying the priority of decision makers in choosing the weights of each criterion.

Key-words: FMEA, AHP, Fuzzy SAW, Biomass Boiler

1. Introdução

Para atender a demanda de mercado, as indústrias buscam garantir a disponibilidade e confiabilidade operacional de suas instalações. Para isso, necessitam gerenciar as causas e efeitos dos eventos de falhas, a fim de definir as estratégias de manutenção adequadas que visem evitar a ocorrência desses eventos e obter o máximo desempenho do maquinário.

Deac et. al (2010), Águas e Al-Rubae (2013) enfatizam que métodos e técnicas de manutenção são desenvolvidos e utilizados para garantir a confiabilidade e, assim, evitar os modos de falhas no processo produtivo. A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é uma metodologia que visa garantir a disponibilidade e confiabilidade operacional dos ativos industriais, de forma que esses possam atender o desempenho para o qual foram projetados, com base na prática de manutenção programada, concentrada na manutenção preventiva e tratativa dos modos de falhas (DHILLON, 2002; HIDALGO e SOUZA, 2010; ALMEIDA et al., 2016).

A metodologia MCC é aplicada na gestão de manutenção industrial para o gerenciamento e identificação de falhas funcionais e potenciais, bem como, seus modos, causas e consequências por meio da aplicação da FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) - Análise de Modo e Efeito de Falha.

Na FMEA a prioridade das ações é dada pelo índice RPN (*Risk Priority Number*) – Número de Prioridade de Risco, que é obtido pelo produto de três variáveis: Ocorrência (O), Severidade (S) e Detecção (D) (SEVERO et. al, 2010; CARPINETTI, 2012). O RPN prioriza, de forma decrescente os modos de falha visando apontar às ações corretivas, preventivas e preditivas que reduzem ou até eliminam as causas raízes dos modos de falhas. Porém a priorização dos riscos pelo RPN é questionada por alguns autores.

Uma das críticas foi está relacionada aos valores de O, S e D. Apesar de se tratarem de valores com diferentes efeitos nos riscos das falhas, a multiplicação dos três índices pode incidir em mesmos valores de risco. Por exemplo, quando os valores de O, S e D são 4,3 e 3 ou de 9,1 e 4 respectivamente, o valor de RPN para ambos os casos é encontrado como 36 (KUTLU E EKMEKÇIOĞLU, 2012).

Outra questão levantada por Hadi-Vencheh e Aghajani (2013) é que os índices de ocorrência, severidade e detectabilidade não possuem pesos relativos diferentes para classificação dos riscos. Em determinados casos, seria importante ponderar tais índices, quando a gravidade de cada um deles difere significativamente.

Também pode-se verificar a sensibilidade elevada dos resultados de RPN. Por exemplo, quando os fatores de risco de O, S e D são 9, 9 e 10, respectivamente, o valor de RPN é encontrado em 810; porém, quando os mesmos índices são alterados para 10, 9 e 10 respectivamente, o valor de RPN se torna 900 (MAHESWARAN AND LOGANATHAN, 2013; ÖZVERİ; KABAK, 2015)

Assim, este trabalho objetiva aplicar uma técnica MCDM integrada de AHP e FUZZY SAW em modos de falhas para a organização do planejamento das ações de tratamento destas falhas funcionais de uma caldeira de biomassa instalada em uma planta de fabricação de papel. Desta forma, verifica-se que a estratégia de manutenção por meio de um ranqueamento dos riscos, possibilitaria a eliminação e/ou redução da ocorrência dos eventos de falhas identificados no

histórico de manutenção desse ativo industrial.

2. Metodologia

A presente pesquisa é organizada inicialmente estabelecendo o método utilizado no ponderamento dos critérios severidade, ocorrência e detectabilidade, que definem o risco (RPN) no método FMEA tradicional e que também servirão de base para o método proposto, porém cada um com determinado peso referente à relevância para a caracterização dos riscos.

Na sequência é descrito o princípio de execução do modelo de tomada de decisão proposto no presente projeto. O modelo segue etapas para construção da resolução e obtenção dos riscos de cada modo de falha. Também faz a ordenação que indica a sequência do maior risco até o modo de falha com menor risco se comparado com os demais analisados.

2.1 Método AHP para Ponderamento dos Critérios

O método AHP foi utilizado no apoio à decisão multicriterial baseado em três princípios: a construção de uma hierarquia; o estabelecimento de prioridades; e a consistência lógica das prioridades (SAATY, 1991). Para a presente pesquisa o método foi utilizado na priorização dos três critérios utilizados no cálculo do RPN do método FMEA: Severidade, Detectabilidade e Ocorrência.

Foram definidos três decisores para realização do método para determinação dos pesos e em seguida tais pesos foram agregados. O perfil dos decisores foi especificado em dois especialistas em gestão de manutenção e o gestor responsável pela manutenção da caldeira de biomassa da empresa em estudo.

Para que cada decisor especifica-se suas preferências segundo os níveis padronizados na Tabela 1, foi elaborada uma matriz “ $n \times n$ ” onde cada decisor comparou os três critérios previamente estabelecidos, conforme.

Nível de Preferência	Índice
Igualmente preferível	1
Igualmente a moderadamente preferível	2
Moderadamente preferível	3
Moderadamente a fortemente preferível	4
Fortemente preferível	5
Fortemente a muito fortemente preferível	6
Muito fortemente preferível	7
Muito fortemente a extremamente preferível	8
Extremamente preferível	9

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Tabela 1 - Níveis de preferência e seus respectivos índices

Com a determinação das três matrizes individuais dos três decisores, são calculados os autovetores com maiores autovalores para a determinação da importância relativa de cada elemento. Posteriormente foi realizada a agregação dos valores de cada decisor, visando a

obtenção de pesos por meio da média geométrica, onde cada decisor possui o mesmo grau de importância na formação do peso agregado.

Os autovetores calculados estabelecem os valores da prioridade de cada elemento e o maior autovalor ($\lambda_{\max}$) é utilizado na medição da consistência do julgamento de cada decisor, conforme Equação 1.

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{IR(n-1)} \quad (1)$$

Onde CR é a taxa de consistência (a consistência é verificada para $CR < 0,10$); $\lambda_{\max}$ é o maior autovalor; n = número de critérios da matriz; e IR é o índice randômico médio dado pela Tabela 2.

Ordem da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice randômico médio	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1991)

Tabela 2 - Índice randômico de acordo com a ordem da matriz

2.2 Método de decisão Fuzzy SAW

As tabelas 3, 4 e 5 mostram os termos linguísticos e seus respectivos números fuzzy utilizados para que os decisores avaliem os fatores de risco. Os termos linguísticos condizem com aqueles estabelecidos pela FMEA tradicional, mas são tratados como números fuzzy triangulares.

Como na presente pesquisa a matriz foi proposta para análise de três decisores, foi necessária a agregação dos desempenhos pontuados e o método foi proposto seguindo as etapas definidas neste tópico.

Na Tabela 3 identifica-se que quanto maior a probabilidade de ocorrência do modo de falha analisado, o conjunto de números Fuzzy é maior. Analogamente, quanto maior a gravidade do modo de falha para o sistema, identificado na Tabela 4, maior é o conjunto de números Fuzzy que representa essa severidade.

No que se refere à probabilidade de detecção daquele modo de falha antes que a mesma ocorra, quanto menor a probabilidade de detecção de determinada falha, maior é o módulo do conjunto de números fuzzy que representa as escalas linguísticas. A probabilidade de detecção está descrita na Tabela 5.

A definição das escalas linguísticas dos números fuzzy foi adaptada de Hadi-Vencheh e Aghajani (2013).

Escala linguística	Probabilidade de Ocorrência	Números Fuzzy
Muito Alto (MA)	Falha é quase inevitável	(8,9,10)
Alto (A)	Falhas repetidas	(6,7,9)
Moderado (M)	Falhas eventuais	(3,4,7)
Baixo (B)	Poucas falhas	(1,2,4)
Remoto (R)	Falhas improváveis	(1,1,2)

Fonte: Adaptado de Hadi-Vencheh e Aghajani (2013)

Tabela 3 - Escala linguística, probabilidade de ocorrência e respectivos números Fuzzy

Escala linguística	Efeitos de Severidade	Números Fuzzy
Perigoso sem aviso prévio (PSAP)	Severidade muito alta sem possibilidade de aviso prévio	(9,10,10)
Perigoso com aviso prévio (PCAP)	Severidade muito alta com possibilidade de aviso prévio	(8,9,10)
Muito Alto (MA)	Sistema inoperante com falhas destrutivas	(7,8,9)
Alto (A)	Sistema inoperante com danos a equipamentos	(6,7,8)
Moderado (M)	Sistema inoperante com danos mínimos	(5,6,7)
Baixo (B)	Sistema inoperante sem danos	(4,5,6)
Muito Baixo (MB)	Sistema funcionando com significativa redução de desempenho	(3,4,5)
Extremamente baixo (EB)	Sistema funcionando com pouca redução de desempenho	(2,3,4)
Mínimo (MI)	Sistema funcionando com mínima interferência	(1,2,3)
Nenhum (N)	Sem efeitos	(1,1,2)

Fonte: Adaptado de Hadi-Vencheh e Aghajani (2013)

Tabela 4 - Escala linguística, efeitos de severidade e respectivos números Fuzzy

Escala linguística	Probabilidade de detecção	Números Fuzzy
Extremamente Incerto (EI)	Sem probabilidade	(9,10,10)
Muito Remoto (MR)	Probabilidade muito remota	(8,9,10)
Remoto (R)	Probabilidade remota	(7,8,9)
Muito Baixo (MB)	Probabilidade muito baixa	(6,7,8)
Baixo (B)	Baixa	(5,6,7)
Moderado (M)	Moderada	(4,5,6)
Moderadamente Alta (MOA)	Probabilidade moderadamente alta	(3,4,5)
Alta (A)	Alta	(2,3,4)
Muito Alta (MA)	Probabilidade muito alta	(1,2,3)
Quase certeza (QC)	Quase certeza	(1,1,2)

Fonte: Adaptado de Hadi-Vencheh e Aghajani (2013)

Tabela 5 - Escala linguística, probabilidade de detecção e respectivos números Fuzzy

Definidos o ponderamento pelo método AHP, as alternativas, critérios e os respectivos desempenhos das alternativas, a matriz de decisão é processada por meio das etapas descritas na sequência (SAGAR, JAYASWAL e KUSHWAH, 2013). A resolução do método foi executada com auxílio do software Excel MS.

1º Etapa: Define a matriz de decisão com as variáveis linguísticas estabelecidas pelos três decisores.

2º Etapa: Transforma as variáveis linguísticas em números fuzzy.

3º Etapa: Aplica a normalização dos números fuzzy triangulares de acordo com a Equação (2) e (3):

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), i=1,2,3,\dots,n; j \in H^+$$

$$c_j^* = \max_i (c_{ij}), j \in H^+ \quad (2)$$

Onde a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} representam o conjunto dos números fuzzy de desempenho em cada critério das alternativas e H^+ é o conjunto de critérios positivos (benefício).

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), i=1,2,3,\dots,n; j \in H^-$$

$$a_j^- = \min_i (a_{ij}), j \in H^- \quad (3)$$

Onde a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} representam o conjunto dos números fuzzy de desempenho em cada critério das alternativas e H^- é o conjunto de critérios negativos (custo).

Como o objetivo do método é encontrar aquele modo de falha que apresenta o maior risco, considera-se que todos os critérios são considerados de benefício na lógica fuzzy apresentada.

4º Etapa: Multiplica os pesos estabelecidos pelo método AHP pela matriz de decisão normalizada fuzzy. Os pesos são números crisp e devem ser transformados em números fuzzy para a aplicação da Eq. (4):

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \odot \tilde{w}_j \quad (4)$$

5º Etapa: Aplica o método SAW de acordo com a Eq. (5)

$$FSAW(\tilde{A}_i) = \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{ij} \quad (i=1, \dots, m) \quad (5)$$

6º Etapa: Defuzzifica o número fuzzy triangular encontrado no método com a Eq. (6) de acordo com o método proposto por Yao e Wu (2000):

$$d(\tilde{W}_j) = \frac{1}{4}(a_j + 2b_j + c_j) \quad (6)$$

7º Etapa: Faz a ordenação das alternativas de modos de falhas analisados, considerando o maior valor aquele que representa o maior risco e analogamente o menor valor representa o menor risco.

3. Estudo de caso

A empresa de desenvolvimento do estudo de caso é do ramo de papel e celulose a qual faz parte de um grupo da indústria de embalagens, que está entre as mais representativas produtoras de chapas e embalagens de papelão ondulado do Brasil.

A empresa situa-se na cidade de Guarapuava, interior do Paraná e agrega 250 empregados diretos. Seu principal produto é o papel “Kraft”, que é a base fundamental para a fabricação das chapas de papelão. A unidade fabril ocupa uma área total de 46.000 m², com capacidade produtiva é de 2.700 toneladas/mês de bobinas de papel.

A caldeira de biomassa está inserida na etapa intermediária do processo de fabricação de papel, sendo a única fonte de energia térmica que proporciona a secagem do papel na fase de produção. O vapor saturado resultante da troca térmica por meio dos cilindros secadores, é bombeado por meio de tubulações e retorna para o tanque de condensado localizado na caldeira biomassa.

Os eventos de falhas nesse ativo, que interrompem o seu funcionamento, interferem diretamente no processo produtivo da planta da indústria. A inoperância da caldeira afeta diretamente a disponibilidade operacional do sistema produtivo.

Ressalta-se que a caldeira de biomassa apresenta ligação em série com o sistema produtivo e não possui *backup* ativo ou passivo, tornando-se vital para o funcionamento da planta.

A caldeira estudada enquadra-se, conforme normativa NR13, na categoria “B”, fabricada em novembro de 2000, modelo HBFS-15, tipo do gerador de vapor “flamo tubular” com pressão máxima de trabalho permitida de 10 kgf/cm², e capacidade produtiva de 15000 Kg/h de vapor saturado a 185 °C.

Para a aplicação do método de análise de modos e efeitos de falhas proposto, foram selecionados em conjunto com os gestores da empresa, quatorze modos de falha em um total de oito equipamentos. A seleção para análise foi concentrada nestes modos de falha pois são os que apresentavam no histórico de manutenção da empresa três fatores de maior relevância para análise crítica, sendo eles:

- a) Risco à segurança do sistema térmico da caldeira;
- b) Maiores valores de tempo total de reparo (TTR) extraídos do histórico de falhas do sistema;
- c) Impacto direto nas funções do sistema térmico da caldeira.

Seguindo esses fatores, os oito equipamentos analisados estão descritos de acordo com o código TAG de cada equipamento/linha na Tabela 6.

TAG	Descrição
141-EXA-001	Exaustor de Tiragem da Caldeira
141-MOE-001	Moega MD/35
141-TNQ-004	Tanque de Água Fresca para os Abrandadores
141-VIN-001	Visor de Nível da Caldeira
141-LCD-001	Linha de Condensado
141-ROS-002	Rosca Dosadora de Cavaco da Caldeira
141-VRT-003	Válvula Rotativa
141-VAL-001	Válvula de Descarga de Fundo

Tabela 6 - Descrição de cada TAG

A partir daí foram elencados estes modos de falha e estabelecida a matriz de decisão proposta na Tabela 7. Verifica-se que em alguns casos foram analisados mais modos de falha por equipamento. Por exemplo, no Exaustor de tiragem da caldeira foram considerados quatro modos de falhas: queima do motor (MF1), quebra do eixo do motor (MF2), rolamento com ruído (MF3) e ruptura da correia (MF4).

TAG	MODOS DE FALHAS	DECISOR 1			DECISOR 2			DECISOR 3		
		O	S	D	O	S	D	O	S	D
141-EXA-001	Queima do motor (MF1)	B	PSAP	M	R	PSAP	B	R	PSAP	B
	Quebra do eixo do motor (MF2)	B	PSAP	MB	B	PSAP	R	M	PCAP	MOA
	Rolamento com ruído (MF3)	B	PCAP	MOA	A	PCAP	A	B	MB	QC
	Ruptura da correia (MF4)	M	PCAP	MA	M	PCAP	MA	M	M	MOA
141-MOE-001	Rolamento quebrado (MF5)	A	MB	MA	A	B	A	A	A	MOA
141-TNQ-004	Vazamento na tubulação (MF6)	B	EB	MA	A	MB	A	A	PCAP	A
141-VIN-001	Vazamento (MF7)	M	EB	MA	VA	MB	A	A	MB	MA
141-LCD-001	Vazamento na tubulação (MF8)	A	EB	M	A	EB	M	A	MB	A
141-ROS-002	Rolamento quebrado (MF9)	B	EB	A	A	MB	A	M	MA	MOA
	Ruptura da correia (MF10)	M	M	MA	A	M	MA	M	A	MOA
141-VRT-003	Válvula não aciona corretamente (MF11)	B	M	QC	B	M	MA	R	PCAP	B
	Rolamento quebrado (MF12)	R	EB	MA	A	MB	MA	B	MA	MOA
	Ruptura da correia (MF13)	R	B	MA	A	M	MA	B	M	MOA
141-VAL-001	Válvula não fecha por completo (MF14)	R	A	MA	B	MA	MA	R	PCAP	B

Tabela 7 – Matriz de decisão elencando os modos de falha analisados e os desempenhos dos critérios em escala linguística de três decisores

4. Aplicação do Método e Análise dos Resultados

A matriz de decisão com os números Fuzzy triangulares está na Tabela 8 estabelecida de acordo com a etapa 2. Verifica-se os desempenhos de cada critério de acordo com as características de cada modo de falha, definidos pelos três decisores. Também estão descritos os pesos agregados obtidos pelo método AHP com agregação dos pesos ponderados pelos três decisores.

Decisores	Decisor 1 (D1)			Decisor 2 (D2)			Decisor 3 (D3)		
Critérios	OD1	SD1	DD1	OD2	SD2	DD2	OD3	SD3	DD3
Pesos	(0,23;	(0,68;	(0,09;	(0,23;	(0,68;	(0,09;	(0,23;	(0,68;	(0,09;
$(\tilde{W}_j)$	0,23;	0,68;	0,09;	0,23;	0,68;	0,09;	0,23;	0,68;	0,09;
	0,23)	0,68)	0,09)	0,23)	0,68)	0,09)	0,23)	0,68)	0,09)
MF1	(1 ;2 ;4)	(9;10; 10)	(4; 5; 6)	(1 ;1 ;2)	(9;10;10)	(5; 6; 7)	(1 ;1 ;2)	(9;10;10)	(5; 6; 7)
MF2	(1 ;2 ;4)	(9;10; 10)	(6; 7; 8)	(1 ;2 ;4)	(9;10;10)	(7; 8; 9)	(3; 4; 7)	(8; 9;10)	(3; 4; 5)
MF3	(1 ;2 ;4)	(8; 9; 10)	(3; 4; 5)	(6; 7; 9)	(8; 9; 10)	(2; 3; 4)	(1 ;2 ;4)	(3; 4; 5)	(1 ;1 ;2)
MF4	(3; 4; 7)	(8; 9; 10)	(1; 2; 3)	(3; 4; 7)	(8; 9; 10)	(1; 2; 3)	(3; 4; 7)	(5; 6; 7)	(3; 4; 5)
MF5	(1 ;1 ;2)	(3; 4; 5)	(1; 2; 3)	(6; 7; 9)	(4; 5; 6)	(2; 3; 4)	(6; 7; 9)	(6; 7; 8)	(3; 4; 5)
MF6	(1 ;2 ;4)	(2; 3; 4)	(1; 2; 3)	(6; 7; 9)	(3; 4; 5)	(2; 3; 4)	(6; 7; 9)	(8; 9; 10)	(2; 3; 4)
MF7	(3; 4; 7)	(2; 3; 4)	(1; 2; 3)	(8; 9; 10)	(3; 4; 5)	(2; 3; 4)	(6; 7; 9)	(3; 4; 5)	(1; 2; 3)
MF8	(6; 7; 9)	(2; 3; 4)	(4; 5; 6)	(6; 7; 9)	(2; 3; 4)	(4; 5; 6)	(6; 7; 9)	(3; 4; 5)	(2; 3; 4)
MF9	(1 ;2 ;4)	(2; 3; 4)	(2; 3; 4)	(6; 7; 9)	(3; 4; 5)	(2; 3; 4)	(3; 4; 7)	(7; 8; 9)	(3; 4; 5)
MF10	(3; 4; 7)	(5; 6; 7)	(1; 2; 3)	(6; 7; 9)	(5; 6; 7)	(1; 2; 3)	(3; 4; 7)	(6; 7; 8)	(3; 4; 5)
MF11	(1 ;2 ;4)	(5; 6; 7)	(1; 2; 3)	(1 ;2 ;4)	(5; 6; 7)	(1; 2; 3)	(1 ;1 ;2)	(8; 9; 10)	(5; 6; 7)
MF12	(1 ;1 ;2)	(2; 3; 4)	(1; 2; 3)	(6; 7; 9)	(3; 4; 5)	(1; 2; 3)	(1 ;2 ;4)	(7; 8; 9)	(3; 4; 5)
MF13	(1 ;1 ;2)	(4; 5; 6)	(1; 2; 3)	(6; 7; 9)	(5; 6; 7)	(1; 2; 3)	(1 ;2 ;4)	(5; 6; 7)	(3; 4; 5)
MF14	(1 ;1 ;2)	(6; 7; 8)	(1; 2; 3)	(1 ;2 ;4)	(7; 8; 9)	(1; 2; 3)	(1 ;1 ;2)	(8; 9; 10)	(5; 6; 7)

Tabela 8 – Matriz de decisão e pesos com números fuzzy

A taxa de consistência (CR), encontrada para os valores dos pesos agregados dos decisores, foi de 0,06, o que implica na consistência dos valores, de acordo com o que prevê o método, descrito anteriormente. Portanto verifica-se que o método torna-se válido para a obtenção de diferentes níveis de importância para os critérios estabelecidos. Característica pode resultar em uma vantagem em relação ao FMEA tradicional, onde a importância de cada critério no impacto do valor do risco é a mesma (HADI-VENCHEH e AGHAJANI, 2013).

Identifica-se que de acordo com os pesos dos critérios, a severidade foi o critério de maior importância na classificação de risco dos modos de falha e a detectabilidade foi o critério de maior relevância. Segundo os decisores, a justificativa para isso se caracteriza na possibilidade de aumentar o controle com técnicas preditivas de manutenção refletindo no aumento da capacidade de detectar os modos de falha analisados. Já a redução na severidade do modo de falha para o sistema não possui um controle ou ação simplificada.

Na sequência a matriz foi normalizada e multiplicada pelos pesos conforme as etapas 3 e 4. A Tabela 9 apresenta os valores normalizados e ponderados da matriz de decisão.

Decisores		Decisor 1 (D1)			Decisor 2 (D2)			Decisor 3 (D3)		
Critérios	Fuzzy	OD1	SD1	DD1	OD2	SD2	DD2	OD3	SD3	DD3
Pesos ($\bar{W}_j$)	a	0,23	0,68	0,09	0,23	0,68	0,09	0,23	0,68	0,09
	b	0,23	0,68	0,09	0,23	0,68	0,09	0,23	0,68	0,09
	c	0,23	0,68	0,09	0,23	0,68	0,09	0,23	0,68	0,09
MF1	a	0,026	0,613	0,044	0,023	0,613	0,049	0,026	0,613	0,063
	b	0,051	0,681	0,055	0,023	0,681	0,058	0,026	0,681	0,075
	c	0,103	0,681	0,066	0,046	0,681	0,068	0,051	0,681	0,088
MF2	a	0,026	0,613	0,066	0,023	0,613	0,068	0,077	0,545	0,038
	b	0,051	0,681	0,077	0,046	0,681	0,078	0,103	0,613	0,050
	c	0,103	0,681	0,088	0,092	0,681	0,088	0,180	0,681	0,063
MF3	a	0,026	0,545	0,033	0,139	0,545	0,019	0,026	0,204	0,013
	b	0,051	0,613	0,044	0,162	0,613	0,029	0,051	0,273	0,013
	c	0,103	0,681	0,055	0,208	0,681	0,039	0,103	0,341	0,025
MF4	a	0,077	0,545	0,011	0,069	0,545	0,010	0,077	0,341	0,038
	b	0,103	0,613	0,022	0,092	0,613	0,019	0,103	0,409	0,050
	c	0,180	0,681	0,033	0,162	0,681	0,029	0,180	0,477	0,063
MF5	a	0,026	0,204	0,011	0,139	0,273	0,019	0,154	0,409	0,038
	b	0,026	0,273	0,022	0,162	0,341	0,029	0,180	0,477	0,050
	c	0,051	0,341	0,033	0,208	0,409	0,039	0,231	0,545	0,063
MF6	a	0,026	0,136	0,011	0,139	0,204	0,019	0,154	0,545	0,025
	b	0,051	0,204	0,022	0,162	0,273	0,029	0,180	0,613	0,038
	c	0,103	0,273	0,033	0,208	0,341	0,039	0,231	0,681	0,050
MF7	a	0,077	0,136	0,011	0,185	0,204	0,019	0,154	0,204	0,013
	b	0,103	0,204	0,022	0,208	0,273	0,029	0,180	0,273	0,025
	c	0,180	0,273	0,033	0,231	0,341	0,039	0,231	0,341	0,038
MF8	a	0,154	0,136	0,044	0,139	0,136	0,039	0,154	0,204	0,025
	b	0,180	0,204	0,055	0,162	0,204	0,049	0,180	0,273	0,038
	c	0,231	0,273	0,066	0,208	0,273	0,058	0,231	0,341	0,050
MF9	a	0,026	0,136	0,022	0,139	0,204	0,019	0,077	0,477	0,038
	b	0,051	0,204	0,033	0,162	0,273	0,029	0,103	0,545	0,050
	c	0,103	0,273	0,044	0,208	0,341	0,039	0,180	0,613	0,063
MF10	a	0,077	0,341	0,011	0,139	0,341	0,010	0,077	0,409	0,038
	b	0,103	0,409	0,022	0,162	0,409	0,019	0,103	0,477	0,050
	c	0,180	0,477	0,033	0,208	0,477	0,029	0,180	0,545	0,063
MF11	a	0,026	0,341	0,011	0,023	0,341	0,010	0,026	0,545	0,063
	b	0,051	0,409	0,011	0,046	0,409	0,019	0,026	0,613	0,075
	c	0,103	0,477	0,022	0,092	0,477	0,029	0,051	0,681	0,088
MF12	a	0,026	0,136	0,011	0,139	0,204	0,010	0,026	0,477	0,038
	b	0,026	0,204	0,022	0,162	0,273	0,019	0,051	0,545	0,050
	c	0,051	0,273	0,033	0,208	0,341	0,029	0,103	0,613	0,063
MF13	a	0,026	0,273	0,011	0,139	0,341	0,010	0,026	0,341	0,038
	b	0,026	0,341	0,022	0,162	0,409	0,019	0,051	0,409	0,050
	c	0,051	0,409	0,033	0,208	0,477	0,029	0,103	0,477	0,063
MF14	a	0,026	0,409	0,011	0,023	0,477	0,010	0,026	0,545	0,063
	b	0,026	0,477	0,022	0,046	0,545	0,019	0,026	0,613	0,075
	c	0,051	0,545	0,033	0,092	0,613	0,029	0,051	0,681	0,088

Tabela 9 - Valores normalizados e ponderados da matriz de decisão

Os valores fuzzy na Tabela 9 foram submetidos ao método saw de acordo com a etapa 5 e posteriormente os valores obtidos são defuzzificados para que os modos de falha analisados sejam ordenados do maior risco para o menor risco, de acordo com as avaliações dos três decisores agregadas. A Tabela 10 mostra os números fuzzy agregados dos três decisores e já aplicado o método saw, os mesmos transformados em números “crisp”, normalizados e

ordenados sendo considerado “1” o modo de falha com o maior risco para o sistema e “14” o modo de falha com menor risco para o sistema térmico da caldeira de biomassa, em comparação com os demais modos analisados no presente trabalho.

Decisores Agregados Método Fuzzy saw						
Modos de Falhas	a	b	c	$d(\tilde{A}_j)$	Normalizado	Ordem
MF1	2,069	2,333	2,466	2,300	0,0952	2
MF2	2,069	2,381	2,657	2,372	0,0982	1
MF3	1,549	1,849	2,235	1,871	0,0774	4
MF4	1,712	2,025	2,485	2,062	0,0854	3
MF5	1,272	1,558	1,919	1,577	0,0653	9
MF6	1,260	1,572	1,958	1,590	0,0658	8
MF7	1,004	1,316	1,705	1,335	0,0553	14
MF8	1,031	1,343	1,730	1,362	0,0564	13
MF9	1,138	1,450	1,862	1,475	0,0611	11
MF10	1,441	1,753	2,191	1,785	0,0739	6
MF11	1,384	1,660	2,020	1,681	0,0696	7
MF12	1,066	1,352	1,713	1,371	0,0568	12
MF13	1,202	1,489	1,849	1,507	0,0624	10
MF14	1,589	1,849	2,185	1,868	0,0773	5

Tabela 10 - Números fuzzy agregados dos três decisores e risco identificado no valor defuzzificado de cada modo de falha

Constatou-se que o modo de falha com o maior risco para o sistema térmico da caldeira é a “quebra do eixo do motor” (MF2) que ocorre no equipamento com TAG “141-EXA-001” que representa o exaustor de tiragem da caldeira. Ainda neste exaustor, foi observado que outros três modos de falha apresentam os maiores riscos para o sistema da caldeira (MF1, MF4 e MF3), evidenciando a necessidade da atuação no planejamento de ações de manutenção visando a diminuição dos riscos analisados.

Em relação à aplicabilidade do método, percebe-se que uma das vantagens citadas por Kutlu e Ekmekçioğlu (2012), é a ordenação minimizando a probabilidade de se empatar os níveis de risco entre modos de falha, se comparado ao método FMEA tradicional. Portanto verifica-se que para a definição de ações de execução e planejamento de manutenção sejam realizadas e implantadas gradativamente, o método proposto pode ser adotado como uma ferramenta eficiente para o auxílio na tomada de decisões, embasadas no risco dos modos de falha.

Outro fator que pode ser elencado como vantagem do método proposto é a independência de uma matriz comparativa de riscos, onde é necessário valores pré-estabelecidos como índices que classificam os riscos em críticos ou não para o sistema. No método proposto, como é realizada a ordenação dos índices, a relevância dos modos de falha pode ser estabelecido claramente por meio comparativo. Com isso, ações de melhoria do gerenciamento da manutenção podem ser propostas de acordo com a sequência ordenada estabelecida no método.

Por fim, ressalta-se que é indispensável para que o resultado do método seja condizente com as necessidades industriais, o estabelecimento de decisores com capacidade técnica, conhecimento dos históricos de manutenção e identificação dos níveis de cada critério analisado. Desta forma, a matriz de decisão e os pesos de cada critério correspondem à variáveis mais coerentes com a realidade industrial analisada.

Referências

ÁGUAS, A. G. *Otimização de um sistema online de detecção de falhas em motores de indução*. 2013. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

ALMEIDA, M. A. P. de et al. Uma proposta de adaptação e implantação do FMEA em uma empresa do setor automotivo brasileiro. *Revista Espacios*. Vol. 37, n. 7, 2016.

AL-RUBAE, L. A. H. *Maximizing the Lifespan of Hydraulic Power Plants with Application of the Integrated Preventive Maintenance Program*. 2013. Tese de Doutorado . Eastern Mediterranean University (EMU).

CARPINETTI, L. C. R. *Gestão da qualidade: Conceitos e técnicas*. São Paulo: Atlas S.A, 2012.

DEAC, VASILE et al. *The Modern Approach to Industrial Maintenance Management*. Informatics Economic, Vol. 14, n. 2, p. 133, 2010.

DHILLON, BALBIR S. *Engineering maintenance: a modern approach*. Crc Press, 2002.

HADI-VENCHEH, A.; AGHAJANI, M. *Failure mode and effects analysis a fuzzy group MCDM approach*. *Journal of Soft Computing and Applications*, Vol. 2013, p. 1–14, 2013.

HIDALGO, E. M. P.; DE SOUZA, G. F. M. *Análise do Tipo FMEA Aplicada na Diagnose de Falhas nos Sistemas Hidráulicos de Reguladores de Velocidade da Turbina Francis*, CONEM VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Campina Grande – Paraíba, agosto de 2010.

MAHESWARAN, K; LOGANATHAN, T. *A Novel Approach for Prioritization of Failure Modes in FMEA Using MCDM*, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, p. 733 – 739, 2013.

ÖZVERİ, O.; KABAK, M. *The Usage of MCDM Techniques in Failure Mode*, *Journal of Economics and Management Research*, Vol. 4, n. 2, p. 94–108, 2015.

SAATY, T. *Método de análise hierárquica*. Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron Books, 1991. 326p.

SAGAR, M.K., JAYASWAL, P. & KUSHWAH, K. *Exploring fuzzy SAW method for maintenance strategy selection problem of material handling equipment*, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 3, n. 2, p. 600-605, 2013.

SEVERO, R. F.; ROMANO, L. N.; CAMARGO, M.N; LINHARES, J.C. *Aplicação de FMEA em uma máquina rebordadora de tanques*. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande-Paraíba, agosto 2010.

KUTLU A. C.; EKMEKÇIOĞLU M. *Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS based fuzzy AHP*. *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, n.1, p. 61–67, 2012.