

ANÁLISE MULTICRITÉRIO DA CRITICIDADE DE MODOS DE FALHA DEFINIDOS COM O AUXÍLIO DA ABORDAGEM MCC

Pedro Henrique Cavalcanti Lins
Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
pedrohclins@gmail.com

Thalles Vitelli Garcez
Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
tvgarcez@gmail.com

Adiel Teixeira de Almeida
Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
almeidaatd@gmail.com

RESUMO

A dinâmica da economia global e o aumento de sua complexidade geram consequências para a organização, seus colaboradores e a sociedade. Isto não é diferente na manutenção. Entre as abordagens de manutenção mais utilizadas no setor industrial atualmente, a MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade – desempenha um papel de destaque. Entretanto, apesar das suas vantagens, o processo de avaliação da criticidade dos modos de falha mais comumente adotado pela MCC, o FMEA – do inglês *Failure Modes and Effects Analysis* – vem sendo criticado por alguns autores. Neste contexto, este trabalho propõe o uso de uma ferramenta multicritério de apoio à decisão para classificação dos modos de falha, definidos a partir da abordagem MCC, com relação às suas características de criticidade. O método utilizado é uma extensão do PROMETHEE para problemas de classificação, chamado PROMSORT (*PROMETHEE Sorting*).

PALAVRAS-CHAVE: MCC, Criticidade, PROMSORT.

Área principal: Teoria e Metodologia

ABSTRACT

The dynamics of the global economy and its increasing complexity generate consequences for the organization, its employees and the society. This is not different in the maintenance area. Among the most widely used approaches in the maintenance industry recently, RCM (Reliability Centered Maintenance) stands out. However, despite its advantages, the process of assessing the criticality of failure modes most commonly adopted by the RCM (FMEA – Failure Modes and Effects Analysis) has been criticized by some researchers. In this context, this paper proposes the use of a multicriteria sorting method to sort the failure modes defined on the RCM approach, regarding their criticality. The method used is an extension of PROMETHEE for sorting problems and it is called PROMSORT (*PROMETHEE Sorting*).

KEYWORDS: RCM. Criticality. PROMSORT.

Main area: Theory and Methodology

1. Introdução

A manutenção pode ser definida como um conjunto de atividades e ações diretamente relacionadas à preservação/conservação das condições operacionais normais de um item ou ao restabelecimento destas, quando da ocorrência de uma falha.

Até meados dos anos de 1950, as ações de manutenção eram simplesmente efetuadas somente quando da deflagração da falha de um item. Em outras palavras, resumiam-se a intervenções corretivas (LU & JIANG, 2007).

De maneira gradual, como resultado do esforço de industrialização pós-Segunda Guerra Mundial, a disponibilidade, a confiabilidade e a segurança das plantas, o tempo de vida dos equipamentos, o crescimento da qualidade dos produtos e, sobretudo, a necessidade de redução dos custos de operação foram incorporados ao processo de planejamento da manutenção. Neste cenário, a manutenção preventiva, baseada no tempo, e a manutenção preditiva, baseada na condição/estado, foram desenvolvidas (MOUBRAY, 1997; LU & JIANG, 2007).

Segundo Deshpande & Modak (2002), a sociedade também passou a exigir maiores garantias de desempenho dos produtos e atenção à preservação do meio ambiente. O somatório destes processos gerou as condições necessárias para o desenvolvimento da metodologia MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Segundo Jones (1995), a MCC é um método para desenvolvimento e seleção de alternativas de manutenção baseado em critérios operacionais, econômicos e de segurança. Esse método emprega uma perspectiva de sistema na análise das funções desempenhadas pelo sistema, das falhas destas funções e da prevenção destas falhas.

Apesar das suas vantagens, o processo de avaliação da criticidade dos modos de falha mais comumente adotado pela MCC, o FMEA – do inglês *Failure Modes and Effects Analysis* – vem sendo criticado por alguns autores (PUENTE *et al.*, 2002; PILLAY & WANG, 2003; SELVIK & AVEN, 2011).

Neste cenário, este trabalho propõe o uso de uma ferramenta multicritério de apoio à decisão para classificação dos modos de falha, definidos a partir da abordagem MCC, com relação às suas características de criticidade. O método utilizado foi inicialmente proposto por Araz & Ozkarahan (2005) e é uma extensão do PROMETHEE para problemas de classificação, chamado PROMSORT (*PROMETHEE Sorting*).

2. Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC

Inicialmente estruturada para atender às necessidades da indústria de aviação, a MCC encontra atualmente, segundo Deshpande & Modak (2002), uma ampla gama de aplicações em manutenção, tais como instalações nucleares, tanques de óleo, plataformas de petróleo, indústrias químicas, entre outros.

Para Rausand (1998), a MCC é considerada uma abordagem baseada na priorização econômica e da segurança, uma espécie de exame sistemático das funções do sistema e do modo como essas funções podem vir a falhar, cujo resultado é de identificar as tarefas aplicáveis e efetivas de manutenções preventivas.

De acordo com Moubray (1997), a MCC é um processo usado para determinar o que precisa ser feito para garantir que qualquer componente físico continue a cumprir suas funções dentro do contexto de operação no qual se insere.

Segundo Niu *et al.* (2010), MCC é uma abordagem de melhoria industrial focado em identificar e estabelecer políticas de melhoria de manutenção, operacionais e de capital, as quais irão gerenciar os riscos de falha do equipamento de maneira mais eficaz.

Carretero *et al.* (2003) afirmam que a Manutenção Centrada em Confiabilidade possui três objetivos principais: primeiro, aumentar a segurança e a confiabilidade dos sistemas, ao focar nas suas funções mais relevantes; segundo, prevenir ou mitigar as consequências das falhas, e não as próprias falhas; e por fim, reduzir os custos de manutenção, ao eliminar ações de manutenção que não são necessárias.

Neste contexto, um processo eficiente de classificação da criticidade dos modos de falha fornece subsídios para o aumento da segurança e confiabilidade dos sistemas, auxilia no

processo de prevenção das falhas, a partir do momento que suas consequências tornam-se melhor conhecidas, além de direcionar os recursos financeiros para elementos considerados críticos para a organização.

3. Determinação da criticidade dos modos de falha – Análise Clássica

A FMEA é uma técnica de engenharia usada para definir, identificar e eliminar falhas potenciais ou conhecidas, problemas e erros do sistema, projeto, processo ou serviço antes que atinjam os usuários (STAMATIS, 2003). Segundo a norma brasileira ABNT NBR 5462:1994, o FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto.

Segundo Rausand & Øien (1996), um modo de falha é a descrição de uma falha, isto é, o modo com o qual se torna possível observar a falha. Moubray (1997) define um modo de falha como qualquer evento que venha causar a perda da capacidade de um item (equipamento, sistema, processo) em cumprir suas funções de acordo com padrões de desempenho aceitáveis pelo usuário.

Na MCC, a avaliação dos riscos do efeito de um modo de falha é, em geral, efetuada com o auxílio da ferramenta FMEA, através das informações de frequência da falha, de sua detectabilidade (nível de detecção) e de sua severidade. O produto destas três variáveis gera o valor do risco, denominado NPR (Número de Prioridade de Risco, do inglês *Risk Priority Number*). De acordo com Almannai *et al.* (2008), quanto maior o NPR, mais grave é a falha e mais importante é o modo de falha relacionado.

Segundo Stamatis (2003), o NPR define a prioridade do modo de falha e não possui nenhum valor ou significado se analisado de forma isolada. Ele é usado para classificar deficiências potenciais.

Pillay & Wang (2003) afirmam que uma das principais desvantagens do NPR é o seu caráter negligente com relação à importância relativa entre as variáveis que compõem o seu cálculo (severidade, frequência e detectabilidade). No cálculo do NPR, estes fatores têm supostamente a mesma importância, fato que normalmente não condiz com a realidade. Esta deficiência do NPR é um dos principais motivadores deste trabalho.

4. Modelo de decisão multicritério para classificação da criticidade dos modos de falha

Segundo Berger (1985), uma boa decisão deve ser uma consequência lógica daquilo que se quer (relativo às preferências), daquilo que se sabe (relativo ao conhecimento das grandezas envolvidas) e daquilo que se pode fazer (relativo às alternativas disponíveis).

O apoio multicritério à decisão tem como princípio buscar o estabelecimento de uma relação de preferências (subjetivas) entre as alternativas que estão sendo avaliadas sob a influência de vários critérios no processo de decisão. Ele é fundamentado na análise de problemas de decisão em que existem critérios conflitantes para os atores do processo decisório. Em resumo, o apoio multicritério à decisão consiste em um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar ou apoiar pessoas e organizações a tomarem decisões, sob a influência de uma multiplicidade de critérios (ALMEIDA, 2011; ROUSIS *et al.*, 2008).

De acordo com Wiecek *et al.* (2008), o desenvolvimento de métodos multicritério de apoio à decisão foi motivado não só por uma variedade de problemas da vida real que exigem a consideração de múltiplos critérios, mas também pela vontade dos profissionais em propor técnicas mais avançadas de decisão, fazendo uso de recentes avanços na otimização matemática, computação científica e tecnologia.

Neste contexto, nos últimos anos, vários métodos multicritério de apoio à decisão têm sido propostos para ajudar na seleção das melhores soluções de compromisso em problemas com critérios conflitantes. Os métodos da família PROMETHEE (do inglês *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) e suas aplicações têm atraído muita atenção de acadêmicos e profissionais (BEHZADIAN *et al.*, 2010; BRANS *et al.*, 1986).

Segundo Behzadian *et al.*, (2010), o PROMETHEE é um método de sobreclassificação para um conjunto finito de ações para ser classificadas e selecionadas entre os critérios, os quais

são muitas vezes conflitantes. O PROMETHEE é também um método bastante simples de classificação na concepção e aplicação em comparação com outros métodos de análise multicritério (BRANS *et al.*, 1986).

4.1. Métodos Não-Compensatórios X Métodos Compensatórios

Segundo Almeida (2011), uma importante característica em métodos multicritério está relacionada à compensação que pode existir entre os critérios no modelo de agregação. Desta forma, eles podem ser classificados em compensatórios e não-compensatórios.

Nos métodos compensatórios, há uma ideia de compensar um menor desempenho de uma alternativa em um dado critério por meio de um melhor desempenho em outro critério, isto é, o procedimento compensatório implica que os valores das alternativas nos vários critérios podem interagir entre si. Isto significa que nestes métodos a avaliação de uma alternativa considera os possíveis *trade-offs* entre os critérios. Esta é justamente a ideia existente no cálculo do NPR.

De acordo com Moubray (1997), toda falha afeta a organização de alguma maneira, porém com diferentes efeitos. Elas podem afetar a operação, a qualidade do produto, o atendimento ao cliente, a segurança humana e o meio ambiente. Sendo assim, ao se avaliar a criticidade através do NPR, podem-se obter níveis idênticos de risco para diferentes cenários. Por exemplo, pontuações (avaliações) distintas de frequência de falha e detectabilidade podem levar a um mesmo valor de NPR, apesar de o risco envolvido poder ser completamente diferente (PUENTE *et al.*, 2002).

Se nenhuma interação entre os critérios é permitida, não pode haver compensação e então se tem um procedimento não-compensatório. O método multicritério de classificação utilizado neste trabalho, o PROMSORT (ARAZ & OZKARAHAN, 2005), se enquadra na família de procedimentos não-compensatórios.

4.2. Método PROMETHEE

A família de métodos de sobreclassificação PROMETHEE, incluindo PROMETHEE I para ordenações parciais de alternativas e PROMETHEE II para ordenações completas de alternativas foram desenvolvidos por Brans (1982). Segundo Goumas & Lygerou (2000), o PROMETHEE é um método bastante simples na sua concepção e aplicação, quando comparado a outros métodos de análise multicritério.

Suponha A um conjunto de alternativas e $g_j(a)$ o valor do critério g_j ($j = 1, \dots, J$) na alternativa $a \in A$. Para cada par de ações, uma função de preferência $F_j(a, b)$, a qual representa o nível de preferência de a em relação a b no j -ésimo critério, pode ser definida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} F_j(a, b) = 0 & \quad \Leftrightarrow g_j(a) - g_j(b) \leq q_j, \\ F_j(a, b) = 1 & \quad \Leftrightarrow g_j(a) - g_j(b) \geq p_j, \\ 0 < F_j(a, b) < 1 & \quad \Leftrightarrow q_j < g_j(a) - g_j(b) < p_j. \end{aligned} \quad (1)$$

$F_j(a, b)$ é definida no intervalo $[0, 1]$ e é calculada utilizando-se uma função de preferência e dois limites: de preferência (p_j) e de indiferença (q_j). Seis tipos de funções de preferência são sugeridos. Veja Brans & Mareschal (2005) para mais informações.

Indicadores agregados de preferência podem ser determinados utilizando-se os pesos w_j designados para cada critério da seguinte forma:

$$\prod(a, b) = \sum w_j F_j(a, b). \quad (2)$$

De acordo com Almeida (2011) e Brans & Mareschal (2005), os pesos w_j podem ser compreendidos como uma medida da importância relativa dos diferentes critérios.

No PROMETHEE, a ordenação das alternativas é executada utilizando-se dois fluxos de sobreclassificação (BRANS & MARESCHAL, 2002): fluxo de saída (equação 3) e fluxo de entrada (equação 4).

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (3)$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (4)$$

O fluxo de sobreclassificação de saída da alternativa a , $\phi^+(a)$, representa a intensidade de preferência de a sobre todas as alternativas x no conjunto A . Em outras palavras, quanto maior $\phi^+(a)$, melhor a alternativa. Por outro lado, o fluxo de entrada mede a fraqueza da alternativa a (ALMEIDA, 2011; ARAZ & OZKARAHAN, 2007).

4.2.1. PROMETHEE I

De acordo com Almeida (2011), o PROMETHEE I consiste na interseção entre a pré-ordem decrescente de $\phi^+(a)$ e a pré-ordem crescente de $\phi^-(a)$. O resultado é uma pré-ordem parcial, obtida a partir de três relações: preferência (P), indiferença (I) e incomparabilidade (R). Segundo Brans & Mareschal (2002), estas relações são obtidas da seguinte forma:

- Preferência (aPb), se:
 $\phi^+(a) > \phi^+(b)$ e $\phi^-(a) \leq \phi^-(b)$; ou

$$\phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ e } \phi^-(a) < \phi^-(b). \quad (5)$$

- Indiferença (aIb), se:
 $\phi^+(a) = \phi^+(b)$ e $\phi^-(a) = \phi^-(b)$.

- Incomparabilidade (aRb), se:
 $\phi^+(a) > \phi^+(b)$ e $\phi^-(a) > \phi^-(b)$; ou

$$\phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ e } \phi^-(a) < \phi^-(b). \quad (6)$$

4.2.2. PROMETHEE II

No PROMETHEE II, uma ordenação completa pode ser obtida através do uso do fluxo líquido $\phi(a)$, que é calculado da seguinte forma:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (10)$$

Segundo Brans & Mareschal (2002), com base em $\phi(a)$, as alternativas são organizadas em ordem decrescente, estabelecendo uma pré-ordem completa entre as alternativas, a partir das seguintes relações:

- Preferência (aPb), se:
 $\phi(a) > \phi(b)$

- Indiferença (aIb), se:
 $\phi(a) = \phi(b)$

Segundo Almeida (2011), a ocorrência da condição para a relação de indiferença é bastante improvável, o que leva geralmente à consideração de que o PROMETHEE II estabelece, na verdade, uma ordem completa.

4.3. PROMSORT

Segundo Araz & Ozkarahan (2005) e Araz *et al.* (2007), o PROMSORT é um método multicritério de classificação baseado no PROMETHEE que designa as alternativas a categorias ordenadas predefinidas. O processo de designação de uma alternativa a a certa categoria resulta de uma comparação de a com os perfis que definem os limites das categorias e com as alternativas de referência em diferentes passos.

Suponha G um conjunto de critérios $g_1, g_2, \dots, g_j$ ($G = \{1, 2, \dots, j\}$) e B um conjunto dos perfis limites que distinguem $k + 1$ categorias. b_h representa o limite superior da categoria C_h e o limite inferior da categoria C_{h+1} , $h = 1, 2, \dots, k$. Assuma que $C_2 > C_1$ significa que a Categoria 2 sobreclassifica a Categoria 1, o conjunto de perfis ($B = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$) deve possuir as seguintes propriedades (ARAZ & OZKARAHAN, 2007): $[b_k P b_{k-1}]$, $[b_{k-1} P b_{k-2}]$, ..., $[b_2 P b_1]$.

Esta propriedade significa que as categorias devem ser ordenadas e distinguíveis.

Assumindo a ordenação da mais preferível para a menos preferível, as seguintes condições auxiliam a obter categorias ordenadas e distinguíveis: $\forall j, \forall h = 1, 2, \dots, k-1, g_j(b_{h+1}) \geq g_j(b_h) + p_j$. A comparação entre dois perfis limites b_{h-1} e b_h , que distinguem as categorias C_{h-1} , C_h e C_{h+1} , é definida usando as formulações do PROMETHEE, apresentadas nas equações (5) a (9).

O PROMSORT realiza a designação das alternativas nas categorias seguindo três passos (ARAZ & OZKARAHAN, 2005):

- Construção de uma relação de sobreclassificação utilizando PROMETHEE I;
- Utilização das relações de sobreclassificação para designar as alternativas nas categorias, excetuando-se situações de incomparabilidade e indiferença;
- Designação final das alternativas baseada em comparações par a par.

4.3.1. Construção de uma relação de sobreclassificação utilizando PROMETHEE I

No PROMSORT, as categorias são definidas por seus limites inferiores e superiores e ambos perfis limite e alternativas de referência são usados para atribuir uma alternativa a uma categoria. A fim de determinar as alternativas de referência, em primeiro lugar, todas as alternativas são comparadas com os perfis limite usando a relação de sobreclassificação obtida pelo PROMETHEE. A comparação de uma alternativa a com um perfil limite b_h é definida da seguinte forma (ARAZ & OZKARAHAN, 2005):

- a é preferível a b_h (aPb_h) se e somente se:

$$\phi^+(a) > \phi^+(b_h) \text{ e } \phi^-(a) \leq \phi^-(b_h); \text{ ou} \quad (13)$$

$$\phi^+(a) = \phi^+(b_h) \text{ e } \phi^-(a) < \phi^-(b_h). \quad (14)$$

- a é indiferente a b_h (aIb_h) se e somente se:

$$\phi^+(a) = \phi^+(b_h) \text{ e } \phi^-(a) = \phi^-(b_h). \quad (15)$$

- a é incomparável a b_h (aRb_h) se e somente se:

$$\phi^+(a) > \phi^+(b_h) \text{ e } \phi^-(a) > \phi^-(b_h); \text{ ou} \quad (16)$$

$$\phi^+(a) < \phi^+(b_h) \text{ e } \phi^-(a) < \phi^-(b_h). \quad (17)$$

4.3.2. Designação das alternativas nas categorias

A designação das alternativas nas categorias resulta diretamente da relação de sobreclassificação. Novamente, assuma que $C_2 > C_1$ significa que a Categoria 2 sobreclassifica a Categoria 1 (ARAZ & OZKARAHAN, 2007):

- Comparar a alternativa a sucessivamente com b_i , para $i = k, k-1, \dots, 1$;
- b_h sendo o primeiro perfil tal que aPb_h ;
- b_t sendo o primeiro perfil tal que aRb_h ou aIb_h ;
- Se $h > t$, designa-se a à categoria C_{h+1} .

Caso contrário, não atribuir a a nenhuma categoria, pois não se tem certeza de que a alternativa a deva ser atribuída à categoria t ou $t+1$.

Após o segundo passo, é possível que algumas alternativas possam não ter sido atribuídas a uma categoria, uma vez que as relações binárias indicam que essas alternativas são indiferentes ou incomparáveis a um perfil limite e não poderiam ser atribuídas a uma categoria diretamente. Por outro lado, algumas alternativas podem ter sido atribuídas às categorias. Na terceira etapa, vamos usar essas alternativas como ações de referência das categorias para poder designar as alternativas que ainda não tenham sido atribuídas. As alternativas de referência têm as seguintes propriedades (ARAZ & OZKARAHAN, 2007):

- Cada perfil limite b_h sobreclassifica todas as alternativas de referência da categoria C_h ;
- Cada alternativa de referência em C_h sobreclassifica todos os perfis limites inferiores ($b_{h-1}, b_{h-2}, \dots$);
- Cada alternativa de referência em C_h sobreclassifica todas as alternativas de referência em $C_{h-1}, C_{h-2}, \dots$;

- iv. Podem existir relações de preferência, indiferença ou de incomparabilidade entre as alternativas de uma mesma categoria.

4.3.3. Designação final

Segundo Araz & Ozkarahan (2005), no segundo passo, algumas alternativas são designadas $h + 1$ categorias ordenadas $C_{h-1} > C_h > \dots > C_1$. No terceiro passo, estas alternativas passam a ser alternativas de referência para as categorias ordenadas. Suponha:

- Um conjunto C_1 constituído de m das alternativas para a categoria h , isto é, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. Para uma alternativa a que ainda não tenha sido atribuída a nenhuma categoria:

- Deve-se determinar a distância d_k , tal que:

$$d_k = \frac{1}{n_t} d_k^+ - \frac{1}{n_{t+1}} d_k^- \quad (18)$$

$$d_k^+ = \sum_{x \in X_t} (\phi(a) - \phi(x)) \quad (19)$$

$$d_k^- = \sum_{x \in X_{t+1}} (\phi(x) - \phi(a)) \quad (20)$$

- Em que:
 - d_k^+ mede o grau de sobreclassificação de a sobre todas as alternativas designadas à categoria C_t ;
 - d_k^- mede o grau de sobreclassificação de todas as alternativas designadas à categoria C_{t+1} sobre a ;
 - n_t é o número de alternativas de referência da categoria C_t ;
 - $\phi(a)$ é o fluxo líquido da alternativa a . Conforme equação (10).
- Em seguida, atribui-se um ponto de corte s . Se a distância (d_k) for maior que o ponto de corte, então a alternativa a será atribuída à categoria C_{t+1} . Caso contrário, ela será atribuída à classe imediatamente inferior (C_t);
- O ponto de corte deve ser especificado pelo decisor e refletir o seu ponto de vista (ARAZ & OZKARAHAN, 2005), seja ele pessimista ou otimista. Por exemplo, define-se s como $(-1, 0, 1)$. Neste caso, se $s = 0$, então as alternativas ainda não atribuídas serão designadas às categorias de acordo com as expressões (21) e (22). Por outro lado, se $s = 1$, as alternativas devem ser designadas às categorias inferiores. Caso $s = -1$, as alternativas serão designadas às categorias superiores (ARAZ & OZKARAHAN, 2007).

$$\text{Se } d_k > s \Rightarrow a \in C_{t+1} \quad (21)$$

$$\text{Se } d_k < s \Rightarrow a \in C_t \quad (22)$$

De acordo com Araz & Ozkarahan (2007), neste procedimento, leva-se em consideração não apenas os efeitos das alternativas de referência, mas também os efeitos de todas as alternativas que não foram designadas a uma categoria, de maneira a decidir a classificação da alternativa a . Isto força que as novas atribuições estejam consistentes com a ordenação do PROMETHEE.

Segundo Araz & Ozkarahan (2005), esta regra de classificação impede que duas alternativas idênticas sejam classificadas em categorias diferentes, já que alternativas idênticas possuem o mesmo fluxo líquido.

5. Estudo de caso

Uma aplicação numérica baseada em um estudo de caso é apresentada nesta seção com o intuito de ilustrar o modelo de decisão multicritério utilizado para classificação da criticidade dos modos de falha definidos a partir da abordagem MCC. Embora a divulgação de dados reais não tenha sido permitida por razões de confidencialidade, dados realísticos foram utilizados baseados em situações definidas a partir de um sistema específico estudado. 40 modos de falha foram escolhidos para ilustrar a aplicação do método. Considera-se que existe um único usuário

para o sistema. O comportamento do decisor é definido como pessimista.

Para esta aplicação, o número de categorias foi definido em quatro (C_1 a C_4): “Muito Crítico” (pior categoria), “Crítico”, “Sujeito a reavaliação” e “Não-crítico” (melhor categoria). As classes C_1 (Muito crítico) e C_2 (Crítico) são praticamente equivalentes. A escolha pela distinção entre as duas serve para elevar o nível de prioridade das alternativas que forem designadas à classe C_1 .

O conjunto de critérios é composto por seis critérios: frequência (g_1), detectabilidade (g_2), dano humano (g_3), dano ambiental (g_4), dano operacional (g_5) e dano financeiro (g_6), de acordo com a tabela 1. Todos os critérios devem ser minimizados, exceto o critério g_2 , o qual deve ser maximizado.

Cód.	Critério	Objetivo	Peso	Valor Máximo	Valor Mínimo
g_1	Frequência	Min.	0,10	5	1
g_2	Detectabilidade	Max.	0,12	3	1
g_3	Dano Humano	Min.	0,35	4	1
g_4	Dano Ambiental	Min.	0,20	5	1
g_5	Dano Operacional	Min.	0,08	5	1
g_6	Dano Financeiro	Min.	0,15	7	1

Tabela 1 – Parâmetros dos critérios

A tabela 2 apresenta os valores definidos para os perfis limite das categorias para o PROMSORT. Os valores de avaliação dos 40 modos de falha nos seis critérios (matriz de avaliação) são apresentados na tabela 3.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
b_1	1	3	3	4	3	5
b_2	2	3	2	3	3	4
b_3	3	2	1	2	2	3

Tabela 2 – Perfis limite das categorias

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
MF1	3	2	2	1	1	1
MF2	1	5	1	5	4	6
MF3	2	2	1	1	3	2
MF4	2	2	1	2	4	3
MF5	2	4	2	3	3	1
MF6	1	3	4	4	3	4
MF7	1	1	3	3	3	7
MF8	3	2	4	2	2	3
MF9	3	5	3	3	4	3
MF10	2	3	2	2	2	1
MF11	1	2	2	1	4	7
MF12	1	5	3	5	5	6
MF13	2	3	3	5	2	3
MF14	2	5	4	2	4	4
MF15	2	1	4	1	2	4
MF16	3	2	2	3	1	7
MF17	1	3	4	3	5	6
MF18	2	1	3	1	3	4
MF19	1	2	4	4	5	6
MF20	3	1	1	2	2	1

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
MF21	2	3	1	5	4	4
MF22	1	2	1	5	4	6
MF23	3	3	1	4	3	3
MF24	3	2	1	2	2	2
MF25	3	5	3	2	2	5
MF26	1	4	3	5	5	4
MF27	3	2	1	2	5	3
MF28	3	3	2	1	1	6
MF29	2	1	2	3	2	2
MF30	3	1	3	4	3	5
MF31	1	4	3	5	5	3
MF32	1	2	4	2	2	5
MF33	3	4	2	4	3	4
MF34	3	2	1	2	2	3
MF35	2	2	1	1	3	2
MF36	2	5	1	5	3	6
MF37	1	3	4	4	3	4
MF38	2	3	1	4	1	2
MF39	3	1	1	1	1	1
MF40	2	1	1	3	3	2

Tabela 3 – Matriz de avaliação para os 40 modos de falha

Seguindo a metodologia descrita para a utilização do PROMSORT, a tabela 4 apresenta o resultado da classificação obtido com o método. Vale ressaltar que o decisor é pessimista. Desta forma, para o PROMSORT, $s = 1$. Vide equações (21) e (22).

Categoria	PROMSORT ($s = 1$)
C_1	MF6, MF12, MF17, MF19, MF26, MF31, MF37
C_2	MF2, MF7, MF9, MF11, MF13, MF14, MF15, MF18, MF21, MF22, MF25, MF30, MF32, MF33, MF36
C_3	MF4, MF5, MF8, MF10, MF16, MF23, MF27, MF28, MF29, MF38, MF40
C_4	MF1, MF3, MF20, MF24, MF34, MF35, MF39

Tabela 4 – Resultado do PROMSORT

Os resultados obtidos com o PROMSORT indicam que os modos de falha MF6, MF12, MF17, MF19, MF26, MF31, MF37 necessitam de atenção imediata da organização. Os modos de falha pertencentes à categoria C_2 também devem ser priorizados. Os modos de falha MF1, MF3, MF20, MF24, MF34, MF35, MF39 não necessitam de cuidados, já que não são críticos. Os modos de falha classificados em C_3 devem ser reavaliados posteriormente, mas não inspiram atenção imediata.

Foi realizada uma análise de sensibilidade $\pm 20\%$ nos pesos dos critérios. Não se verificou nenhuma mudança com relação à classificação inicial.

6. Conclusões

Neste trabalho, foi utilizado um método multicritério de classificação, chamado PROMSORT, para classificação dos modos de falha em termos de criticidade. O método mostrou-se uma boa alternativa para apoiar a decisão dos gestores quanto à priorização de recursos destinados ao combate à deflagração dos modos de falha considerados mais críticos para a organização.

Outra vantagem do método apresentado está em seu caráter não-compensatório, o que reduz algumas distorções da análise, as quais estão presentes em métodos como o NPR.

Uma desvantagem observada, por outro lado, reside no fato de que todos os parâmetros devem ser determinados pelo decisor, o que, na prática, pode gerar algumas inconsistências. O uso/desenvolvimento de procedimentos para elicitar as preferências do decisor é uma boa fonte para trabalhos futuros.

Por fim, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e a análise de sensibilidade realizada ratificou a robustez dos resultados.

7. Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio parcial do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências

- Almannai, B., Greenough, R. e Kay, J.** (2008), A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 501-507.
- Almeida, A.T.**, *O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*, 2 ed., Recife, Editora Universitária da UFPE, 2011.
- Araz, C. e Ozkarahan, I.** (2005), A multicriteria sorting procedure for financial classification problems: the case of business failure risk assessment. *Lecture Notes in Computer Science*, 3578, 399-408.
- Araz, C. e Ozkarahan, I.** (2007), Supplier evaluation and management system for strategic sourcing based on a new multicriteria sorting procedure, *International Journal of Production Economics*, 106, 585-606.
- Araz, C., Ozfirat, P.M. e Ozkarahan, I.** (2007), An integrated multicriteria decision-making methodology for outsourcing management, *Computers & Operations Research*, 34, 3738-3756.

- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albdavi, A. e Aghdasi, M.** (2010), PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications, *European Journal of Operational Research*, 200, 198-215.
- Berger, J. O.**, *Statistical decision theory and Bayesian analysis*, 2 ed., New York, Springer-Verlag, 1985.
- Brans, J.P.**, L'ingénierie de la décision: Méthode PROMETHEE, em Nadeau, R. e Landry, M. (Eds.), *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'avenir*. Presses de l'Université de Laval, Québec, Canadá, 183-214, 1982.
- Brans, J.P. e Mareschal, B.**, *PROMETHEE-GAIA: une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*, Bruxelles, éditions de l'Université de Bruxelles, 2002.
- Brans, J.P. e Mareschal, B.**, PROMETHEE methods, em Figueira, J., Greco, S. e Ehrgott, M. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, EUA, Springer, 163-195, 2005.
- Brans, J.P., Vincke, B.H. e Mareschal, B.** (1986), How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method, *European Journal of Operational Research*, 24, 228-238.
- Carretero, J.; Perez, J.; Carballeira, F.; Calderon, A.; Fernandez, J.; Garcia, J.; Lozano, A.** (2003), Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks, *Reliability Engineering & System Safety*, 82, 257-273.
- Deshpande, V. e Modak, J.** (2002), Application of RCM for safety considerations in a steel plant, *Reliability Engineering and System Safety*, 78, 325-334.
- Goumas, M. e Lygerou, V.** (2000), An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123, 606-613.
- Jones, R.**, *Risk-based Maintenance: A Reliability-centered approach*. Houston, Gulf Professional Publishing, 1995.
- Lu, L. e Jiang, J.** (2007), Analysis of on-line maintenance strategies for k-out-of-n standby safety systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 144-155.
- Moubray, J.**, *Reliability-centered Maintenance: RCM II*, 2 ed., New York, Industrial Press Inc, 1997.
- NBR 5462:1994**, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *Confiabilidade e Manutenibilidade*, ABNT/CB – 03 Eletricidade, 1994.
- Niu, G., Yang, B.S. e Pecht, M.** (2010), Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 95, 786-796.
- Pillay, A. e Wang, J.**, *Technology and Safety of Marine Systems*, Kidlington, Elsevier, 2003.
- Puente, J., Pino, R., Priore, P. e Fouente, D.** (2002), A decision support system for applying failure mode and effects analysis, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 19, 2, 137-151.
- Rausand, M.** (1998), Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 60, 121-132.
- Rausand, M. e Øien, K.** (1996), The basic concepts of failure analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 53, 73-83.
- Rousis, K., Moustakas, K., Malamis, S., Papadopoulos, A. e Loizidou, M.** (2008), Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus, *Waste Management*, 28, 1941-1954.
- Selvik, J.T. e Aven, T.** (2011), A framework for reliability and risk centered maintenance, *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 324-331.
- Stamatis, D.**, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution*, 2 ed., Milwaukee, ASQP, 2003.
- Wiecek, M.M., Ehrgott, M., Fadel, G. e Figueira, J.R.** (2008), Multiple Criteria Decision Making for Engineering, *Omega*, 36, 337-339.