

**FMECA: MODELAGEM MULTICRITÉRIO PARA PRIORIZAÇÃO DE CAUSAS DE FALHAS
POTENCIAIS EM UMA TERMOELÉTRICA****Marcelo Hazin Alencar**UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
marcelohazin@gmail.com**Adiel Teixeira de Almeida Filho**UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7471
adieltaf@googlemail.com**Adiel Teixeira de Almeida**UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
almeidaatd@gmail.com**RESUMO**

O principal objetivo do FMECA é definir uma avaliação crítica e sistemática dos modos de falha potenciais e suas causas, relacionadas a plantas industriais ou a equipamentos específicos. FMECA busca definir um nível de prioridade, através da utilização do RPN, para a alocação de recursos baseado nos níveis de risco estabelecidos. No entanto, avaliações baseadas apenas no RPN são bastante questionáveis. Outra questão está vinculada a estrutura de preferências do decisor, que não é verificada ao longo da aplicação desta metodologia, dado que todos os atributos apresentam a mesma importância. Com o intuito de definir estas questões, este artigo apresenta um modelo de decisão multicritério para priorização das possíveis causas de falhas, utilizando apoio da abordagem multicritério.

PALAVRAS CHAVE: FMECA, RPN, Decisão Multicritério.**Área principal (ADM - Multicriteria Decision Support; EN - OR in Energy)****ABSTRACT**

The main objective of FMECA is to establish a critical and systematic evaluation of potential failure modes and their causes with respect to an industrial plant or specific equipment. FMECA seeks to address a priority level using RPN (Risk Priority Number) results to allocate resources based on the risks measured. However, evaluation based only on the RPN is considered a questionable method. Another issue is related to the decision maker's preference structure, which may not fit in with the procedure adopted in this methodology, considering all attributes with the same importance. In order to address these issues this paper presents a multiple criteria decision model to rank the possible causes of failures and using the methodological support given by MCDM.

KEYWORDS: FMECA, RPN, Multiple Criteria Decision Making.**Main Area (ADM - Multicriteria Decision Support; EN - OR in Energy)**

1. Introdução

Campos et al. (2011) afirmam que o objetivo de uma organização no contexto do cenário mundial está diretamente associado com a competitividade. Desta forma, empresas buscam meios para melhoria dos seus processos. Da mesma forma, Bourne e Walker (2005) afirmam que a dinâmica da economia global e o aumento da complexidade traz conseqüências para as organizações e seus empregados.

O gerenciamento da manutenção não foge a esta regra. Neste contexto, Reis et al. (2009) descrevem que muitas organizações tratam o gerenciamento da manutenção como uma atividade de fundamental importância para suas atividades produtivas. Segundo Carmignani (2009), requisitos dos clientes, além do aumento na complexidade dos produtos têm feito do conceito de confiabilidade um fator de grande importância no planejamento da manutenção de dispositivos. O termo confiabilidade refere-se a probabilidade de um componente ou sistema executar a função requerida em condições particulares de uso por um dado intervalo de tempo. Organizações que focam na confiabilidade, enfatizam a garantia da satisfação do cliente quanto aos produtos e/ou serviços. Da mesma forma, Birkner (2004) destaca uma forte correlação entre a disponibilidade de um bem e o seu gerenciamento. Qualquer estratégia precisa inserir um plano para as atividades de manutenção, visto que é sabido que falhas geram ações não planejadas.

De acordo com Dekker (1996), com o passar dos anos, nota-se um aumento na importância dada a função manutenção, bem como ao seu gerenciamento. Moubrey (1997) descreve como o cenário no setor de manutenção tem se alterado. Bens são mais complexos e mudanças são observadas nas organizações (de forma mais específica no setor de manutenção). Além disso, de acordo com Cavalcante et al. (2010), os sistemas requerem modelos e níveis de manutenção, onde falhas são vistas como aspectos negativos. Neste cenário, verifica-se que o processo decisório atrelado ao uso de técnicas/ferramentas que podem ser empregadas pela organização para melhoria do desempenho dos bens e a redução dos custos de manutenção é bastante crítico.

Dentre estas ferramentas, este artigo focará no FMECA (*Failure Modes Effects and Criticality Analysis*), uma das ferramentas mais utilizadas para a análise da confiabilidade e falhas. Certos aspectos serão discutidos com o intuito de apresentar um modelo de decisão multicritério para a priorização das possíveis causas de falhas, levando em consideração mais atributos e utilizando o apoio da abordagem multicritério.

A estrutura deste artigo está definida da seguinte forma: primeiramente, uma explanação de certos aspectos do FMECA e decisão multicritério são descritos. Então, o modelo de decisão multicritério é apresentado. O modelo é ilustrado através de um estudo de caso de um sistema de produção específico. Por fim, resultados e conclusões são apresentados.

2. Revisão da Literatura

2.1 FMECA

FMECA é uma abordagem amplamente utilizada cujo principal objetivo é prover uma avaliação crítica e sistemática dos modos de falha potenciais e suas causas.

De acordo com Puente et al. (2002), o FMECA consiste de 2 estágios: durante o primeiro estágio, possíveis modos de falha de um produto ou processo e seus efeitos prejudiciais devem ser identificados. A segunda fase caracteriza-se pela definição dos níveis críticos das falhas, levados em consideração para modificações e ajustes necessários. As falhas mais críticas estarão no topo do ranking, devendo ter prioridade quanto à tomada de ações para a minimização da probabilidade de sua ocorrência.

O RPN (*Risk Priority Number*) é utilizado na maioria das vezes para selecionar os modos de falha potenciais que serão considerados como prioritários a partir dos valores obtidos através do seu cálculo. Dong (2007) afirma que no FMECA a severidade do efeito do

modo de falha (S), a ocorrência do modo de falha (O) e sua detecção (D) são definidas num intervalo entre 1 e 10. Abdelgawad e Fayek (2010) destacam que, os valores obtidos a partir do cálculo do RPN ($RPN = S \times O \times D$) pode variar de 1 a 1000. A principal idéia, segundo Chang et al. (1999) é gerar um RPN para cada modo de falha de tal forma que recursos possam ser definidos baseados na priorização dos resultados. Um alto valor associado ao RPN indica alto risco. De acordo com Braglia (2000), FMECA lista cada modo de falha potencial de um sistema e seus efeitos. Pode ser utilizado em qualquer nível, desde sistemas completos até componentes.

Conforme afirmado por Cassanelli et. al. (2006), algumas vezes, mesmo que os procedimentos estejam consolidados e que haja conhecimento amplo a respeito, algumas críticas são efetuadas. Sendo assim, embora o FMECA seja uma ferramenta bastante utilizado para a análise da confiabilidade e das falhas, existem várias observações e críticas referentes aos valores do RPN (Braglia, 2000; Chang et al., 1999; Puente et al., 2002; Braglia et al., 2003; Dong, 2007):

- Dificuldade em se quantificar fatores associados às falhas, mesmo quando se adota uma escala baseada em julgamentos verbais que representam uma tentativa de quantificação;
- A definição de prioridades com base nos valores obtidos do RPN são bastante questionáveis, pois trata-se de uma simples multiplicação de escores;
- Apenas alguns aspectos são considerados, ignorando-se por exemplo aspectos econômicos associados à ocorrência das falhas;
- Várias combinações de escores podem produzir o mesmo RPN. No entanto, a implicação do risco pode ser totalmente diferente;
- Quanto à estrutura de preferências do decisor, não se verifica nenhum aspecto considerado no FMECA, dado que todos os atributos apresentam a mesma importância.

2.2 Decisão Multicritério

De acordo com Bishop et al. (2008) de uma forma geral, decisões são bastante complexas. Critérios precisam ser satisfeitos e consequências das alternativas a serem avaliadas apresentam distribuições espaciais e temporais distintas, afetando grupos populacionais e gerações diferentes. Decisões são tomadas também no contexto social, onde percepções se tornam tão relevantes quanto os fatos. Neste complexo ambiente, a pesquisa relativa à tomada de decisão apresenta dois aspectos: compreender e auxiliar o processo decisório.

Vincke (1992), afirma que o contexto da decisão multicritério engloba um conjunto de métodos e técnicas criadas para dar suporte a indivíduos e organizações na resolução de problemas decisórios. Silva et al. (2010) afirmam que a análise multicritério consiste na estruturação e análise de decisões complexas, que incluem vários critérios, alguns dos quais conflitantes entre si. Mota et al. (2009) destacam a existência de um vasto número de ferramentas que apóiam o suporte ao decisor para a solução de problemas, considerando diferentes pontos de vista, frequentemente contraditórios. Munda (2008) afirma que, operacionalmente, a grande força dos métodos de decisão multicritério está na habilidade de visualizar diferentes pontos de vista, caracterizados como questões conflitantes, permitindo uma avaliação integrada do problema em análise.

Um dos métodos utilizados para o desenvolvimento de modelos associados a problemas de apoio a decisão é o MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*). De acordo com Brito e Almeida (2009), MAUT agrega preferências e consequências, considerando múltiplas dimensões. Leva em conta também o comportamento e preferências do decisor em ambientes incertos. Adicionalmente, Ferreira et al. (2009), afirmam que a estrutura de preferências do decisor é baseada num conceito compensatório da análise dos critérios. MAUT utiliza a teoria da utilidade, quantificando os desejos do decisor e associando os bens

com valores que representam uma regra de escolha para o decisor. Keeney e Raiffa (1976) afirmam que quando a utilidade está devidamente definida para cada possível consequência e a utilidade esperada de cada alternativa é definida, o melhor curso da ação é estabelecido através da alternativa que apresenta o maior valor de utilidade esperada.

3. Modelo proposto

Nesta seção será apresentado o modelo proposto por Alencar et al (2012) para a priorização das causas potenciais da falha a partir do FMECA. Mota e Almeida (2011) afirmam que um importante aspecto no desenvolvimento de modelos de decisão multicritério está relacionado ao método escolhido, que depende de vários aspectos como o tipo do problema e a estrutura de preferência dos decisores considerados. O método de agregação utilizado no modelo decisório deste artigo é o MAUT visto que inclui o *background* probabilístico necessário para a análise.

A figura 1 a seguir apresenta aspectos considerados para o cálculo da função utilidade no modelo.

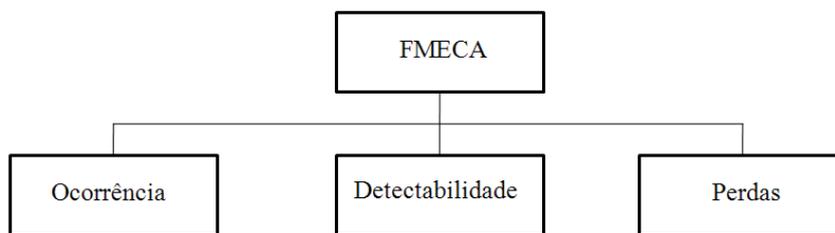


Figura 1. Aspectos considerados no cálculo da função utilidade.

Neste modelo, o cálculo do índice que define a priorização não utiliza o RPN. Em contrapartida, de acordo com Brito et al. (2010), MAUT é aplicado com o intuito de estabelecer um índice baseado em valores que irão definir a priorização de ações com base na ordem dos próprios valores. Isto é feito através da função utilidade “U”. Almeida (2007) afirma que a função utilidade multiatributo é obtida a partir da modelagem das preferências dos decisores, agregando as funções utilidade de todos os atributos considerados. Keeney (1992) afirma que esta abordagem fragmenta a avaliação de “U” em partes. Primeiro, trabalha-se nestas partes fragmentadas que são então agregadas. Neste processo, é necessário que os valores finais baseados no julgamento do decisor sejam afirmados, registrados e quantificados. A ocorrência é obtida a partir da taxa de ocorrência do evento.

Critérios precisam ser definidos para o desenvolvimento do modelo. Detectabilidade e perdas são os critérios adotados. Aspectos como fatalidades, disponibilidade e custos financeiros são levados em consideração no critério “perdas”. A Figura 2 destaca a estrutura hierárquica do critério “perdas”, onde, custos financeiros incluem aspectos como qualidade, tempo de trabalho ocioso, retrabalho, máquinas ociosas e danos às máquinas. A frequência de ocorrência é considerada como uma aproximação da probabilidade de ocorrência a ser utilizada para a obtenção de uma utilidade esperada.

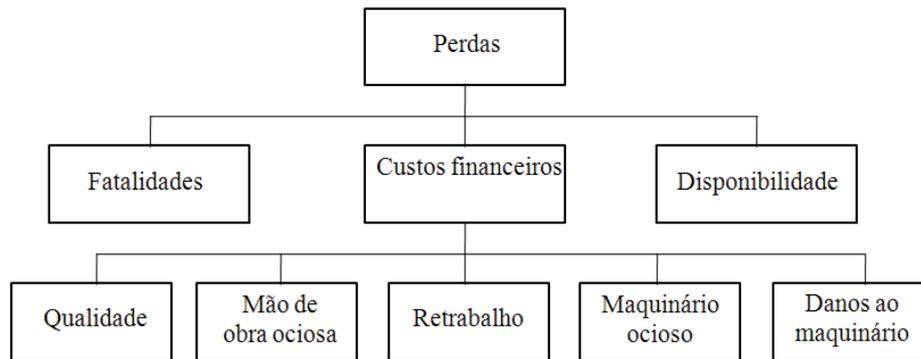


Figura 2. Estrutura Hierárquica do critério “perdas”

A função utilidade aditiva foi considerada neste modelo, gerada através de utilidades unidimensionais como observado a seguir:

$$U(d,p) = k_d u_d + k_p u_p \quad (1)$$

Onde:

d = Atributo detectabilidade;

p = Atributo perdas;

k = Constante de esca indicando o valor dos *tradeoffs*.

Segundo Keeney e Raiffa (1976) a adição das constantes de escala deve ser igual a “1”, sendo elicitadas através de procedimentos baseados em comparação de loterias.

A equação (1) pode ser redefinida com base na condição de independência aditiva verificada em Fishburn (1970), como descrito em Keeney e Raiffa (1976):

$$U(d,l) = k_d u_d + K_p u_p(m, c, a) \quad (2)$$

Onde:

d = Atributo detectabilidade;

p = {m,c,a};

m = Atributo fatalidade;

c = Atributo custos financeiros;

a = Atributo disponibilidade;

k = Constante de esca indicando o valor dos *tradeoffs*.

A partir da Tabela 1, verifica-se uma escala de medida para cada atributo considerado. O atributo perdas é subdividido em fatalidades, disponibilidade e custos financeiros. É

importante destacar que o atributo custo financeiro é a soma dos aspectos listados a seguir:

- Custos gerados por problemas de qualidade (CQ) – atrelado com qualidade (prevenção, avaliação e falha);
- Ociosidade da mão de obra (MO) – implicação do downtime à mão-de-obra;
- Retrabalho (RT) – retrabalho gerado por falhas do maquinário;
- Ociosidade do maquinário (OM) – atrelado ao downtime do maquinário;
- Danos ao maquinário (DM) – associado à consequência da falta de manutenção.

Tabela 1 – Escala de medida para os atributos considerados

Atributo		Sigla	Escala de medida	
Detectabilidade		DT	Eficiência dos controles de detecção de falhas ou modos de falha	
Perdas	Fatalidades	FT	Número de mortes	
	Disponibilidade	DP	MTBF/ (MTBF + MTTR)	
	Custos Financeiros	Custo da qualidade	CQ	R\$
		Ociosidade da mão de obra	MO	Implicação do Downtime à mão de obra
		Retrabalho	RT	R\$ (despesas com retrabalho)
		Ociosidade do maquinário	OM	Downtime do maquinário
Danos ao maquinário		DM	R\$	

4. Estudo de caso

Uma aplicação numérica baseado numa situação real é apresentada com o intuito de ilustrar o modelo desenvolvido. Por razões de confidencialidade, dados realísticos foram utilizados com base numa planta de uma usina termelétrica. Nesta aplicação, os critérios considerados foram detectabilidade, perdas associadas a disponibilidade, além de perdas financeiras . A partir dos modos de falha considerados, nenhum apresentou fatalidades nos respectivos cenários. Por conta disto, este critério não será considerado.

O sistema de vapor e bypass foi escolhido para esta análise. O estudo foi direcionado para o subsistema de bypass de alta pressão. Estas definições basearam-se na política da organização. Dentre centenas de equipamentos, o conjunto de equipamentos a descritos a seguir foram estabelecidos para o estudo de caso. São eles: Válvula de isolamento motorizada (Equipamento 1) e Válvula de bypass de alta pressão (Equipamento 2). Um FMEA simplificado dos equipamentos considerados será descrito na Tabela 3.

Tabela 3 – FMEA simplificado

Função	Falha Funcional	Modo de Falha (MF _i)		Conseqüência da falha
Proteger os reaquecedores	Não proteger os reaquecedores	MF ₁	Válvula travada aberta (causas mecânicas). Equipamento 1	Dano aos reaquecedores. Turbina desliga.
Proteger os reaquecedores	Não proteger os reaquecedores	MF ₂	Válvula travada aberta (causas elétricas). Equipamento 1	Dano aos reaquecedores. Turbina desliga.
Proteger os reaquecedores	Não proteger os reaquecedores	MF ₃	Válvula dando passagem (não completamente aberta ou fechada) . Equipamento 1	Dano aos reaquecedores. Turbina perde potência.
Evitar stress térmico	Não evitar stress térmico	MF ₄	Válvula travada fechada (causas mecânicas). Equipamento 1	Dano aos tubos com possível perda de potência
Evitar stress térmico	Não evitar stress térmico	MF ₅	Válvula travada fechada (causas elétricas). Equipamento 1	Dano aos tubos com possível perda de potência
Controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	Não controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	MF ₆	Válvula travada fechada (causas mecânicas) Equipamento 2	Pressão excessiva no sistema de vapor. Desligamento da turbina.
Controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	Não controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	MF ₇	Válvula travada aberta (causas mecânicas) Equipamento 2	Desligamento da turbina a vapor.
Controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	Não controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	MF ₈	Falha no sistema hidráulico. Equipamento 2	Pressão excessiva no sistema de vapor. Desligamento da turbina.
Controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	Não controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	MF ₉	Válvula dando passagem. Equipamento 2	Perda de potência na turbina a vapor.
Controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	Não controlar os parâmetros do vapor de alta pressão	MF ₁₀	Falha no sistema de controle. Equipamento 2	Pressão excessiva no sistema de vapor. Desligamento da turbina.

Valores de utilidade são apresentados na Tabela 4, em ordem decrescente, ilustrando a posição quando ao ordenamento dos modos de falha que devem ser considerados no instante em que recursos são alocados com o intuito de prevenir cada uma das falhas. O maior valor de utilidade traduz que as conseqüências a partir do modo de falha são mais aceitáveis ou toleráveis do que modos de falha que apresentam menores valores de utilidade.

Tabela 4. Modos de falha priorizados em função dos valores da utilidade.

Modo de Falha MF_t	$U(MF_t)$	$U(MF_t)-U(MF_{t+1})$	$[U(MF_t)-U(MF_{t+1})] / [U(MF_{t+1})-U(MF_{t+2})]$
MF_{10}	1	0,04247	0,23307
MF_{09}	0,95753	0,18222	1,42504
MF_{08}	0,77531	0,12787	6,69827
MF_{04}	0,64744	0,01909	15,64754
MF_{05}	0,62835	0,00122	0,12958
MF_{07}	0,62713	0,00941	0,11399
MF_{06}	0,617715	0,08259	0,67570
MF_{02}	0,535121	0,12223	0,29605
MF_{03}	0,412887	0,41289	-
MF_{01}	0	-	-

Os resultados apresentam a influência da detectabilidade. Deseja-se a situação de maior detectabilidade possível. Perdas financeiras e perdas de disponibilidade representam a indisponibilidade do serviço.

Com base nos valores da Tabela 4 é possível observar um conjunto de modos de falha distribuído em três classes de severidade: crítica, intermediária e menos crítica, considerando as preferências do decisor com relação aos critérios. Desta forma, iniciativas devem ser desenvolvidas primeiramente na classe mais crítica do sistema. Na última coluna da Tabela 4, observa-se este tipo de informação. Representa a razão das diferenças entre cada modo de falha. A título de exemplo, a diferença entre MF_{08} e MF_{04} é quase sete vezes a diferença entre MF_{04} e MF_{05} .

Considerando a razão das diferenças, modos de falha podem ser classificados em classes de severidade como apresentado na Tabela 5. A diferença média entre os modos de falha menos críticos é quase sete vezes a diferença dos modos de falha intermediários. A diferença entre modos de falha intermediários é cerca de quinze vezes a diferença entre os modos de falha críticos. Estas razões de diferenças justificam as classes de severidade estabelecidas.

Tabela 5 – Classificação dos modos de falha

Modo de falha FM_i	Classe de severidade
MF_{10}	Menos crítica
MF_{09}	Menos crítica
MF_{08}	Menos crítica
MF_{04}	Intermediária
MF_{05}	Crítica
MF_{07}	Crítica
MF_{06}	Crítica
MF_{02}	Crítica
MF_{03}	Crítica
MF_{01}	Crítica

5. Conclusão

Através do desenvolvimento e aplicação do modelo de decisão multicritério, este artigo auxiliou a identificar, quantificar e analisar o ordenamento dos modos de falha potenciais a partir do FMECA. Para cada modo de falha considerado, um valor é definido a partir de uma função utilidade multiatributo.

Detectabilidade e perdas são consideradas como atributos, onde perdas são subdivididas em fatalidades, custos financeiros e disponibilidade. Custos financeiros são divididos em custo associado à qualidade, ociosidade da mão de obra, retrabalho, ociosidade do maquinário e danos ao maquinário com o intuito de considerar diferentes

aspectos financeiros nos cálculos efetivados.

Outro ponto importante foi o uso do MAUT para a avaliação dos modos de falha potenciais. Preferências e valores de julgamento do decisor foram incorporados ao modelo. A agregação destas melhorias através da aplicação do MAUT diretamente no modelo proporcionou resultados consistentes que podem apoiar de forma satisfatória os gerentes do setor de manutenção da organização no planejamento das atividades, definindo prioridades para melhorias. A partir dos resultados obtidos, torna-se possível considerar diferentes equipamentos a partir de um sistema e considerar quais modos de falha são mais críticos, a partir da classificação estabelecida para os modos de falha dos dois equipamentos analisados. Isto possibilita direcionar ações diretamente aos modos de falha do sistema e não apenas ao equipamento.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio parcial do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e da Termopernambuco S/A (P&D TPE 29).

Referências

- Abdelgawad, M.; Fayek, A. R.** (2010) Risk Management in the Construction Industry Using Combined Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136 (9), 1028-1036.
- Alencar, M.H.; Almeida, A. T.** (2010) Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 3610-3619.
- Alencar, M. H.; Almeida-Filho, A. T.; Almeida, A. T.** (2012) An MCDM model for potential failure causes ranking from FMECA. In: Esrel 2012 / PSAM 11, 2012, Helsinki. *Annals of Esrel 2012 / PSAM 11, 2012*.
- Alencar, L. H.; Mota, C.M.M.; Alencar, M. H.** (2011) The problem of disposing of plaster waste from building sites: Problem structuring based on value focus thinking methodology. *Waste Management* 31 2512-2521.
- Almeida, A.T.** *O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. 2a Edição. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2011.
- Almeida, A. T.** (2007) Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method. *Computers & Operations Research* 34 3569 – 3574.
- Bertolini, A.; Bevilacqua, A.** (2006) A Multi Attribute Utility Theory Approach to FMECA implementation in the food industry. *Safety and Reliability for Managing Risk*.
- Birkner P.** (2004) Field experience with a condition-based maintenance program of 20-kV XLPE distribution system using IRC-analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery* 19:3-8.
- Bishop, I.D.; Christian, S.; Kathryn, J.W.** (2008) Using virtual environments and agent models in multi-criteria. *Land Use Policy*. Vol.26, p. 87-94.
- Bourne L, Walker DHT.** The paradox of project control. *Team Performance Management* 2005;11:157-178.
- Braglia, M.** (2000) MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *Journal of Quality & Reliability Management*, 17, n.2, 1017-1033.
- Braglia, M.; Frosolini, M; Montanari, R.** (2003) Fuzzy TOPSIS Approach for Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 19, 425-443.
- Brito, A.J. & Almeida, A.T.** (2009) Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering & System Safety* 94 (2): 187-198.

- Brito, A.J.; Almeida Filho, A.T.; Almeida, A.T.** (2010) Multi-criteria decision model for selecting repair contracts by applying utility theory and variable interdependent parameters. *IMA Journal of Management Mathematics* 21, 349–361.
- Campos, A C S M ; Daher, S F D ; Almeida, A T .** (2011) New Patents on Business Process Management Information Systems and Decision Support. *Recent Patents on Computer Science*, v. 4, p. 91-97.
- Carmignani, G.** (2009) An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 861-871.
- Cassanelli, G.; Mura, G.; Fantini, F.; Vanzi, M.; Plano, B.** (2006) Failure analysis-assisted FMEA. *Microelectronics Reliability* 46, p.1795–1799.
- Cavalcante, C.A.V.; Ferreira, R.J.P.; Almeida A.T.** (2010) A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach. *IMA Journal of Management Mathematics*. 21, 333–348.
- Chang, C.; Wei, C; Lee Y.** (1999) Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes*, 28, n.9, 1072-1080.
- Dekker R.** (1996) Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51:229-240.
- Dong, C.** (2007) Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24, n.9, 958-971.
- Ferreira R.J.P; Almeida A.T.; Cavalcante C.A.V.** (2009) A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 94:905-912.
- Fishburn, P.C.** (1970) *Utility Theory for Decision Making*. Wiley, New York.
- Keeney, R.L.** (1992) *Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision-Making*. Harvard, London.
- Keeney, R.L.** (1996) Value - focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives. *European Journal of Operational Research*, 92 (1996) 537-549.
- Kutlu, A.C.; Ekmekçioğlu, M.** (2012) Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications* 39, 61–67.
- Mota, C.M.M.; De Almeida, A.T.** (2011) A multicriteria decision model for assigning priority classes to activities in project management. *Annals of Operations Research* 1-12
- Mota, C.M.M.; De Almeida, A.T.; Alencar, L.H.** (2009) A multiple criteria decision model for assigning priorities to activities in project management. *International Journal of Project Management* 27, 175-181.
- Moubray, J.** (1997) *Reliability-centered Maintenance: RCM II*. North Carolina: Industrial Press Inc.
- Munda, G.** (2008) *Social Multi-criteria evaluation for a sustainable economy*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Puente, J.; Pino, R; Priore, P.; De La Fuente, D.** (2002) A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 19, n.2, 137-150.
- Reis, A. C. B. ; Costa, A. P. C. S. ; Almeida, A. T.** (2009) . Planning and competitiveness in maintenance management: An exploratory study in manufacturing companies. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 15, p. 259-270.
- Silva, V. B. S. ; Moraes, D. C. ; Almeida, A. T.** (2010) A Multicriteria Group Decision Model to Support Watershed Committees in Brazil. *Water Resources Management*, v. 24, p. 4075-4091.
- Zammori, F.; Gabbrielli, R.** (2011) ANP/RPN: A Multi Criteria Evaluation of the Risk Priority Number. *Quality and Reliability Engineering International*, DOI: 10.1002/qre.1217.
- Xu, K.; Tang, L. C.; Xie, M.; Ho, S. L. e Zu, M.L.** (2002) Fuzzy assessment of FMEA for engine systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 75 17-29.
- Vincke, P.** (1992) *Multicriteria Decision – aid*. Bruxelles: John Wiley & Sons.