ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE UMA PRAÇA DE PEDÁGIO

Patrícia Pereira Arantes Inácio
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG
pati.arantes@hotmail.com

Ana Clara Barbieri
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG
aclarabarbieri@hotmail.com

Josiane Palma Lima
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG
jpalmalima@gmail.com

RESUMO

A manutenção é considerada um fator estratégico para as organizações, pois visa a disponibilidade dos equipamentos, sua segurança, qualidade, confiabilidade, operando com custos mais baixos, com um tempo de vida mais longo para processos e menor degradação do valor comercial dos equipamentos. Sabe-se, entretanto, que a escassez de recursos exige a priorização da manutenção dos equipamentos com maior impacto na funcionalidade da empresa. Com isso, o objetivo deste trabalho foi elaborar uma estrutura de análise multicritério para priorização da manutenção de equipamentos eletromecânicos de uma praça de pedágio. Tal estrutura surgiu da combinação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) com a abordagem do Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Os resultados revelam que as falhas mais significativas são as de Tensão Elétrica e Impacto mecânico, as quais apresentam alto grau de severidade, podendo afetar a segurança e satisfação dos clientes.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção, Manutenção de equipamentos, Análise multicritério.

Tópicos ADM – Apoio à Decisão Multicritério

ABSTRACT

Maintenance is considered strategical for organizations because it seeks for availability of equipment, its security, quality and reliability, operating with low costs, in a longer lifetime of processes and less depreciation of equipment itself. It is known, however, that scarce resources must be prioritized in equipment with higher impact on the functionality of the enterprise. So, the aim of this paper is formulate a hierarchy of multicriteria analysis to prioritize maintenance of electromechanical equipment of toll booths. The structure has arisen from the combination of the Analytic Hierarchy Process (AHP) with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). The results reveal that Electric Tension and mechanical Impact are the most meaningful failures observed, representing high severity and possibly affecting customer safety and satisfaction.

KEYWORDS: Maintenance, Equipment Maintenance, Multicriteria Analysis.

Topics ADM – Multicriteria Decision Support

1. Introdução

Segundo Slack, Chambers e Johnston [2009, p. 610] a manutenção é uma maneira das organizações evitarem falhas cuidando de suas instalações físicas, onde o benefício de fazer uso de tal atividade inclui segurança melhorada, confiabilidade aumentada, maior qualidade, custos mais baixos de operações, tempo de vida mais longo para processos e menor degradação do valor comercial do equipamento.

Já de acordo com a ABNT no padrão NBR-5462 [1994], manutenção é definida como o conjunto de atividades administrativas, de supervisão e técnicas que tem por objetivo manter a integridade ou reposicionar um equipamento de forma que ele continue desempenhando a função que lhe é desejada.

A fim de se tornarem competitivas, as empresas precisam que suas funções básicas apresentem resultados excelentes, dessa maneira, a manutenção vem sendo usada como função estratégica nas organizações, sendo responsável direta pela disponibilidade dos ativos, impactando no capital e resultados das organizações. Esses resultados serão tanto melhores quanto mais eficaz for à gestão da manutenção [Otani e Machado 2008].

Com o aumento do número de equipamento nas organizações, o custo de manutenção vem aumentando. Dessa maneira, saber priorizar qual equipamento deve ter uma atenção maior é de extrema importância a fim de garantir o bom funcionamento da empresa e a redução dos custos. É pensando nisso que o objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo para auxiliar o processo de decisão na priorização da manutenção de equipamentos eletromecânicos de uma praça de pedágio. Para alcançar este objetivo, lançou-se mão de um estudo de caso em uma empresa de concessão de rodovias localizada no estado de Minas Gerais, o qual proporcionou bases para a elaboração de uma estrutura hierárquica baseada no *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e na ferramenta *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA).

O artigo está estruturado da seguinte maneira: fundamentação teórica, com levantamento dos principais temas da pesquisa; procedimentos metodológicos; análise dos resultados e conclusão.

2. Referencial teórico

2.1 Manutenção

Kardec e Carvalho [2002] expõem que, até há pouco tempo, a missão da Manutenção era de restabelecer as condições originais dos equipamentos ou sistemas. Hoje, a missão da Manutenção, segundo os autores, é: “Garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a poder atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados”.

Segundo a norma EN 13306:2001, versão portuguesa, a manutenção é definida da seguinte forma: “Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”. Ou seja, manutenção pode ser definida como o conjunto de ações que permitem manter ou controlar o estado original de funcionamento de um equipamento ou bem [Bem-Daya 2000], dividindo-se em quatro fatores essenciais: segurança, qualidade, custo e disponibilidade de serviço.

A manutenção trata-se da combinação de todas as ações necessárias para conservar um objeto ou para o restabelecer de modo a que este possa executar a sua função. Deste modo os objetivos principais, quando se fala em manutenção, são assegurar o funcionamento do sistema, garantir sua vida útil e garantir a segurança e o bem-estar humano. A manutenção é utilizada em todo tipo de empresa para evitar possíveis falhas e quebras em máquinas e instalações, entre outros. A confiabilidade e a manutenção estão intrinsicamente relacionadas, assim como afirma Evans Junior [1962].

Historicamente é possível dividir a evolução da manutenção em três distintos períodos [Moubray 1997]:

- Primeira Geração: Após a primeira Guerra Mundial, a reparação dos equipamentos era realizada após o seu dano. Nesse período que surge o conceito de Manutenção Corretiva.

• Segunda Geração: O período pós-guerra impulsionou o avanço da indústria e uma crescente necessidade de sua mecanização, composta de máquinas numerosas e complexas, que se pretendia assegurar a longevidade e continuidade dos equipamentos. Surge o conceito de Manutenção Preventiva.

• Terceira Geração: Iniciada nos anos 1970, procurando novas formas de maximizar a vida útil dos equipamentos produtivos, sua disponibilidade e confiabilidade, sua segurança e qualidade, bem como um controle sobre os custos de produção. Houve uma evolução dos processos de controlo e sistemas de automatização, contribuindo para um planeamento da manutenção de forma mais eficiente e eficaz. Surge o conceito de gestão da manutenção.

Um dos propósitos da manutenção é estender o ciclo de vida do equipamento ou, pelo menos, aumentar o tempo médio para a ocorrência da próxima falha, cuja reparação poderá ser menos onerosa [Endrenyi *et al*. 2001; Li e Brown 2004]. Inúmeras publicações encontradas na literatura, [Yan e Lee 2005; Tan e Huo 2005; Tinós 1999], abordam a inspeção, detecção, avaliação, predição e diagnóstico de falhas com a intenção de alcançar os melhores índices de disponibilidade e confiabilidade, por exemplo.

2.1.1 Manutenção corretiva

Manutenção Corretiva (ou de reparação) corresponde à primeira aproximação de manutenção. Está relacionada com as ações praticadas depois da ocorrência e descoberta de um desarranjo, uma disfunção ou uma falha nos sistemas [Marçal 2000]. Ou seja, ela é efetuada após falha ou anomalia do bem, com o intuito de devolver a função interrompida. Podem ser intrínsecas ou extrínsecas, isto é, podem ter origem numa falha do próprio equipamento ou origem em fatores externos, tais como acidentes ou má operação [Cabral 2009].

A manutenção corretiva consiste da substituição de um, ou mais componentes, por um novo componente (ou tão bom como novo) que irá gerar um custo e resultar em uma limitada melhoria das condições do sistema [Endrenyi *et al*. 2001; Yam *et al*. 2001].

Os tipos de manutenção corretiva são:

a) Paliativa: compreende as intervenções corretivas executadas provisoriamente a fim de colocar o equipamento em funcionamento para, a seguir, efetuar o reparo definitivo;
b) Curativa: compreende as ações típicas de reparo em caráter definitivo, a fim de restabelecer os itens à função requerida.

2.1.2 Manutenção preventiva

Quando a manutenção acontece num período de tempo predefinido, segundo um determinado calendário, recebe o nome de manutenção preventiva. Normalmente este calendário é elaborado de acordo com a recomendação dos fornecedores ou com base em experiências anteriores com o equipamento [Camci 2009; Webster e Gale 2006]. Nas situações em que não se caracterizou um estado de falha nos sistemas a manutenção preventiva é aquela praticada com a intenção de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas ou danos. Segundo [Shikari *et al*. 2004], na manutenção preventiva as ações de manutenção são planejadas. Através de inspeções realiza das periodicamente se minimiza as paradas e a taxa de degradação, restaurando o sistema a sua função original.

O termo manutenção preventiva surge com o equipamento mecânico e refere-se ao trabalho realizado periodicamente em equipamentos que incluem peças sujeitas a desgaste e que por isso precisam ser restauradas ou substituídas [Vivo *et al*., 2004]. A manutenção preventiva tem como intenção principal eliminar as quebras dos sistemas e as paradas no processo de produção provocadas por operações regulares de manutenção corretiva [Djurdjanovic *et al*. 2003].

A manutenção preventiva pode ser do tipo sistemático, em que as intervenções são efetuadas em intervalos de tempo constantes ou quando uma taxa específica de um fator de utilização é atingida, ou do tipo condicionado, em que o funcionamento do bem é controlado e que a avaliação do estado do bem desencadeia as medidas a serem tomadas [Cabral 2009].

2.1.3 Manutenção baseada na condição ou preditiva

Nos últimos anos a manutenção realizada em intervalos fixos tem sido substituída por esquemas de manutenção (preditiva) mais flexíveis baseado na análise das necessidades e prioridades, ou no estudo da informação obtida através do monitoramento, contínuo ou periódico, das condições dos equipamentos [Endrenyi *et al*. 2001].

Assim, a manutenção baseada na condição é a mais recente e tem como objetivo buscar o equilíbrio entre o custo de manutenção que é elevado na manutenção preventiva e o custo de falha que é elevado no caso da manutenção corretiva. Segundo esta política de manutenção os equipamentos são continuamente monitorados por vários sensores que detectam falhas em tempo real. Esta política preocupa-se também em estimar o tempo de uma futura falha e a restante vida útil dos componentes, a qual está associada a uma determinada probabilidade de falha [Webster e Gale 2006].

A manutenção preditiva pode ser aperfeiçoada através do uso de indicadores satisfatórios de predição e disfunção das peças e equipamentos, e de uma análise de tendências ou de avaliações probabilísticas do estado de degradação de equipamentos, reduzindo assim a probabilidade de falhas e a degradação de componentes. Com base nesses indicadores estatísticos é possível prever a necessidade da manutenção antes de uma falha ocorrer e programar a parada dos equipamentos, ou linhas de produção, num momento adequado [Vivo *et al*. 2004].

2.2 Método AHP

De acordo com Gomes e Freitas Júnior [2000], problemas de decisão podem ser discretos, quando se trata de um número finito de alternativas, ou contínuo, quando tal número pode ser pensado como sendo infinitamente grande. Dentre os métodos multicritérios discretos destacam-se a Utilidade Multiatributo, o AHP e os métodos ELECTRE. Os métodos contínuos são também denominados métodos de otimização de critério ou métodos interativos, compreendendo basicamente métodos de programação matemática com mais de uma função objetivo.

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi desenvolvido por Tomas L. Saaty no início da década de 1970 e é o método de multicritério mais amplamente utilizado e conhecido no apoio à tomada de decisão na resolução de conflitos negociados, em problemas com múltiplos critérios [Saaty 1977]. Segundo Ishizaka e Labib [2011], este método é aceito e aplicado por indústrias em problemas de tomada de decisão.

O AHP baseia-se no método newtoniano e cartesiano de pensar, que busca tratar a complexidade com a decomposição e divisão do problema em fatores, que podem ainda ser decompostos em novos fatores até ao nível mais baixo, claros e dimensionáveis e estabelecendo relações para depois sintetizar [Costa 2002]. Sua metodologia utiliza a comparação par a par para medir o grau de importância entre critérios e/ou alternativas. Em seguida, as comparações são convertidas em números para calcular os respectivos pesos durante a tomada de decisão [Bernasconi *et al*. 2010; Dong *et al*. 2008].

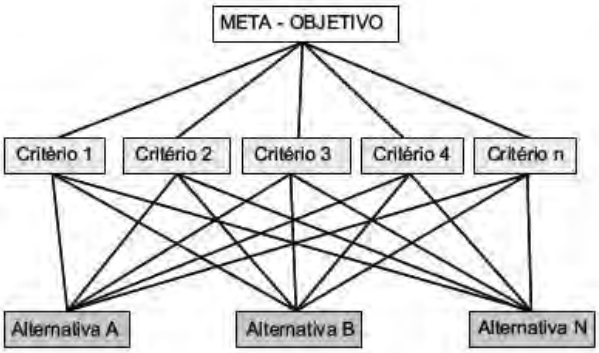
Para os autores Zahedi [1987], Moran *et al*. [2007] e Swait e Adamowics [2001], o método requer um menor esforço cognitivo para comparar pares de atributos e corroboram diversas razões que justificam o amplo uso do mesmo:

i. é suportado por um background cognitivo;
ii. permite medir relações entre atributos quantitativos e qualitativos;
iii. concede a interpretação de um fenômeno;
iv. é caracterizado por sua matemática simples e clara;
v. pode ser aplicado tanto para decisões individuais quanto de grupos;
vi. possui um reduzido impacto cognitivo quando comparado com métodos experimentais de escolha.

De acordo com Thomaz [2006], uma das vantagens do método multicritério AHP é a semelhança com o funcionamento do cérebro humano, ou seja, quando uma pessoa (decisor/julgador) está diante de uma decisão complexa, a mente agrega os elementos em grupos, de acordo com suas propriedades, de forma a facilitar a estruturação do raciocínio para a tomada de decisão. São estes agrupamentos que podem ser descritos como hierarquias. A

hierarquia pode ser dividida em níveis: (i) na hierarquia mais alta, é estabelecida a meta da decisão; (ii) nos pontos centrais, são estabelecidos os fatores e subfatores e (iii) no final da hierarquia, são exibidas as alternativas para a decisão. Essa divisão pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura hierárquica geral do método AHP



Fonte: Saaty [1990].

Segundo Colin [2007] e Costa [2002, p. 16-17], a aplicação do *Analytic Hierarchy Process* pode ser dividida em quatro etapas:

1. Representação hierárquica: fundamental para definir a meta ou objetivo global desejado, colocado no primeiro nível hierárquico, que é decomposto em objetivos secundários, chamados de critérios e alternativas permitem formar uma estrutura hierárquica de três ou mais níveis. Bornia e Wernke [2001] citam que a ordenação hierárquica possibilita ao decisor ter uma "visualização do sistema como um todo e seus componentes, bem como interações destes componentes". Além de compreender de forma global, o problema e da relação de complexidade, ajudando na avaliação da dimensão e conteúdo dos critérios, através da comparação homogênea dos elementos.
2. Comparação de pares: nesta etapa ocorre a participação de especialistas ou tomadores de decisão que possuam conhecimentos profundos da temática que permitam declarar realmente a importância, a força de suas preferências ou até mesmo a possibilidade real quanto aos critérios ou alternativas em análise.
3. Cálculo dos pesos relativos dos elementos do modelo: o método estima os pesos relativos dos elementos de decisão em cada nível de hierarquia e avalia a consistência (CR – *Consistency Ratio*) da comparação por pares. Segundo Saaty [2000], o ser humano tem a habilidade de estabelecer relações entre objetos ou ideias de forma que elas sejam coerentes, tal que estas se relacionem bem entre si e suas relações apresentem consistência. O CR é um indicador dessa coerência dos julgamentos.
4. Agregação das prioridades: agregação das prioridades relativas para avaliar o resultado obtido em relação ao objetivo.

Apesar das vantagens em fazer uso do método AHP, para Ayag [2005], a sua aplicação tem algumas limitações, por exemplo, o método não faz exame da incerteza associada ao julgamento (escala) e ainda, a seleção e a preferência dos responsáveis são subjetivas e suas decisões têm uma influência significativa nos resultados de AHP.

Apesar das limitações, por ser um instrumento flexível que considera diversos critérios para o processo de escolha ainda sim se optou pela utilização do AHP. Além disso, esse método gera um *ranking* com as alternativas, permite a avaliação de coerência dos julgamentos e possibilita tratar dados quantitativos e qualitativos.

2.3 *Failure Mode and Effect Analysis* – FMEA

Expressão proveniente do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA é uma abordagem comumente utilizada na identificação, priorização e tratamento de falhas potenciais em produtos, processos e/ou sistemas. Ferramenta originalmente aplicada no setor de aviação, o FMEA ao longo do tempo contribuiu para o estudo e predição de falhas em diversos setores, tais

como marinha, indústria de transformação, indústria química, indústria automobilística, indústria eletrônica entre outras, onde as falhas devem ser detectadas ainda em fases iniciais de um processo, antes do lançamento de um produto ou operação de um sistema [Ayyub 2003; Frank *et al*. 2014; Jiang *et al*. 2016; Ben-Daya and Raouf 1996].

Metodologicamente, o FMEA desmembra análises complexas em etapas tangíveis ao computar diferentes pesos para modos de falha através de um número de priorização de riscos (RPN – *risk priority number*), que é o valor resultante da multiplicação de três componentes de um modo de falha: severidade (*Sv*) ou gravidade dos efeitos da falha; probabilidade de ocorrência (*Oc*); e detecção (*Dt*), relacionado com a chance de detectar a falha antes que ela seja perceptível pelo cliente. Quanto maior esse valor, maior o risco de falha, o que exige que ações corretivas sejam direcionadas aos itens mais críticos quando suas causas não são esclarecidas. Assim, busca-se, por meio da ação corretiva, reduzir as taxas de *Sv*, *Oc* e *Dt*, prevenindo falhas e aumentando a confiabilidade de um produto, processo ou sistema [Ayyub 2003; Frank *et al*. 2014; Mandal e Maiti 2014; Ullah 2015, Bowles e Pelaez 1995].

Dentre os métodos de avaliação de risco, o FMEA apresenta uma modelagem intuitiva que lhe confere algumas críticas, isto porque no FMEA tradicional os valores para *Sv*, *Oc* e *Dt* são obtidos de forma subjetiva a partir da transformação das probabilidades em índices que variam em escalas predeterminadas. O próprio uso do RPN está sujeito a alguns pontos críticos, destacados em Garcia (2013). Contudo, o FMEA continua sendo uma ferramenta de grande relevância para identificação de falhas, suas causas e efeitos; seu uso e recomendação pelo *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) corrobora com sua adoção [Ayyub 2003; Frank *et al.* 2014; Garcia 2013; Ullah 2015; Ben-Daya and Raouf 1996].

3. Metodologia

Para dar início a um processo de decisão é necessário que se obtenha informações e que o problema esteja bem estruturado. Segundo Bouysou *et al*. [2006] é necessário formular bem o problema para garantir a eficiência da solução.

A presente pesquisa caracteriza-se como qualitativa para recolhimento de respostas e quantitativa para a avaliação das mesmas. Seu objetivo foi criar um modelo de priorização para a manutenção de equipamentos de uma praça de pedágio. Para tanto, foi feito um estudo de caso em uma concessionária do sistema rodoviário do estado de Minas Gerais. Inicialmente, houve um *brainstorming* com o grupo responsável pela manutenção dos equipamentos da empresa (gerente, coordenador, analistas e controladores), a fim de elencar as falhas em potencial do sistema (Tabela 1).

Tabela 1 – Falhas identificadas para priorização da manutenção de equipamentos

Categoria	Falha	Abordagem
F1	Sujeira	Alguns equipamentos estão expostos ao tempo, então eles podem empoeirar, molhar, sujar de barro, pode ocorrer deposição de papel ou outros aspectos que impossibilitam que o equipamento opere normalmente.
F2	Vibração	Falha do equipamento devido à vibração do solo quando veículos passam próximo. Essa falha pode levar ao afrouxamento de peças e/ou má fixação do equipamento.
F3	Tensão elétrica	O equipamento sofre avaria devido à variação da tensão elétrica, podendo ocorrer a queima de componentes ou do próprio equipamento.
F4	Impacto	Equipamento sujeito a falha devido a impacto mecânico, este impacto pode ser por parte do operador, dos motoristas que podem bater ou até mesmo relar em alguns equipamentos com o veículo ou o próprio movimento do equipamento (ex.: cancela). Esse impacto pode ocasionar o mau funcionamento ou a quebra.
F5	Dilatação	Como o equipamento fica ao tempo o calor pode expandir o material o que pode gerar trincas e com isso o mau funcionamento do equipamento.
F6	Desgaste mecânico	Com o uso do equipamento ele vai sofrendo desgaste, como jogo nas engrenagens, perda de pressão na mola, entre outros tipos de desgastes. Esse desgaste pode levar ao mau funcionamento do equipamento devido ao desgaste das peças.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As falhas descritas formam o segundo nível da estrutura hierárquica do método AHP. Sendo o primeiro nível a meta da decisão. Já o terceiro nível foi elaborado utilizando os critérios do método de análise de falha FMEA, que são: a) Ocorrência (*Oc*); b) Severidade (*Sv*); e c) Detecção (*Dt*). Para cada um desses critérios foram utilizados os índices estabelecidos por Stamatis [1995], os quais seguem o padrão da escala *Likert* (Figura 2).

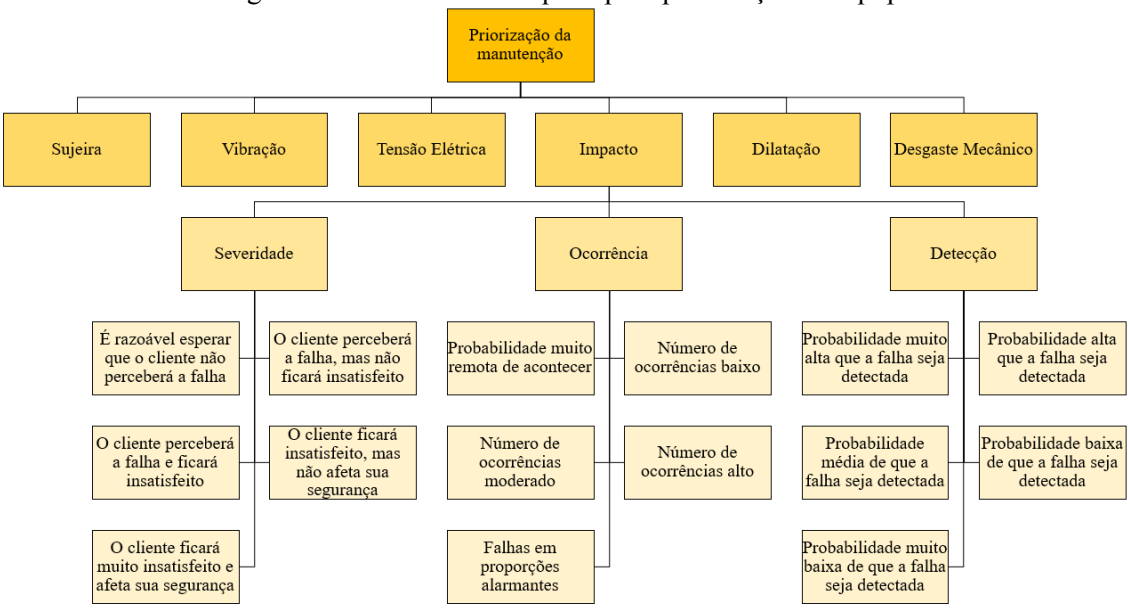
Figura 2 – Critérios utilizados para identificação dos índices de ocorrência, severidade e detecção utilizados no FMEA

Índices	Critérios do FMEA		
	Ocorrência (*Oc*)	Severidade (*Sv*)	Detecção (*Dt*)
1	Probabilidade muito remota de acontecer	É razoável esperar que o cliente não perceberá a falha	Probabilidade muito alta que a falha seja detectada
2	Número de ocorrências baixo	O cliente perceberá a falha mas não ficará insatisfeito por causa dela	Probabilidade alta de que a falha seja detectada
3	Número de ocorrências moderado	O cliente perceberá a falha e ficará insatisfeito	Probabilidade média de que a falha seja detectada
4	Número de ocorrências alto	O cliente ficará insatisfeito, mas não tem sua segurança afetada	Probabilidade baixa de que a falha seja detectada
5	Falhas em proporções alarmantes	O cliente ficará muito insatisfeito e afeta a sua segurança	Probabilidade muito baixa de que a falha seja detectada

Fonte: Stamatis [1995].

Assim, a estrutura hierárquica proposta para a priorização da manutenção de equipamentos de uma praça de pedágio (Figura 3) é uma combinação do método AHP com a abordagem do FMEA.

Figura 3 – Estrutura hierárquica para priorização de equipamentos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme pode ser observado na Figura, o nível 3 foi expresso apenas uma vez, pois ele se mantém igual, assim como os índices para cada uma das falhas. Ou seja, cada falha possui um terceiro nível associado a ela, com os critérios severidade, ocorrência e detecção; estes, por sua vez, apresentam cinco índices associados a eles.

3.1 Determinação dos pesos por meio do AHP

Após a definição da meta e da estrutura hierárquica, foram elaboradas matrizes de comparação pareada a fim de determinar os vetores de desempenho, assim como obter uma medição absoluta (*ratings*) dos níveis. Para isso, foram utilizadas planilhas do Excel para formar

as matrizes de julgamento, com base na Escala Fundamental de Saaty. Esse arquivo foi enviado via *e-mail* para 15 respondentes da organização estudada, entre os respondentes estão técnicos e gerentes da área de manutenção.

Antes de enviar o *e-mail* foi realizada uma reunião com o responsável pelo gerenciamento da manutenção das praças de pedágio e definiram-se quais seriam os respondentes dos questionários. Após a definição uma nova reunião foi realizada, dessa vez com todos os funcionários que responderiam ao questionário para que este fosse apresentado e explicado.

A primeira matriz do questionário teve por objetivo fazer uma comparação pareada das falhas, retornando os valores exibidos na Tabela 2. Verificou-se que a falha que recebeu maior importância foi a Tensão Elétrica (F3), com uma pontuação de 0,24866 enquanto a falha Vibração (F2) foi a de menor importância obtendo um peso de 0,08275.

Tabela 2 – Peso das falhas

Falha	Categoria	Peso
Tensão Elétrica	F3	0,249
Impacto	F4	0,240
Sujeira	F1	0,154
Dilatação	F5	0,138
Desgaste Mecânico	F6	0,137
Vibração	F2	0,083

Fonte: Resultados da pesquisa.

Já a segunda matriz (Tabela 3) foi elaborada a fim de comparar, par a par, os critérios do FMEA. A Severidade foi apontada pelos entrevistados como o mais importante dos critérios, seguida da Ocorrência, sendo o critério de Detecção o que recebeu menor pontuação.

Tabela 3 – Peso dos critérios do FMEA

Critério	Peso
Severidade	0,470
Ocorrência	0,454
Detecção	0,075

Fonte: Resultados da pesquisa.

Vale salientar que não foi elaborada a matriz pareada para a determinação dos pesos do nível 4, pois foram adotados os índices definidos por Stamatis [1995]. Entretanto, esses valores devem ser normalizados em uma mesma escala para que possam ser agrupados e gerar um índice final. Para Lima [2007], no processo de normalização, um dos aspectos críticos desta etapa é a seleção dos pontos de controle utilizados para calibrar a função para critérios e realidades particulares.

A normalização foi realizada por meio de funções *fuzzy* lineares, utilizadas para orientar a variação entre o ponto mínimo e o valor máximo (entre 0 e 1). Para determinar o ponto mínimo (zero) foi utilizado 25% a menos do menor valor dos índices e para o ponto máximo (um) foi utilizado 25% a mais do valor do índice mais elevado. Os pontos de correspondentes de cada índice estão apresentados na Tabela 4.

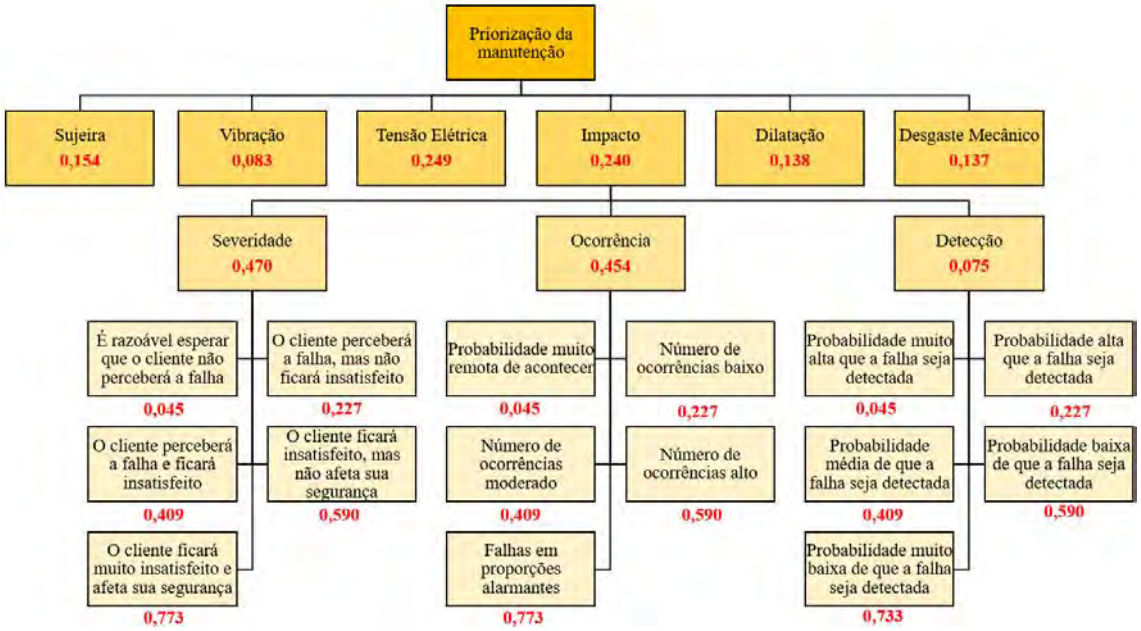
Tabela 4 – Pontos de controle da função *fuzzy*

Índice	Ponto correspondente
1	0,045
2	0,227
3	0,409
4	0,590
5	0,773

Fonte: Resultados da pesquisa.

Dessa maneira, a estrutura hierárquica, englobando as falhas identificadas, os critérios do FMEA, bem como o peso de cada um dos níveis pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura hierárquica do AHP com seus respectivos pesos



Fonte: Resultados da pesquisa.

5. Conclusão

O objetivo desta pesquisa foi elaborar uma estrutura hierárquica, através do método AHP combinado com o FMEA, para a priorização da manutenção de equipamentos eletromecânicos de uma praça de pedágio. Por meio de um estudo de caso em uma concessionária do sistema de rodovias foi possível elaborar tal estrutura, bem como estabelecer os pesos de cada nível.

Para determinar as falhas potenciais que formam o segundo nível da estrutura hierárquica, sendo o primeiro nível o objetivo principal ou foco, foi realizado um *brainstorming* com os responsáveis da área de manutenção onde seis falhas foram apontadas: Sujeira, Vibração, Tensão Elétrica, Impacto, Dilatação e Desgaste Mecânico. Na comparação par a par do método AHP, a falha Tensão Elétrica ganhou o maior peso, 0,249. Como a maioria dos equipamentos utilizados na praça de pedágio são elétricos qualquer variação na tensão elétrica compromete o pleno funcionamento das atividades, podendo até paralisar a cabine de cobrança, por isso é importante investir em equipamentos que estabilizam a corrente elétrica e *nobreaks* para que caso ocorra uma queda no fornecimento de energia os equipamentos ainda funcionem por um período.

Já a falha Impacto ocupou a segunda posição de importância, com um peso 0,083. Devido à localização do equipamento na praça não tem como criar proteções ou barreiras para impossibilitar que veículos colidam com o equipamento e o danifiquem. Além disso, alguns equipamentos sofrem impacto no próprio funcionamento, que é o caso da cancela, que no próprio movimento, levantar e baixar, gera impacto.

Para o terceiro nível foram utilizados os critérios definidos no FMEA: Ocorrência, Severidade e Detecção. Na análise par a par realizada pelos responsáveis da área, a Severidade ganhou o maior peso (0,470), já a detecção teve a menor representatividade (0,075). Quanto mais severo o problema, maior a possibilidade de ter que fechar a cabine de arrecadação para o concerto. O fechamento da via é algo delicado para a praça de pedágio uma vez que quando isso ocorre ela tem uma queda na sua capacidade de atendimento e isso em horários de pico pode comprometer o nível de serviço prestado.

Por fim, para o quarto nível da hierarquia, foi determinado que a estimativa da Ocorrência, Severidade e Detecção, seria dada através da escala *Likert*, com uma pontuação variando de 1 a 5. Essa escala precisou ser normalizada através da função *fuzzy* para obter uma mesma escala para gerar um índice final.

Dessa maneira, o objetivo proposto foi alcançado com a determinação de uma hierarquia de priorização da manutenção. A utilização de critérios já consagrados no que diz respeito à análise de falhas mostrou ser útil no momento de classificar os equipamentos, já que os critérios definidos levam em consideração a visão do cliente, as consequências da falha, bem como a frequência com que a falha ocorre.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Referências
Ayag, Z. (2005). A Fuzzy AHP-based Simulation Approach to Concept Evaluation in a NPD Environment, IIE Transactions, v. 37, pp. 827-842.
Ayyub, B. M. (2003). Risk analysis in engineering and economics. Estados Unidos: CRC Press Company, 568p.
Ben-Daya, M. and Abdul Raouf (1996). A revised failure mode and effects analysis model, International Journal Qual. Reliab. Manag., v. 13, n. 1, p. 43-47.
Ben-Daya, M. (2000). Maintenance, modeling, and optimization. Boston: Kluwer Academic Publisher.
Bernasconi, M., Choirat, C. e Seri, R. (2010). The analytic hierarchy process and the theory of measurement. Management Science, 56, 4, 699-711.
Bornia, Antonio Cezar; Wernke, Rodney. (2001). A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. Revista Contabilidade & Finanças. FIPECAPI – FEA – USP. v.14, n. 25, p. 60-71.
Bowles, J. and Peláez, C. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis, Reliab. Eng. Syst. Saf., v. 50, n. 2, p. 203-213.
Cabral, J. (2009). Gestão da Manutenção de Equipamentos, Instalações e Edifícios. Lisboa: LIDEL.
Camci, F. (2009). System Maintenance Scheduling with prognostics information using genetic algorithm. IEEE Transactions on, v. 58, n. 3, p. 539-552.
Colin, E. C. (2007). Pesquisa Operacional: 170 aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas. Rio de Janeiro LTC.
Costa, H. (2002). Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. Niterói: H.G.C.
Djurdjanovic, D., Yang, J., Qiu, H., Lee, J. e Ni, J. (2003). Web-enable remote spindle monitoring and prognostics. Proc. Of 2 International CIRP Conference on Reconfigurable systems, Paper No. D20.
Dong, Y., Xu, Y., Li, H. e Dai, M. (2008). A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. European Journal of Operational Research, 186, 1, 229-242.
Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R., Anders, G., Asgarpoor, S., Billinton, R., Chowdhury, N., Dialynas, E., Fipper, M., Fletcher, R., Grigg, C., McCalley, J., Meliopoulos, S., Mielnik, T., Nitu, P.; Rau, N., Reppen, N., Salvaderi, L., Schneider, A. e Singh, C. (2001). The present status of maintenance strategies and impact of maintenance on reability. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Toronto, v. 53, n. 2, p. 431-436.
Evans Junior, F. (1962). Maintenance supervisor's handbook. Houston: TX: Gulf Publishing.
Frank, A. G., Pedrini, D. C., Echeveste, M. E. e Ribeiro, J. L. D. (2014). Integração do QFD e da FMEA por meio de uma sistemática para tomada de decisões no processo de desenvolvimento de produtos. Production, v. 24, n. 2, p.295-310.
Garcia, P. A. de A. (2013). Uma abordagem via análise envoltória de dados para o estabelecimento de melhorias em segurança baseadas na FMEA. Gestão da Produção, v. 20, n. 1, p.87-97.

Gomes, L. e Freitas Junior, A. (2000). A Importância do Apoio Multicritério na Decisão na Formação do Administrador. Revista ANGRAD, v.1, n. 1.
Ishizaka, A. e Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. Expert Systems with Applications, v. 38, n. 11, p. 14336-14345.
Jiang, W., Xie, C., Wei, B. e Zhou, D. (2016). A modified method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of aircraft turbine rotor blades. Advances in Mechanical Engineering, v. 8, n. 4, p.1-16.
Kardec, A.; Carvalho, C. (2002). Gestão estratégica e terceirização. ABRAMAN. Rio de Janeiro: Qualitymark.
Li, F. e Brown, R. (2004). A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability. IEEE Transactions on Power Delivery, Toronto, v. 19, n. 1, p. 439-441.
Lima, J. P. (2007). Modelo de Decisão para a Priorização de Vias Candidatas às Atividades de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos.
Mandal, S. e Maiti, J. (2014). Risk analysis using FMEA: fuzzy similarity value and possibility theory based approach. Expert Systems with Applications, v. 41, p.3527-3537.
Marçal, R. (2005). Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa, v. 1, n. 21, p. 87-96.
Moran, D., McVittie, A., Allcroft, D. J. e Elston, D. (2007). Quantifying public preferences for agri-environmental policy in Scotland: A comparison of methods. Ecological Economics, 63, 1, 42-53.
Moubray, J. (1997). Reliability – Centered Maintenance, Industrial Press.
Saaty, T. (1977). Scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, v. 15, p. 234-281.
Saaty, T. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, v. 48, p. 9-26.
Saaty, T. (2000). Decision making for leaders. Pitts burg, USA: WS. Publications.
Shikari, B., Sadiwala, C. e Dwivedi, R. (2004). Automation in conditional based maintenance using vibration analysis. Bhopal: Department of Mechanical Engineering, Maulana Azad National Institute of Technology.
Stamatis, D. H. (1995). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. Wisconsin: ASQ Quality Press, p. 494.
Swait, J. e Adamowicz, W. (2001). The influence of task complexity on consumer choice: a latent class model of decision strategy switching. Journal of Consumer Research, 28, 1, 135-148.
Tan, W. e Huo, H. (2005). A generic neurofuzzy model-based approach for detecting faults in induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Raleigh, v. 52, n. 5, p. 1420-1427.
Thomas, H. (2006). Seleção de Empregados em Indústria de Petróleo: Uma Análise pelo Método AHP. Dissertação de Mestrado Profissionalizante. Faculdades IBMEC, Rio de Janeiro, RJ.
Tinós, R. (2005). Detecção e diagnóstico de falhas em robôs manipuladores via redes neurais artificiais. 1999. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo.
Ullah, ASM S. (2015). Creation and implementation of process FMEA with focus on risk reduction for packaging process. Culminating Projects in Mechanical and Manufacturing Engineering, St. Cloud State University, Paper 9.
Vivo, L., Derrico, P., Tomaiuolo, D., Capussotto, C. e Reali, A. (2004). Evaluating alternative service contracts for medical equipment. Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, v. 5, p. 3485-3488.
Webster, J. e Gale, T. (2006). Encyclopedia of medical devices and instrumentation, 2 ed., v, 3. Hoboken N. J.: John Wiley & Sons Inc..
Yan, J. e Lee, J. (2005). Degradation assessment and fault modes classification using logistic regression. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Evanston, v. 127, n. 4, p. 912-914.
Zahedi, F. (1987) A utility approach to the analytic hierarchy process. Mathematical Modelling, 9, 3, 387-395.