

Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA

Annibal Parracho Sant'Anna¹, annibal.parracho@gmail.com

Roberto Paulo da Silva Pinto Junior², robertjr@furnas.com.br

¹ Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de Engenharia de Produção
Niterói, RJ, Brasil

² Universidade Federal Fluminense (UFF), Doutorado em Engenharia de Produção
Niterói, RJ, Brasil

*Recebido: Novembro, 2010 / Aceito: Dezembro, 2010

RESUMO

Este artigo trata da análise das falhas dos isoladores utilizados nas linhas de transmissão de energia elétrica. Esta análise emprega a metodologia de Análise dos Modos e Efeitos de Falhas - FMEA. A modelagem pela FMEA ajudou a aumentar a confiabilidade do sistema de transmissão de energia ao ser aplicada ao estudo de falhas de um de seus principais equipamentos, o isolador. A construção dos índices de risco através da composição probabilística tornou mais simples e segura a utilização da ferramenta, conduzindo a resultados satisfatórios quanto à priorização dos problemas causadores de falhas nos isoladores. Este aspecto da modelagem, o emprego da composição probabilística na determinação do risco, é uma contribuição inteiramente nova do artigo.

Palavras-Chave: Composição Probabilística. FMEA. Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

As falhas em isoladores de linhas de transmissão resultam em indisponibilidade de equipamentos, provocando grandes perdas de receita para as empresas fornecedoras de energia elétrica, inclusive devido a multas que lhes são aplicadas. Isto está motivando estudos que visam ao aumento da confiabilidade dos isoladores utilizados.

A norma QS 9000 (Chrysler Corp. et al., 1998) especifica a metodologia de Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA) como um dos documentos necessários para um fornecedor submeter uma peça ou produto. Este artigo trata da análise das falhas dos isoladores de uma das maiores empresas de transmissão de energia elétrica do Brasil através da FMEA com o intuito de descobrir e evitar as causas de falhas nos isoladores.

A principal característica deste trabalho é o emprego da composição probabilística na determinação do risco associado a cada evento considerado, em substituição à multiplicação direta dos valores atribuídos segundo cada critério. A transformação desses valores em probabilidades de atingir o valor máximo, além de facilitar a comparação das

prioridades calculadas, permitiu, no caso estudado, em que a preferência em cada um dos diferentes atributos considerados na FMEA merecia receber diferente importância, uma ordenação mais adequada que a resultante dos números de prioridade de risco calculados diretamente.

A Seção seguinte descreve resumidamente as principais características da FMEA. A Seção 3 enumera as etapas seguidas na aplicação dessa metodologia. A Seção 4 apresenta os critérios empregados no cálculo do risco na FMEA e a forma de avaliação segundo cada um desses critérios desenvolvida para o caso presente seguindo a forma tipicamente empregada nessa metodologia, mediante classificação em cinco níveis. A Seção 5 apresenta a metodologia da composição probabilística e discute a sua aplicação à FMEA. A Seção 6 descreve a aplicação da metodologia proposta ao caso em tela. A seção 7 apresenta as conclusões extraídas dessa aplicação.

2. ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS

A FMEA é uma ferramenta para a elevação da confiabilidade empregada a sucessivas décadas. O objetivo básico da FMEA é prevenir possíveis falhas antes que se produzam.

Esta dimensão da qualidade, a confiabilidade, tem-se tornado cada vez mais importante para os consumidores, pois, a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada pelo serviço de assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, causa, no mínimo, uma insatisfação ao consumidor ao privá-lo do uso do produto por determinado tempo. E, no caso da indústria da energia elétrica, a falha em determinados equipamentos pode acarretar no pagamento de multas de valores elevados.

Uma vez realizada uma análise para um produto ou processo qualquer, esta deve ser revisada sempre que ocorrerem alterações neste produto ou processo específico. Além disso, mesmo que não haja alterações deve-se regularmente revisar a análise confrontando as falhas potenciais imaginadas com as que realmente vêm ocorrendo no dia-a-dia do processo e uso do produto, de forma a permitir a incorporação à análise de falhas não previstas inicialmente, bem como a reavaliação, com base em dados objetivos, das falhas já previstas

A FMEA pode ser aplicada tanto no desenvolvimento do projeto do produto como na modelagem do processo de fabricação. É aplicada preferencialmente antes de se iniciar a fabricação ou montagem, mas, pode ser aplicada a processos em andamento, em um movimento cíclico de elevação da qualidade ou em uma única aplicação. Em qualquer um desses casos, o princípio da metodologia é o mesmo. As etapas previstas para a análise e a maneira de sua realização permanecem essencialmente as mesmas, diferenciando-se somente quanto ao objetivo.

A aplicação da FMEA envolve o registro das possíveis falhas e a avaliação da sua gravidade, frequência e detectabilidade de forma objetiva em um documento, o formulário da FMEA, que constitui um poderoso instrumento, não só para o fim precípuo da análise, a eliminação de falhas, mas, também, para a geração do conhecimento.

A aplicação da FMEA pode proporcionar para a empresa:

- I. uma forma sistemática de catalogar informações sobre as falhas dos produtos ou processos;
- II. melhor conhecimento dos problemas nos produtos ou processos;
- III. ações de melhoria no projeto do produto ou processo, baseadas em dados e devidamente monitoradas (melhoria contínua);
- IV. diminuição de custos por meio da prevenção de ocorrência de falhas;

- V. o benefício de incorporar dentro da organização a atitude de prevenção de falhas, a atitude de cooperação e trabalho em equipe e a preocupação com a satisfação dos clientes.

Maiores detalhes e avaliações da FMEA podem ser encontrados em ASME (2001), Belzer (2001) ou Lacity *et al.* (2008).

3. ETAPAS NA APLICAÇÃO DA FMEA

A FMEA se inicia, basicamente, com a formação de um grupo de pessoas que identificam para o produto ou processo em questão suas funções, os tipos de falhas que podem ocorrer, os efeitos e as possíveis causas desta falha. Em seguida são avaliados os riscos de cada causa de falha por meio de índices. Com base nesta avaliação, são tomadas as ações necessárias para diminuir estes riscos através da eliminação das causas de falha mais importantes, cujo índice de prioridade supera um patamar pré-determinado, aumentando-se desta forma a confiabilidade do produto ou processo.

De uma forma mais esquemática, podem ser identificadas quatro etapas na execução da FMEA: planejamento, análise das potenciais falhas, avaliação dos riscos e melhoria. Cada uma destas etapas é resumidamente caracterizada a seguir.

3.1. PLANEJAMENTO

Esta fase é realizada pelo responsável pela aplicação da metodologia e compreende:

- I. descrição dos objetivos e abrangência da análise - em que se tem como resultado a identificação precisa de qual ou quais produtos ou processos serão analisados;
- II. formação dos grupos de trabalho - em que se definem os integrantes do grupo, que deve ser preferencialmente pequeno (formado por 4 a 6 pessoas) e multidisciplinar (contando com pessoas de diversas áreas como qualidade, desenvolvimento e produção);
- III. planejamento das reuniões - as reuniões devem ser agendadas com antecedência e com o consentimento de todos os participantes para evitar paralisações;
- IV. preparação da documentação - o formulário para a descrição dos modos e efeitos de falha, sua avaliação e caracterização das possíveis ações de melhoria a eles associados deve ser estudado antes de se iniciar a análise propriamente dita.

3.2. ANÁLISE DAS FALHAS POTENCIAIS

Esta fase é realizada pelo grupo de trabalho que discute as falhas e preenche a parte inicial do formulário FMEA descrevendo os seguintes elementos:

- I. função e característica do produto;
- II. tipo de falha potencial para cada função;
- III. efeito do tipo de falha;
- IV. causa possível de falha;
- V. controles atuais.

3.3. AVALIAÇÃO DOS RISCOS

Nesta fase são definidos pelo grupo os índices de severidade (S), ocorrência (O) e detectabilidade (D) para cada causa de falha, de acordo com critérios previamente definidos. O primeiro mede a severidade ou gravidade que se atribui aos efeitos da eventual ocorrência da falha. O segundo mede a probabilidade de ocorrência, isto é, a frequência com que se pode esperar que ocorra a causa da falha. O terceiro cresce com a dificuldade

de detectar-se a tempo a falha. Estes índices são empregados, na abordagem tradicional, para calcular os índices de prioridade de risco (R), por meio da multiplicação dos seus três valores.

A identificação desses níveis é, em princípio, realizada em reunião do grupo de analistas. O desenvolvimento dos recursos de comunicação nos últimos anos favorece, entretanto, a realização de avaliações isoladas que podem ser revistas em etapas sucessivas.

Quando o grupo estiver avaliando um índice, os demais não podem ser levados em conta, ou seja, a avaliação de cada índice é independente. Por exemplo, se estamos avaliando o índice de severidade de uma determinada causa cujo efeito é significativo, não podemos colocar um valor mais baixo para este índice somente porque a probabilidade de detecção seja alta.

3.4. MELHORIA

Nesta fase o grupo lista todas as ações que podem ser realizadas para diminuir os riscos. Estas medidas podem ser:

- I. medidas de prevenção total ao tipo de falha;
- II. medidas de prevenção total de uma causa de falha;
- III. medidas que dificultam a ocorrência de falhas;
- IV. medidas que limitem o efeito do tipo de falha;
- V. medidas que aumentam a probabilidade de detecção do tipo ou da causa de falha.

Estas medidas são analisadas quanto a sua viabilidade, sendo então definidas as que poderão implantadas. Uma forma de se fazer o controle do resultado destas medidas é pelo próprio formulário FMEA, por meio de colunas onde ficam registradas as medidas recomendadas pelo grupo, o nome do responsável e o prazo. Posteriormente devem ser registradas as medidas realmente tomadas, para que se proceda a nova avaliação dos riscos.

4. ÍNDICES ESPECÍFICOS

Conforme exposto acima, na etapa de avaliação dos riscos, a prioridade atribuída a cada falha é quantificada na FMEA através de um índice derivado de valores atribuídos a Segundo três critérios de avaliação específicos, de severidade, ocorrência e indetectabilidade da falha.

Segundo cada um desses critérios, as falhas foram classificadas em cinco níveis, com identificação apropriada. As tabelas abaixo apresentam descrições para os cinco níveis em que as falhas foram classificadas em cada um dos três aspectos no presente estudo.

A prévia descrição dos níveis com base na realidade do caso estudado é uma das recomendações mais importantes para a FMEA (Pfeifer, 2002; Stamatis, 2003). A FMEA foi criada com escalas de 11 níveis (U.S. Military, 1949, 1980). Com o tempo, as escalas de 5 níveis como as aqui apresentadas têm sido mais usadas. Para detalhamento da formação de escalas de 5 níveis, ver British Standards Institute (1991) e Ben-Daya e Raouf (1996). Para aplicações recentes no Brasil de escalas similares às aqui empregadas ver Rosa e Garrafa (2009) e Nogueira e Peres (2010).

Tabela 1. Níveis de Severidade

Índice	Severidade	<i>Critério</i>
1	Remota	<i>O cliente mal percebe que a falha ocorre.</i>
2	Pequena	<i>Leve deterioração no desempenho e pequeno descontentamento do cliente.</i>
3	Moderada	<i>Queda significativa no desempenho e na satisfação do cliente.</i>
4	Alta	<i>Sistema deixa de funcionar.</i>
5	Muito Alta	<i>Sistema deixa de funcionar e com isso afeta a segurança.</i>

Tabela 2. Níveis de Ocorrência

Índice	Ocorrência	<i>Proporção aproximada</i>
1	Remota	<i>1:1.000.000</i>
2	Pequena	<i>1:4.000</i>
3	Moderada	<i>1:400</i>
4	Alta	<i>1:40</i>
5	Muito Alta	<i>1:8</i>

Tabela 3. Níveis de Indetectabilidade

Índice	Nível	<i>Critério</i>
1	Remota	<i>Certamente será detectado.</i>
2	Pequena	<i>Grande probabilidade de ser detectado.</i>
3	Moderada	<i>Considerável probabilidade de ser detectado.</i>
4	Alta	<i>Provavelmente não será detectado.</i>
5	Muito Alta	<i>Certamente não será detectado.</i>

A identificação dos níveis de cada critério e a classificação dos riscos nos níveis da escala tem um papel fundamental na FMEA. O insucesso na aplicação da metodologia pode ser, frequentemente, atribuído a erros na construção da escala.

5. COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA

As críticas mais importantes que a FMEA tem recebido decorrem de que ao combinar as avaliações do risco segundo cada critério não se leva em conta a variabilidade observada em cada critério nem a incerteza inerente a essas avaliações segundo cada critério. Assim, por exemplo, quando todas as causas são avaliadas segundo um dos critérios em níveis muito baixos e segundo o outro critério em níveis muito altos, diferenças na avaliação segundo o primeiro critério resultarão em diferenças maiores no índice final do que diferenças na avaliação segundo o outro. Isto porque a elevação de um dos fatores de 1 para 2 tem efeito muito maior no produto que a elevação de 4 para 5.

Modificações na FMEA clássica têm sido propostas para levar em conta a incerteza em cada critério. Estas propostas têm levado, em geral, a resultados insatisfatórios que se podem atribuir à forma como orientam a composição dos índices específicos, não à forma como levam em conta a incerteza no cálculo desses índices específicos (Jin, 2000; Lee, 2001).

Uma alternativa frequentemente explorada é o emprego da lógica nebulosa ao compor os índices segundo cada critério, que, por sua vez, podem ser medidos ou não por números nebulosos (Bowles e Pelaez, 1996; Pillay e Wang, 2003). Esta forma de composição resulta em priorizar valores máximos ou mínimos, desprezando os valores intermediários. O uso do produto, ao contrário, oferece maior robustez ao resultado final da FMEA clássica.

Outras modificações propostas consistem em enfrentar a diferente variabilidade entre os três componentes do índice, usando valores padronizados dividindo pela amplitude observada (Tay e Lim, 2006; Keskin e Ozkan, 2009). Isto resulta em desprezar a informação provida por essa variabilidade, permitindo distorções do resultado final ainda mais fortes e difíceis de identificar que as resultantes da simples multiplicação das avaliações originais.

A incerteza é comum em problemas que envolvem preferências. Espera-se que os dados disponíveis estejam sujeitos a oscilações em seus valores, dificultando o tratamento dos mesmos de forma fidedigna. Quando as preferências, como no caso da atribuição de prioridades a possíveis falhas, não provêm de processos unificados, e sim de sistemas de valores pessoais, o tratamento da incerteza se torna ainda mais árduo.

Em um contexto mais amplo, diversos métodos já foram criados para reduzir a imprecisão inerente às preferências iniciais, MACBETH (Bana e Costa e Vasnick, 1995), ELECTRE (Roy, 1968), AHP (Saaty, 1980), são alguns exemplos. Uma abordagem que propunha a substituição de medidas determinísticas por medidas nebulosas foi desenvolvida por Chen e Hwang (1992), fato que também pode ser observado em Lootsma (1993) e Slowinski (1998).

A prioridade atribuída a uma alternativa é dada naturalmente pela probabilidade de ela vir a ser a preferida. Mas, a formulação das preferências não surge, de uma vez, em termos probabilísticos. Para cada critério, há uma forma mais natural de explicitar a posição de cada alternativa avaliada, às vezes em termos quantitativos, de peso, custo, velocidade, etc, e outras vezes em termos da linguagem comum, tais como pequena, moderada ou grande probabilidade de escolha. As preferências formuladas em termos lingüísticos prestam-se naturalmente a determinação através de funções de pertinência.

A idéia-chave da aleatorização consiste em tratar cada valor observado como representando uma posição em torno da qual o atributo medido varia aleatoriamente. Há diferentes alternativas para modelar essa variabilidade estatística. A medida inicial de preferência fornece um ponto de referência para a média, a mediana ou a moda da distribuição de probabilidades. Hipóteses de indiferença podem facilitar a determinação dos outros parâmetros e simplificar posterior interpretação dos resultados. Sant'Anna (2002) lista hipóteses, tais como independência entre as perturbações afetando as determinações

das preferências por diferentes alternativas, simetria em torno da média e parâmetros de dispersão constantes, que permitem, junto com as médias e a forma funcional, identificar completamente as distribuições.

A determinação da amplitude completa a modelagem, para as distribuições paramétricas classicamente empregadas na modelagem de erros de medida, e estimativas para a amplitude podem ser derivadas das medidas iniciais. A amplitude deve ser grande o suficiente para permitir troca de posição entre as unidades de produção que estão sendo comparadas. Assim, se duas unidades de produção aparecem no conjunto examinado, a probabilidade de inversão de suas posições não deve ser nula. Mas, deve ser pequena se as unidades de produção são aquelas com a melhor e a pior avaliação.

Sant'Anna (2004) adota para a medição das preferências iniciais segundo cada critério uma escala de Likert (1932), de cinco posições lingüísticas, formuladas através de variantes dos termos “muito pequena”, “pequena”, “moderada”, “grande” e “muito grande”, ou “ótima”, “boa”, “regular”, “má” e “péssima”. Alternativamente a esta regra geral, pode-se usar uma escala de nove posições com a inclusão de duas posições mais extremas e duas posições ladeando a posição central. A conversão da escala verbal para a escala numérica se realiza associando a cada uma dessas posições um número, de 1 a 5 ou de 1 a 9. Por exemplo, ótimo $\leftrightarrow$ 1, bom $\leftrightarrow$ 3, sofrível $\leftrightarrow$ 5, ruim $\leftrightarrow$ 7 e péssimo $\leftrightarrow$ 9, com os valores intermediários 2, 4, 6 e 8 reservados para situações de dúvida.

Neste trabalho é usada a distribuição triangular com extremos 0 e 6 e moda nos valores atribuídos em uma escala de Likert de 5 pontos como descrito na Seção anterior. Esta distribuição é empregada em situações como a do presente estudo na construção das funções de pertinência dos conjuntos nebulosos (Zadeh, 1965).

Para compor, com as probabilidades de maximizar a preferência segundo cada critério uma medida única de preferência global, basta considerar essas probabilidades como probabilidades condicionais na escolha dos respectivos critérios e, somando os produtos das mesmas pelas probabilidades de cada critério ser o preferido, calcular a probabilidade total de cada unidade de produção ser a de maior preferência.

A dificuldade prática em validar esta medida advém apenas da dificuldade de comparar os critérios. Se for possível atribuir a cada critério uma medida de preferência, por exemplo, através da sua ordenação com empates admitidos, podemos obter os pesos desejados através do cálculo das probabilidades de maximizar as preferências, tratando os critérios como opções quaisquer entre as quais se procede a uma escolha.

Em vez do uso de uma probabilidade global única, Sant'Anna (2004) sugere calcular um conjunto de probabilidades de maximização conjunta da preferência. Cada uma dessas medidas globais decorre de um enfoque diferente quanto à combinação das probabilidades de maximizar ou minimizar as preferências segundo os vários critérios. Esses enfoques podem ser caracterizados a partir da escolha de posições extremas em dois eixos de orientação básica identificados como “otimista-pessimista” e “progressista-conservador”, respectivamente.

No eixo “progressista-conservador”, o decisor no extremo progressista presta atenção às probabilidades de maximizar a preferência segundo os critérios considerados. Já no extremo conservador, as probabilidades que interessam são as de não minimizar a preferência. No eixo “otimista-pessimista”, o extremo otimista consiste em considerar satisfatório atender a pelo menos um critério. Todos os critérios são levados em conta, mas calcula-se a probabilidade de maximizar (ou não minimizar) a preferência segundo pelo menos um qualquer dentre os múltiplos critérios. Já no extremo pessimista a preferência vai para as opções que não deixem de satisfazer nenhum critério: calcula-se a probabilidade de maximizar (ou não minimizar) a preferência segundo todos os critérios.

6. APLICAÇÃO A ISOLADORES

A seguir é apresentada a Tabela 4, montada com os parâmetros da metodologia da FMEA para os defeitos encontrados nos isoladores de uma das maiores empresas brasileiras de transmissão de energia elétrica. Os valores dos índices da FMEA são os resultados das classificações nos níveis das tabelas 1, 2 e 3 acima.

Tabela 4. Classificação das Falhas em Isoladores

Modo Potencial de Falha	Efeito	S	Causas	O	Tipo	Controle e Prevenção	Controle de Detecção	D	Ação Recomendada
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Erro na especificação de acessórios	2	Dimensional	Auditoria nos fornecedores	Ensaio dimensional	5	Realizar os ensaios previstos
Falha elétrica	curto-circuito	5	Erro de projeto	1	Elétricos	Desenvolvimento de novos Fornecedores	Ensaio elétrico	5	Realizar os ensaios previstos
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Erro de projeto	2	Dimensional	Auditoria nos fornecedores	Ensaio dimensional	5	Realizar os ensaios previstos
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha na composição química do material	3	Elétricos	Auditoria nos fornecedores	Ensaio elétrico	4	Desenvolver novos ensaios
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Erro de material	2	Dimensional	Auditoria nos subfornecedores	Ensaio dimensional	5	Realizar os ensaios previstos
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de tempera	3	Elétricos	Auditoria nos fornecedores	Ensaio elétrico	4	Realizar os ensaios previstos
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Falha na pintura	2	Visual	Desenvolvimento de novos Fornecedores	Ensaio dimensional	2	Realizar os ensaios previstos
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de tempera	3	Mecânicos	Auditoria nos fornecedores	Ensaio mecânico	4	Realizar os ensaios previstos
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de tempera	3	Ensaio Mecânicos	Auditoria nos fornecedores	Ensaio mecânico	4	Realizar os ensaios previstos
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de tempera	3	Ensaio mecânicos	Auditoria nos fornecedores	Ensaio mecânico	4	Realizar os ensaios previstos
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Erro de projeto	2	Dimensional	Auditoria nos fornecedores	Ensaio dimensional	5	Realizar os ensaios previstos
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Erro de projeto	2	Dimensional	Auditoria nos subfornecedores	Ensaio dimensional	5	Realizar os ensaios previstos
Corrosão	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de galvanização	1	Ensaio Químicos	Desenvolvimento de novos Fornecedores	Ensaio Químico	3	Desenvolver novos ensaios
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Falha no processo de galvanização	2	Visual	Desenvolvimento de novos Fornecedores	Ensaio dimensional	2	Realizar os ensaios previstos
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de tempera	3	Elétricos	Auditoria nos fornecedores	Ensaio elétrico	4	Realizar os ensaios previstos
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Falha no processo de tempera	2	Visual / Dimensional	Auditoria nos fornecedores	Ensaio dimensional	4	Realizar os ensaios previstos
Falha nas dimensões	não conexão do equipamento	4	Falha no processo de tempera	2	Dimensional / Outros	Auditoria nos fornecedores	Ensaio dimensional	4	Realizar os ensaios previstos
Falha na documentação	Utilização errada do equipamento	3	Troca de documentação	1	Documentação	Auditoria nos fornecedores	Verificação da documentação	4	Auditar a documentação
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	5	Falha no processo de tempera	3	Produto	Auditoria nos fornecedores	Ensaio mecânico	4	Realizar os ensaios previstos

A escala utilizada na identificação dos níveis dos índices específicos possui cinco posições com os valores numéricos de 1 a 5. Na transformação em probabilidades esses valores são considerados a moda de uma distribuição triangular com extremos 0 e 6. Para os mesmos valores dos índices de severidade, ocorrência e detectabilidade foi feito o cálculo dos vetores de probabilidade de preferência para distribuições triangulares e, em seguida o cálculo da prioridade global. Esses valores são apresentados na Tabela 5.

No formulário típico da FMEA, uma coluna encabeçada pela letra “R” apresenta o valor do índice de prioridade de risco obtido para cada linha da tabela. Ele é obtido multiplicando os valores dos três níveis de prioridade referentes a severidade, ocorrência e detectabilidade. Para facilidade de comparação, este valor será apresentado na Tabela 5, junto com os resultados da composição probabilística.

Tabela 5. Tabela da Composição Probabilística

Modo Potencial de Falha	Efeito	R	S	O	D	P
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	40	3,57%	4,79%	8,54%	0,0146%
Falha elétrica	curto-circuito	25	7,28%	3,80%	8,54%	0,0236%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	40	3,57%	4,79%	8,54%	0,0146%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	40	3,57%	4,79%	8,54%	0,0146%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	16	3,57%	4,79%	2,05%	0,0035%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	40	3,57%	4,79%	8,54%	0,0146%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	40	3,57%	4,79%	8,54%	0,0146%
Corrosão	Queda da Linha de Transmissão	15	7,28%	3,80%	2,75%	0,0076%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	16	3,57%	4,79%	2,05%	0,0035%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	32	3,57%	4,79%	4,19%	0,0072%
Falha nas dimensões	Não conexão do equipamento	32	3,57%	4,79%	4,19%	0,0072%
Falha na documentação	Utilização errada do equipamento	12	2,35%	3,80%	4,19%	0,0037%
Quebra por fragilidade	Queda da Linha de Transmissão	60	7,28%	6,50%	4,19%	0,0198%

A coluna encabeçada pela letra “P” apresenta a medida de prioridade produzida pela composição probabilística. Este valor é o resultado da multiplicação das probabilidades de maximizar a prioridade segundo cada um dos critérios, apresentadas nas colunas anteriores. Isto corresponde a assumir um ponto de vista pessimista e conservador na composição probabilística.

A composição empregada na FMEA tem um enfoque pessimista e conservador. Pessimista porque se procura identificar a maior prioridade em todos os três critérios, preferindo as opções que superam as suas concorrentes, mesmo nos critérios em que

apresentem menor prioridade. O enfoque é conservador porque busca opções próximas às fronteiras de maior risco, ou seja, opções que se destacam das demais por atingirem patamares superiores em suas probabilidades de maximizar a proximidade da fronteira de pior desempenho. Pelo ponto de vista pessimista e conservador deseja-se identificar o ponto em que é máximo o risco simultaneamente para os 3 critérios.

Verifica-se da comparação das colunas 'R' e 'P' da Tabela 5 que a falha elétrica, com número de prioridade de risco baixo na coluna 'R', surge como o modo potencial de falha de maior prioridade na coluna 'P'. Isto reflete a importância menor que a distribuição dos valores observados nos níveis de ocorrência atribui a probabilidade de maximização da prioridade segundo este critério. Constatou-se deste modo o poder da composição probabilística de oferecer uma priorização que refletia mais adequadamente a percepção dos especialistas.

7. CONCLUSÃO

A análise aqui desenvolvida permitiu obter uma série de conclusões sobre o emprego da FMEA e sobre a inclusão da composição probabilística na determinação das prioridades entre os modos potenciais de falha. Essas conclusões são enumeradas a seguir.

- 1) A metodologia da FMEA ajudou a aumentar a confiabilidade do sistema de transmissão de energia ao ser aplicada ao estudo de falhas de um de seus principais equipamentos, o isolador.
- 2) A metodologia da FMEA se mostrou um instrumento eficaz ao identificar as ações recomendadas para eliminar os problemas causadores das falhas nos isoladores utilizados, possibilitando a eliminação dos problemas e muitas geradas pelas complicações das falhas dos isoladores.
- 3) A utilização da composição probabilística na determinação das prioridades aperfeiçoou a ferramenta, produzindo resultados mais satisfatórios quanto à priorização dos problemas causadores de falhas nos isoladores que a multiplicação direta dos valores obtidos pela aplicação da escala de Likert a cada critério.
- 4) Com a inclusão do cálculo dos vetores de probabilidade de preferência, a importância de o especialista, ao avaliar segundo um critério, concentrar-se na correta identificação do nível segundo tal critério fica mais facilmente atendida, por se saber que a relação entre os critérios é satisfatoriamente conduzida na etapa seguinte pela composição probabilística.
- 5) O emprego do cálculo dos vetores de probabilidade de preferência ajudou diretamente no aumento da confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica não só por ajudar na identificação das prioridades globais de manutenção, mas, também, por permitir identificar as prioridades de cada modo potencial de falha segundo cada critério isoladamente.

8. AGRADECIMENTOS

Somos profundamente gratos ao editor e aos revisores da revista *Sistemas & Gestão*. Eventuais defeitos que permaneçam são, naturalmente, de plena responsabilidade dos autores.

9. REFERÊNCIAS

ASME Section VIII Division 1 – **American Society for Mechanical Engineering**, 2001.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH. **Investigação Operacional**, v. 15, p. 15-35, 1995.

BELZER, R. B. Getting beyond `grin and bear it` in the practice of risk management. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 72, n. 2, p. 137-148, 2001.

BEN-DAYA, M.; RAOUF, A. A revised failure mode and effect model. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 13, n. 1, p. 43-47, 1996.

BOWLES, C. E.; PELAEZ, J. B. Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. **Information Sciences**, v. 1, n. 88, p. 177-99, 1996.

BRITISH STANDARDS INSTITUTE **BS5760: Reliability of Systems, Equipment and Components – Part 5. Guide to Failures Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)**, 1991.

CHEN, S. J.; HWANG, C. L. **Fuzzy Multiple Attribute Decision Making**, Berlin: Springer-Verlag, 1992.

CHRYSLER CORPORATION; FORD MOTOR COMPANY; GENERAL MOTORS. **Quality Systems Requirements QS 9000**. AIAG: 1998.

JIN, Y. C. Fuzzy modeling of high-dimensional systems: complexity reduction and interpretability improvement, **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 2, n. 8, p. 212-21, 2000.

KESKIN, G. A.; OZKAN, C. An Alternative Evaluation of FMEA: Fuzzy ART Algorithm. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 25, p. 647-661, 2009.

LACITY, M. C.; WILLCOCKS, L. P.; ROTTMAN, J. W. Global outsourcing of back office services: lessons, trends, and enduring challenges. **Strategic Outsourcing: An International Journal**, v. 1, n. 1, p. 13-34, 2008.

LEE, B. H. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis, **Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium**, p. 7-15, 2001.

LIKERT, R. A Technique for the Measurement of Attitudes. **Archives of Psychology**, v. 140, n. 1, p. 1-55, 1932.

LOOTSMA, F. A. Scale sensitivity in the Multiplicative AHP and SMART. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 2, p. 87-110, 1993.

NOGUEIRA, A. C.; PERES, A. P. Comparação entre duas matrizes FMEA aplicadas em Laticínios de Lavras-MG. **Engenharia Ambiental**, v.7, n. 2, p. 178-189, 2010

PFEIFER, T. **Quality Management – Strategies, Methods, Techniques**. Hanser: München, 2002.

PILLAY, A.; WANG, J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning, **Reliability Engineering & System Safety**, v. 1, n. 79, p. 69-85, 2003.

ROSA, L. C.; GARRAFA, M. Análise dos modos de falha e efeitos na otimização dos fatores de produção no cultivo agrícola: subprocesso colheita de canola. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 1, p. 63-73, 2009.

ROY, B. Classement et Choice en presence de points de vue multiple (la methode Electre). **Revue Française d'Automatique Information et Recherche Operationelle**, v. 8, p. 57-75, 1968.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANT'ANNA, A. P. Aleatorização e Composição de Medidas de Preferência. **Pesquisa Operacional**, v. 22, p. 87-103, 2002.

SANT'ANNA, A. P. Uma estrutura para análise da composição de preferências. **Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção**, v. 4, 2004.

SLOWINSKI, R. Fuzzy Sets in Decision Analysis, **Operations Research and Statistics**, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.

STAMATIS, D. H. **Failure Modes and Effects Analysis: FMEA from theory to execution**, Milwaukee: Quality Press, 2nd. Ed., 2003.

TAY, K. M.; LIM, C. P. Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 23, n. 8, p. 1047-1066, 2006.

US MILITARY **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis**, United States Military Procedure MIL-P-1629, 1949.

US MILITARY **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis**, United States Military Procedure MIL-P-1629a, 1980.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

Probabilistic compositon in the computation of the priorities in FMEA

Annibal Parracho Sant`Anna¹, annibal.parracho@gmail.com

Roberto Paulo da Silva Pinto Junior², robertjr@furnas.com.br

¹ Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de Engenharia de Produção
Niterói, RJ, Brasil

² Universidade Federal Fluminense (UFF), Doutorado em Engenharia de Produção
Niterói, RJ, Brasil

*Received: November, 2010 / Accepted: December, 2010

ABSTRACT

This article deals with the analysis of failures in the insulators used in electricity transmission lines. This analysis employs the methodology of Failure Modes and Effects Analysis – FMEA. Applied to the study of failures of one of the major equipment of the transmission lines, the isolator, modeling by FMEA helped to improve the reliability of a power transmission system. The construction of FMEA risk priority numbers by means of probabilistic composition made simpler and safer to use the tool, leading to satisfactory results on the prioritization of the problems causing failures in insulators. This feature, use of the probabilistic composition in determining the risk, is an entirely contribution of the article.

Keywords: Probabilistic Composition. FMEA. Electric Energy
