



AVALIAÇÃO DE RISCO NO APL DE CONFECÇÃO DO AGRESTE DE PERNAMBUCO: UMA ABORDAGEM DA COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA COM BASE NA FMEA

Ramon Swell Gomes Rodrigues Casado

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CAA
Rodovia BR 104, S/N, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru – PE
ramonswell.grc@gmail.com

Lúcio Camara e Silva

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CAA
Rodovia BR 104, S/N, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru – PE
luciocsilva@gmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta uma aplicação da metodologia da Composição Probabilística de Preferências (CPP) a partir do cálculo das prioridades na FMEA, de modo a discutir e demonstrar a eficácia da CPP quanto ao tratamento de incertezas e imprecisões na gestão de riscos. Como instrumento para a realização da CPP, usou-se uma adaptação do código MATLAB proposto por Sant'Anna et al. [2012], o qual foi aplicado sobre parte dos dados de uma pesquisa realizada no APL de confecção do Agreste de Pernambuco. Em decorrência desta análise foi possível mostrar que as inversões nas posições das medidas globais, em comparação com as baseadas apenas nos resultados da FMEA clássica, refletem a capacidade da CPP em estimar objetivamente uma definição mais segura dos cenários de risco, e conseqüentemente, gera uma maior confiabilidade no processo de gerenciamento de riscos.

PALAVRAS CHAVE. Gestão de riscos. FMEA. Composição Probabilística de Preferências.

Tópicos: SE – PO em Serviços. OA – Outras aplicações em PO. MP – Modelos Probabilísticos.

ABSTRACT

This article presents an application of the Probabilistic Composition of Preferences (CPP) methodology based on the FMEA priorities calculation, in order to discuss and demonstrate the effectiveness of CPP in dealing with uncertainties and inaccuracies in risk management. As an instrument for the realization of CPP, was used an adaptation of the MATLAB code proposed by Sant'Anna et al. [2012], which was applied on part of the data of a survey carried out in the APL of confections of the Agreste of Pernambuco. As a result of this analysis it was possible to show that the inversions in the global measures positions, compared to those based only on the classic FMEA results, reflect the CPP's ability to objectively estimate a more secure definition of the risk scenarios and consequently, creates greater reliability in the process of risk management.

KEYWORDS. Risk Management. FMEA. Probabilistic Composition of Preferences.

Paper topics: SE – OR in Services. OA – Other applications in OR. MP – Probabilistic Models.



1. Introdução

As cadeias de suprimentos estão sendo afetadas atualmente por uma série de fatores, como por exemplo a complexidade das ações em nível global, que associada a volatilidade da demanda, a uma busca por maior eficiência e outras ameaças, tem gerado um aumento nas rupturas de suas operações, ocasionando assim uma elevação dos riscos envolvidos [Christopher e Peck 2004; Ponomarov e Holcomb 2009; Wagner e Bode 2006; Zsidisin et al. 2005].

Esse crescimento na interrupção das operações nas cadeias tornou-se uma realidade, na qual nem sempre pode ser evitada e nem pode ser também ignorada [Zsidisin et al. 2005]. Por este modo, essas preocupações motivam o desenvolvimento de mais pesquisas relacionadas a gestão das cadeias de suprimentos.

Neste sentido, o desafio a ser enfrentado parte de determinar uma adequada forma de tratar os cenários críticos, de modo a compreender melhor os fatores de risco e seus possíveis impactos, para que assim possa-se tomar decisões mais assertivas em um ambiente cada vez mais imprevisível e incerto [Fan et al. 2016].

Uma técnica que está sendo considerada como fundamental na análise de riscos, devido a sua capacidade para identificar causas críticas de falhas e predizer sua relevância, tem sido a Análise do Efeito e Modo de Falha (FMEA) [Davoudpour e Sabouri 2012].

A interpretação dessa técnica é geralmente feita através do cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN, acrônimo em inglês para *Risk Priority Number*), que avalia e prioriza os modos de falha (ou risco) em potencial, ou seja, um modo de falha que possua um RPN mais elevado é considerado mais crítico, logo é atribuído um grau de prioridade mais elevado [Gupta et al. 2016].

Sendo que a ampla variedade de aplicações da FMEA revelou – segundo vários autores, como por exemplo, [Cândeia et al. 2014; Carlson 2012; Liu et al. 2013] – a existência de algumas fraquezas e limitações em relação à determinação da priorização dos modos de falha.

Diante de tal realidade, um ponto fundamental que gerou o delineamento desse estudo foi o questionamento a respeito de qual seria um mecanismo adequado para minimizar as interpretações errôneas da técnica da FMEA para geração das prioridades. Logo, o presente artigo tem como objetivo realizar a aplicação da metodologia da Composição Probabilística de Preferências (CPP) a partir do cálculo das prioridades na FMEA, de modo a discutir e demonstrar a eficácia desse método quanto ao tratamento de incertezas e imprecisões na gestão de riscos. Para tanto, será utilizada a Probabilidade Prioritária de Risco (PPR) em substituição ao uso do Número Prioritário de Risco (RPN), conforme proposto em Sant'Anna [2012].

Para tanto, o cenário de aplicação escolhido teve como base o uso de parte do banco de dados de uma pesquisa realizada por Palmeira [2016], a qual buscou avaliar qual era o comportamento de uma amostra de empresas que fazem parte do Arranjo Produtivo Local (APL) de Pernambuco, diante dos riscos as quais elas estavam submetidas.

Com relação ao método empregado (CPP), o mesmo tem demonstrado ser um mecanismo adequado para diminuir as imperfeições da técnica da FMEA, principalmente devido ao fato de seu foco ser direcionado para problemas em que há um componente subjetivo que torna imprecisa as medidas consideradas, mesmo que baseada na observação de uma variável que possa ser determinada objetivamente, como se observa nos seguintes estudos: Sant'Anna [2012], Sant'Anna et al. [2014], Sant'Anna e Junior [2010], Silva et al. [2015] e Casado et al. [2016].

O artigo é dividido em 5 (cinco) seções. Apresenta-se resumidamente, na próxima seção, as principais características da FMEA, bem como da CPP. Já na seção 3, expõe-se a estruturação da metodologia empregada nesse estudo. Na seção 4 delinea-se os resultados obtidos mediante a aplicação da CPP aos dados da pesquisa e a discussão dessa proposta. Por fim, na seção 5, expõe-se as considerações extraídas dessa aplicação.

2. Referencial teórico

2.1. Análise do Efeito e Modo de Falha (FMEA)



A interpretação básica para a FMEA refere-se a uma ferramenta vastamente usada para identificação prévia de falhas potenciais, com a finalidade de minimizar o risco associado [Narayanagounder e Gurusami 2009].

Com relação ao procedimento da FMEA, destaca-se que o mesmo se inicia com a identificação de funções e requisitos de um sistema, para na sequência definir as causas e os efeitos dos modos de falha. O passo seguinte remete-se à atribuição de valores, realizado por uma equipe multidisciplinar, a respeito dos parâmetros gravidade dos efeitos (S) e probabilidade de ocorrência (O) das causas, para posteriormente haver a atribuição de valores à dificuldade de detecção (D) [Laurenti et al. 2012]

Esses julgamentos são computados através do produto dos 3 (três) parâmetros (S, O e D), formando o chamado Número de Prioridade de Risco (RPN, acrônimo em inglês para *Risk Priority Number*). Carlson [2012] destaca que existem algumas limitações ao uso do RPN: 1) Subjetividade: os parâmetros são avaliados de forma subjetiva, baseada em números tabelados; 2) Lacunas na escala: embora a RPN seja uma escala de números inteiros, ela não é contínua; 3) Números duplicados: a combinação dos valores atribuídos aos parâmetros pode gerar RPN repetidos, porém com diferentes impactos; 4) Limites no uso do RPN: os limites de RPN devem somente disparar um nível elevado da revisão.

Devido a essas limitações, tem sido realizado um vasto número de pesquisas no intuito de fornecer diferentes mecanismos para minimizar os erros oriundos do método tradicional da FMEA [Bowles 2003]. Dentre eles, pode-se citar: O emprego do RPN como uma soma ponderada de 6 (seis) parâmetros; A utilização da abordagem multiatributo baseada na análise hierárquica de processo (AHP, acrônimo em inglês para *Analytic Hierarchy Process*); Uso da análise envoltória de dados (DEA, acrônimo em inglês para *Data Envelopment Analysis*) para priorizar modos de falha por meio de uma medida de ineficiência relativa; Emprego da teoria dos conjuntos *Fuzzy* [Garcia 2013].

Além destas pesquisas, vale destacar ainda para uma nova vertente abordada na literatura, que trata da avaliação das falhas potenciais pela probabilidade de ser a mais importante, de acordo com cada critério na FMEA, também chamada de Composição Probabilística de Preferências (CPP). Ela gera uma medida probabilística prioritária (PPR) para falhas potenciais em substituição ao RPN [Sant'Anna 2012]

2.2. Composição Probabilística de Preferências (CPP)

A incerteza é um fator cotidiano quando se trata de situações envolvendo preferências. Em relação ao tratamento das incertezas, Sant'Anna [2002] desenvolveu um método que realiza a composição de múltiplos critérios levando em consideração a presença inerente de imprecisões nas avaliações de preferência, através do uso de probabilidades.

Um ponto central desse método trata de que não apenas critérios avaliados em termos linguísticos, que geralmente empregam uma escala de *Likert*, mas também aqueles avaliados por meio de medidas numéricas, abrangem alguma imprecisão que pode ser modelada [Sant'Anna e Conde 2011].

Este método é desenvolvido em 2 (duas) etapas: 1) Definir a probabilidade de ser a melhor e/ou a pior opção; 2) Realizar a composição das preferências probabilísticas. No primeiro momento é estabelecido uma ordenação do conjunto de opções, através da determinação das preferências conforme o tipo de critério. Após determinar essa ordenação, deve-se calcular as probabilidades de preferência máxima (M_{ij}) e/ou mínima (m_{ij}) de cada opção (alternativa) i em relação às demais, combinando as preferências obtidas para cada critério j , em que j varia de 1 a m [Garcia et al. 2015].

Para esse cálculo, necessita-se associar cada medida de preferência, obtida anteriormente, à uma distribuição de probabilidade, a fim de substituir os valores determinísticos por medidas de relevância, ou seja, tratar cada valor observado como representando uma posição em torno da qual o atributo medido varia [Sant'Anna 2015]. De acordo com Garcia et al. [2015] são utilizadas preferencialmente as distribuições simples, como por exemplo a normal, a uniforme ou a triangular, a depender das particularidades de cada caso a ser empregado.



Assim, Sant'Anna et al. [2012] relatam que para obter a probabilidade de uma opção i ser a melhor (M_{ij}) ou ser a pior (m_{ik}), conforme cada critério j , deve-se assumir independência estatística para simplificar o cálculo das probabilidades conjuntas pelo produto das funções marginais de probabilidade, conforme Equações 1 e 2.

$$M_{ij} = \int_{D_{x_i}} \left[\prod_{-i} F_{X_{-i}}(x_{-i}) \right] f_{X_i}(x_i) dx_i \quad (1)$$

$$m_{ij} = \int_{D_{x_i}} \left[\prod_{-i} (1 - F_{X_{-i}}(x_{-i})) \right] f_{X_i}(x_i) dx_i \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2), tem-se que os parâmetros F_x , f_x e D_{x_i} representam respectivamente: a função distribuição cumulativa da variável x_{-i} , a qual representa as demais opções sob o mesmo critério, com exceção da variável x_i considerada no cálculo; a função densidade de probabilidade; e o suporte da variável aleatória x_i , o qual indica os limites inferior e superior do domínio da respectiva variável [Gavião et al. 2016]

A segunda etapa da CPP consiste em agregar, a partir dos valores obtidos para cada critério, um valor global único. E uma das formas de realizar esta composição é tratar as probabilidades M_{ij} e m_{ij} , de acordo com cada critério, como preferências condicionadas à preferência por tal critério. Desse modo, o valor global é definido como sendo uma média ponderada das probabilidades condicionais. E os pesos para esta média referem-se as probabilidades marginais dos eventos de condicionamento, os quais representam às preferências pelos critérios [Sant'Anna e Conde 2011].

Todavia, não é simples a identificação dessas probabilidades marginais, pois independentemente do fato das preferências numéricas serem obtidas para os critérios, a sua aplicação como pesos em uma média ponderada pode ser distorcida por interações entre critérios [Sant'Anna 2015].

Uma outra forma para essa abordagem, leva em conta a combinação das avaliações por uma integral de Choquet. Ao contrário do uso aditivo de uma distribuição de probabilidade para os critérios, essa integral utiliza uma capacidade para medir de forma mais realista a preferência por qualquer conjunto de critérios, sendo que a determinação dessa capacidade também não se configura como uma tarefa simples [Sant'Anna 2015].

Com isso a última forma e a mais simples de composição baseia-se em probabilidades conjuntas. Para derivar as avaliações por probabilidades conjuntas, deve-se analisar 2 (dois) aspectos principais: 1) A visão adotada pelo decisor para a construção da probabilidade conjunta; 2) A modelagem conjunta dos distúrbios que afetam as avaliações de acordo com os múltiplos critérios [Garcia et al. 2015].

Com relação ao primeiro aspecto, a depender do enfoque considerado, pode-se utilizar diferentes probabilidades conjuntas. Nesse sentido, tais enfoques podem ser discriminados em termos da escolha entre posições dentre 2 (duas) orientações básicas, otimista versus pessimista e progressista versus conservador, conforme Tabela 1 [Garcia et al. 2015].

Tabela 1 – Diferentes enfoques para a combinação de avaliações probabilísticas

Otimista	Pessimista
Considera satisfatório atender a pelo menos um critério.	Busca a otimização de acordo com todos os critérios.
A composição faz uso do conectivo “ou”.	A composição faz o uso do conectivo “e”.
Progressista	Conservador
Considera as probabilidades de maximizar as preferências.	Considera a preocupação apenas em evitar os extremos negativos; probabilidades de não minimizar as preferências.
Associado à ideia de sempre elevar o nível de satisfação; alcançar padrões mais elevados.	Está relacionado com a ideia de evitar perdas; avesso ao risco; o objetivo é evitar maus desempenhos.

Fonte: Adaptado de Sant'Anna e Conde [2011]



Com relação ao segundo aspecto, efetuando a combinação das posições nos extremos destas 2 (duas) orientações, são geradas 4 (quatro) diferentes medidas [Garcia e Sant'Anna 2015]:

- 1) Otimista/Progressista: $OP = 1 - \pi(1 - M_{ij})$;
- 2) Otimista/Conservador: $OC = 1 - \pi m_{ij}$;
- 3) Pessimista/Progressista: $PP = \pi M_{ij}$;
- 4) Pessimista/Conservador: $PC = \pi(1 - m_{ij})$.

Todas as probabilidades descritas baseiam-se na premissa de independência dos critérios e π significa o operador do produto com m termos obtidos variando as opções i sobre todos os critérios j [Garcia e Sant'Anna 2015].

3. Metodologia

A realização desse estudo teve como base a utilização de parte do banco de dados da pesquisa realizada por Palmeira [2016], que consistia na avaliação dos riscos (internos e externos) que podem incidir em empresas que fazem parte do polo de confecções do agreste de Pernambuco, diante de uma metodologia de aplicação da FMEA associada à lógica *Fuzzy*.

Diante desse banco de dados, o presente estudo tem como intuito evidenciar a eficácia da aplicação da CPP quanto ao tratamento de incertezas no gerenciamento de riscos, oriundos da técnica da FMEA, a partir da geração de valores probabilísticos globais de risco. Restringiu-se o foco para uma análise apenas dos riscos internos abordados na referida pesquisa. A Tabela 2 apresenta a lista dos referidos riscos avaliados e suas identificações.

Tabela 2 – Modos de falha relacionados aos eventos internos e suas identificações

Modo de falha	Registro	Modo de falha	Registro
Elevação nos custos das matérias-primas	R1	Falha no treinamento do pessoal	R9
Crise financeira devido à falta de pagamento dos clientes	R2	Falha no controle administrativo da empresa	R10
Colapso nos preços devido a um novo concorrente	R3	Falta de comunicação com os fornecedores principais	R11
Colapso nas vendas devido a um novo produto concorrente	R4	Falta de flexibilidade no processo produtivo	R12
Falha no fornecimento de matérias-primas	R5	Falta de tecnologia de informação adequada	R13
Falha na confiabilidade da entrega	R6	Falta de habilidade para lidar com a mudança de volume na demanda	R14
Falha na qualidade do produto	R7	Falta de eficiência dos processos que permitem o fluxo de materiais	R15
Falha de softwares nos sistemas principais	R8	Falta de regras, normas e procedimentos que regem a empresa	R16

Fonte: Adaptado de Palmeira [2016]

De acordo com Sant'Anna et al. [2015], no caso da FMEA, em que um conjunto de diferentes especialistas registram seus julgamentos em uma escala, que neste caso foi fixada de 1 a 5, pode condizer melhor à realidade do processo de avaliação, modelar as perturbações como assimétricas.

Assim, atrelado a essas questões assimétricas, Sant'Anna et al. [2015] também relata uma condição, conforme exposto na Equação 3, para determinar a distribuição a ser adotada com base no conjunto de observações:



$$\left\{ \begin{array}{l} n > 3 \text{ e } \left(\frac{1}{n-2} \right) < \left(\frac{Mo-L}{U-L} \right) \text{ e } \left(\frac{me-L}{U-L} \right) < \left(\frac{n-3}{n-2} \right), \\ c. c, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Distribuição Beta} \\ \text{Distribuição Triangular} \end{array} \quad (3)$$

Onde, n representa o número de especialistas, Mo a moda dos valores, me a média, U e L, os limites superior e inferior respectivamente. Para compor a aplicação deste método foi retirada uma amostra sistemática, do banco de dados da referida pesquisa de Palmeira [2016], sobre a população de empresas de pequeno e médio porte.

Para a realização dessa amostragem, sucedeu-se os seguintes passos, de acordo com Doane e Seward [2014]: 1) Dividiu-se o tamanho da população (N = 22) pelo tamanho da amostra (t = 7), obtendo-se um intervalo de retirada (k ≈ 3); 2) Sorteou-se um ponto de partida e a cada k elementos retirou-se uma amostra.

Diante disso, para este estudo, conforme as condições expostas na Equação 3, será utilizada a distribuição triangular, fixando os extremos (mínimo e máximo) em 0 e 6.

Para efetuar a transformação das avaliações determinísticas em valores de probabilidades de preferência referente a primeira etapa do CPP, através da referida distribuição triangular, será utilizado como instrumento principal uma adaptação do código no MATLAB proposto por Sant'Anna et al. [2012], conforme exposto na Figura 1.

```
clear all
close all
[filename,pathname]=uigetfile('*.txt', 'Selecione o arquivo');
dados = importdata([pathname filename], ' ');
resultados = strcat('resultados(triangular)_de_', filename);
tol = 1.0e-10;
escala = 10^(size(dados,1)^(1/3));
reavaliados = zeros(size(dados));
for jy = 1:size(dados,2)
    largura = max(dados(:,jy))-min(dados(:,jy));
    minimo = min(dados(:,jy))-0.1*largura;
    maximo = max(dados(:,jy))+0.1*largura;
    for iy = 1:size(dados,1)
        M = dados(:,jy);
        M(iy) = [];
    prov = @(x)produtocdftriangular_vet(x,minimo,maximo,M,Arg).*...
        pdftriangular_vet(x,minimo,maximo,dados(iy,jy));
    % "function y = pdftriangular_vet(x,a,b,m)" é uma subfunção que calcula a
    função densidade da distribuição triangular.
    % "function y = produtocdftriangular_vet(x,a,b,M,Arg)" é a função que realiza
    o produto das funções acumuladas da distribuição triangular usando
    % vetorização.
    % O argumento "Arg" serve para selecionar outras 2 subfunções, relacionadas
    % com as probabilidades de maximizar e minimizar a preferência, através da
    % função acumulada da distribuição triangular.
    reavaliados(iy,jy)= quadl(prov,minimo,maximo,tol);
    end
end
reavaliados;
fid = fopen(resultados,'w');
for iy = 1:size(dados,1)
    fprintf(fid,'%0.4f\t', reavaliados(iy,:));
    fprintf(fid,'\n');
end
fclose(fid);
```

Figura 1 – Código MATLAB para o cálculo das probabilidades de preferência
Fonte: Adaptado de Sant'Anna et al. [2012]

Para realizar a segunda etapa, referente a composição das preferências globais, mantendo o princípio da multiplicação e a independência entre as avaliações pelos diferentes critérios



(tradicionalmente empregado com a FMEA), utilizou-se o enfoque pessimista e progressista ($PP = \pi M_{ij}$) [Sant'Anna 2012].

A visão pessimista e progressista é dada pela probabilidade da alternativa ser a que maximiza (por este motivo, progressista) a probabilidade de preferência por todos os critérios (por este motivo, pessimista) [Letta et al. 2016].

4. Aplicação do método

Na sequência, tendo como base os modos de falha mencionados na Tabela 2, é apresentado na parte esquerda da Tabela 3, os valores gerados pelas modas amostrais das avaliações dos 7 (sete) especialistas como entrada para a aplicação no MATLAB, bem como a ordenação dos modos de falha segundo a aplicação do FMEA clássico, através do cálculo do RPN.

Além disso, à direita da Tabela 3, consta os valores das probabilidades de cada modo de falha segundo cada critério e também a priorização dos mesmos de acordo com a aplicação da CPP, através do cálculo das PPR.

Tabela 3 – Visualização comparativa entre as abordagens do FMEA e da CPP

Posto	FMEA					CPP				
	Risco	S	O	D	RPN	Risco	S	O	D	PPR
1°	R1	3	4	3	36	R13	0,079	0,193	0,057	8,73x10 ⁻⁴
2°	R13	5	5	1	25	R10	0,079	0,103	0,057	4,66x10 ⁻⁴
3°	R5	5	2	2	20	R7	0,079	0,067	0,057	3,01x10 ⁻⁴
4°	R10	5	4	1	20	R16	0,079	0,067	0,057	3,01x10 ⁻⁴
5°	R7	5	3	1	15	R5	0,079	0,049	0,072	2,81x10 ⁻⁴
6°	R16	5	3	1	15	R1	0,026	0,103	0,099	2,62x10 ⁻⁴
7°	R2	5	2	1	10	R2	0,079	0,049	0,057	2,21x10 ⁻⁴
8°	R9	5	2	1	10	R9	0,079	0,049	0,057	2,21x10 ⁻⁴
9°	R3	4	1	2	8	R4	0,079	0,039	0,057	1,75x10 ⁻⁴
10°	R6	4	2	1	8	R14	0,079	0,039	0,057	1,75x10 ⁻⁴
11°	R11	4	1	2	8	R15	0,079	0,039	0,057	1,75x10 ⁻⁴
12°	R4	5	1	1	5	R3	0,039	0,039	0,072	1,09x10 ⁻⁴
13°	R14	5	1	1	5	R11	0,039	0,039	0,072	1,09x10 ⁻⁴
14°	R15	5	1	1	5	R6	0,039	0,049	0,057	1,09x10 ⁻⁴
15°	R12	4	1	1	4	R12	0,039	0,039	0,057	8,60x10 ⁻⁵
16°	R8	3	1	1	3	R8	0,026	0,039	0,057	5,66x10 ⁻⁵

Fonte: Esta pesquisa [2017]

A análise desses resultados chama a atenção para as diferenças consistentes ao longo das 2 (duas) ordenações, com exceção para o conjunto dos riscos (R2, R9) e (R12, R8) que se mantiveram nas mesmas posições para os rankings da FMEA e da CPP.

Pode-se notar que os 6 (seis) riscos iniciais (R1, R13, R5, R10, R7 e R16) obtidos pela FMEA tradicional sofreram uma mudança significativa em relação aos modos de falha iniciais da CPP, com destaque para a falha potencial com o 1° RPN mais elevado (R1), que na priorização através da CPP acabou tendo uma queda de 5 (cinco) posições no ranking.

Outro ponto a se destacar refere-se ao fato de que os escores produzidos na análise probabilística sofreram maior influência dos vetores de entrada relacionados primeiramente à ocorrência e em um segundo momento a severidade.

Por fim, pode-se utilizar, de acordo com Sant'Anna [2012], um limiar para os valores globais probabilísticos, isto é, as Probabilidades Prioritárias de Risco (PPR), a fim de proporcionar o direcionamento mais correto de intervenções aos riscos, aperfeiçoando assim os investimentos



nessa área. Esse limiar é estabelecido através da comparação com r^{-3} , onde r representa a quantidade de modos de falha analisados, que para este estudo em questão é igual a 16. Os limites podem ser conferidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Padrões probabilísticos de riscos desse estudo

Intervalo	Valores ($r = 16$)	Classificação
$PPR \leq \frac{r^{-3}}{3}$	$PPR \leq 8,14 \times 10^{-5}$	Muito baixo
$\frac{r^{-3}}{3} < PPR \leq \frac{2r^{-3}}{3}$	$8,14 \times 10^{-5} < PPR \leq 1,63 \times 10^{-4}$	Baixo
$\frac{2r^{-3}}{3} < PPR \leq r^{-3}$	$1,63 \times 10^{-4} < PPR \leq 2,44 \times 10^{-4}$	Médio
$r^{-3} < PPR \leq \frac{3r^{-3}}{2}$	$2,44 \times 10^{-4} < PPR \leq 3,66 \times 10^{-4}$	Alto
$PPR > \frac{3r^{-3}}{2}$	$PPR > 3,66 \times 10^{-4}$	Muito alto

Fonte: Adaptado de Sant'Anna [2012]

Deste modo, quanto a ordenações obtidas com o método probabilístico (última coluna da Tabela 3) e com base nos padrões probabilísticos de riscos tratados na Tabela 4, obteve-se a classificação dos valores globais probabilísticos, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação dos valores globais probabilísticos

Risco	PPR	Classificação	Risco	PPR	Classificação
R13	$8,73 \times 10^{-4}$	Muito alto	R4	$1,75 \times 10^{-4}$	Médio
R10	$4,66 \times 10^{-4}$	Muito alto	R14	$1,75 \times 10^{-4}$	Médio
R7	$3,01 \times 10^{-4}$	Alto	R15	$1,75 \times 10^{-4}$	Médio
R16	$3,01 \times 10^{-4}$	Alto	R3	$1,09 \times 10^{-4}$	Baixo
R5	$2,81 \times 10^{-4}$	Alto	R11	$1,09 \times 10^{-4}$	Baixo
R1	$2,62 \times 10^{-4}$	Alto	R6	$1,09 \times 10^{-4}$	Baixo
R2	$2,21 \times 10^{-4}$	Médio	R12	$8,60 \times 10^{-5}$	Baixo
R9	$2,21 \times 10^{-4}$	Médio	R8	$5,66 \times 10^{-5}$	Muito baixo

Fonte: Esta pesquisa [2017]

Neste caso, apresentaram classificação como “Muito alto” e “Alto” os seguintes modos de falha: Falta de tecnologia de informação adequada (R13); Falha no controle administrativo da empresa (R10); Falha na qualidade do produto (R7); Falta de regras, normas e procedimentos que regem a empresa (R16); Falha no fornecimento de matérias-primas (R5) e Elevação nos custos das matérias-primas (R1).

Deste modo, dada as limitações de recursos (humanos, técnicos ou financeiros) que normalmente ocorrem em processos industriais, esses riscos seriam os selecionados devido seu elevado grau de prioridade para aplicação de políticas de mitigação.

5. Considerações finais

A natureza do problema analisado neste estudo, acabou orientando o uso da metodologia da CPP, preferencialmente em função do caráter relacionado com as características favoráveis à imprecisão dos dados e à incerteza decorrente do julgamento de cada especialista, quanto as avaliações dos riscos.

O fato das medidas globais, envolvendo a priorização pelas probabilidades de risco, apresentarem inversões nas posições em comparação com as baseadas apenas nos resultados finais



da FMEA clássica, reflete a capacidade da composição probabilística em estimar objetivamente uma definição mais segura dos cenários de risco.

Assim sendo, o caso aqui em estudo exhibe a vantagem em levar em consideração as distâncias numéricas entre os valores de avaliação dos especialistas de forma probabilística, através da comparação em termos de probabilidades conjuntas, tendo por base as distribuições estatísticas.

Nesse sentido, o estudo desenvolvido permitiu, mesmo que de forma estimativa, a comprovação de que a aplicação da CPP pode aperfeiçoar o cálculo das prioridades na FMEA, mostrando-se um eficiente mecanismo quanto ao tratamento de imprecisões e incertezas. Além disso, os resultados obtidos são suficientes para alertar os gestores quanto a necessidade de analisar melhor a priorização dos modos de falha, para contribuir com a tomada de decisão sobre os investimentos na gestão de riscos, de modo a minimizar os custos envolvidos.

Isto traz à tona uma nova perspectiva para o aproveitamento dos dados disponíveis, no que diz respeito a uma análise ainda mais apurada, através da utilização de um número maior de critérios relacionados a gestão de riscos ou no mesmo sentido, de o número maior de avaliações. Pode-se também cogitar a possibilidade de inclusão de novos enfoques, dependendo da estruturação do problema.

Agradecimento. Este trabalho contou com o apoio parcial da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e do Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão (GPSID).

Referências

- Bowles, J. B. (2003). An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, p. 380-386. IEEE.
- Cândeia, G., Kifor, S. e Constantinescu, C. (2014). Usage of case-based reasoning in FMEA-driven software. *Procedia CIRP*, v. 25, p. 93–99.
- Carlson, C. S. (2012). *Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. Editora John Wiley & Sons.
- Casado, R. S. G. R., Santos, L. V. B. e Silva, L. C. E. (2016). Proposta de gestão de riscos na cadeia de suprimentos com base na composição probabilística: estudo no APL de confecções do agreste pernambucano. In *Anais do XLVIII SBPO*, Vitória - ES.
- Christopher, M. e Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, v. 15, n. 2, p. 1–14.
- Davoudpour, Z. e Sabouri, F. (2012). Applying fmea technique in urbanization to prevent and solve the problems of urban spaces (a case study of daneshjoo park in tehran). *Research and Urban Planning*, v. 3, n. 10, p. 125–146.
- Doane, D. P. e Seward, L. E. (2014). *Estatística aplicada à administração e economia*. 4^a ed. Editora McGraw-Hill, Porto Alegre.
- Fan, H., Li, G., Sun, H. e Cheng, T. C. E. (2016). An information processing perspective on supply chain risk management: Antecedents, mechanism, and consequences. *International Journal of Production Economics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.015>.
- Garcia, P. A. A. (2013). Uma abordagem via análise envoltória de dados para o estabelecimento de melhorias em segurança baseadas na FMEA. *Gestão & Produção*, v. 20, n. 1, p. 87–97.



Garcia, P. A. A., Junior, I. C. L. e Guimarães, V. A. (2015). Application of the composition of probabilistic preferences in modal choice for freight transportation of hazardous materials. *In Anais do XLVII SBPO*, Porto de Galinhas-PE.

Garcia, P. A. A. e Sant'Anna, A. P. (2015). Vendor and logistics provider selection in the construction sector: a probabilistic preferences composition approach. *Pesquisa Operacional*, v. 35, n. 2, p. 363–375.

Gupta, G., Mishra, R. P. e Singhvi, P. (2016). An application of reliability centered maintenance using rpn mean and range on conventional lathe machine. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, v. 23, n. 6.

Laurenti, R., Villari, B. e Rozenfeld, H. (2012). Problemas e melhorias do método FMEA: uma revisão sistemática da literatura. *P&D em Engenharia de Produção*, v. 10, n. 1, p. 59–70.

Letta, M. C. K., Lima, G. B. A., Sant'Anna, A. P., Kämpffe, M. G. F. e Silva, A. de J. F. (2016). Análise de risco de operações em instalações especiais com aplicação da composição probabilística de preferências. *In Anais do XLVIII SBPO*, Vitória-ES.

Liu, H. C., Liu, L. e Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, v. 40, n. 2, p. 828–838.

Narayanagounder, S. e Gurusami, K. (2009). A new approach for prioritization of failure modes in design FMEA using ANOVA. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, v. 3, n. 1, p. 73–80.

Palmeira, J. N. B. (2016). Uso da metodologia FMEA-FUZZY para gestão de riscos na cadeias de suprimentos em empresas do APL de confecções do agreste Pernambucano. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru-PE.

Ponomarov, S. Y. e Holcomb, M. C. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, v. 20, n. 1, p. 124–143.

Sant'Anna, A. P. (2002). Data envelopment analysis of randomized ranks. *Pesquisa Operacional*, v. 22, n. 2, p. 203–215.

Sant'Anna, A. P. (2012). Probabilistic priority numbers for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 29, n. 3, p. 349–362.

Sant'Anna, A. P. (2015). Probabilistic human development indices. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 12, n. 1, p. 136.

Sant'Anna, A. P., Gomes, L. F. A. M., Costa, F. F., et al. (2012). Análise multicritério baseada em probabilidades de preferência. In: Vagner, V. F. O., Cavenaghi, V., Másculo, F. S. (Org). *Tópicos emergentes e desafios metodológicos em Engenharia de Produção: Casos, experiências e proposições*. Rio de Janeiro: ABEPRO, v. 5, p. 258.

Sant'Anna, A. P. e Conde, F. Q. (2011). Probabilistic comparison of call centres in a group decision process. *International Journal of Management and Decision Making*, v. 11, n. 5–6, p. 417–437.

Sant'Anna, A. P., Martins, E. F., Lima, G. B. A. e Fonseca, R. A. (2015). Composição de avaliações de múltiplos especialistas na comparação de modos de falhas em usina nuclear. *In Anais do XLVII SBPO*, Porto de Galinhas-PE.



Sant'Anna, A. P., Meza, L. A. e Ribeiro, R. O. A. (2014). Probabilistic composition in quality management in the retail trade sector. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 31, n. 6, p. 718–736.

Sant'Anna, A. P. e Junior, R. P. S. P. (2010). Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*, v. 5, n. 353, p. 179–191.

Silva, A. J. F., Sant'Anna, A. P., Lima, G. B. A. e Silva, C. M. (2015). Aplicação da composição probabilística de preferência na priorização de cenários críticos de riscos. In: *Anais do XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão*, Rio de Janeiro-RJ.

Wagner, S. M. e Bode, C. (2006). An empirical investigation into supply chain vulnerability. *Journal of Purchasing and Supply Management*, v. 12, n. 6, p. 301–312.

Zsidisin, G. A., Melnyk, S. A. e Ragatz, G. L. (2005). An institutional theory perspective of business continuity planning for purchasing and supply management. *International Journal of Production Research*, v. 43, n. 16, p. 3401–3420.