

UM MODELO BASEADO EM FMEA E FUZZY-TOPSIS PARA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM PROCESSOS

FRANCISCO RODRIGUES LIMA JUNIOR

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

WAUIRES RIBEIRO DE MAGALHÃES

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

Agradecimento à órgão de fomento:

Esse estudo não contou com o apoio de agências de fomento.

UM MODELO BASEADO EM FMEA E *FUZZY-TOPSIS* PARA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM PROCESSOS

1. INTRODUÇÃO

Aven e Renn (2009) definem risco como “uma situação ou evento onde algo de valor humano está em jogo e o resultado desta situação é incerto”. Já a Norma NBR ISO 31.000 (ABNT, 2018), que estabelece princípios e orientações sobre gestão de riscos, conceitua risco como “o efeito da incerteza nos objetivos”. Ao sistematizar conhecimento e analisar a incerteza na consecução de um sistema, torna-se possível prever os problemas potenciais, suas causas e consequências prováveis, criando condições para classificar e mitigar os riscos identificados (AVEN, 2011).

Na literatura são encontradas várias metodologias para apoiar a análise de riscos em diferentes contextos, incluindo processos industriais, projeto de produto, transportes, entre outros (TIXIER et al., 2002). Tixier et al. (2002) identificaram 62 metodologias para a identificação, avaliação e hierarquização de riscos. Esse conjunto inclui metodologias baseadas em abordagens qualitativas e quantitativas, bem como determinísticas e probabilísticas. Segundo Tixier et al. (2002), um dos métodos mais utilizados é denominado Análise do Modo e Efeito de Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA), que permite uma análise qualitativa dos riscos usando também pontuações representadas por valores determinísticos. Na versão tradicional do FMEA, os modos de falhas potenciais são avaliados com base nos critérios gravidade, frequência e controle, utilizando uma escala numérica que varia de 1 a 10. A multiplicação das pontuações de cada modo de falha em relação a esses três critérios determina o número de prioridade de risco (NPR), que indica a prioridade da falha (LIU; LIU; LIU, 2013).

Apesar da ampla utilização do FMEA ao longo de mais de 50 anos, este método ainda apresenta algumas limitações, o que contribui para que novas versões sejam desenvolvidas a partir de sua combinação com outras técnicas. Uma dessas limitações consiste no uso de valores numéricos determinísticos, que não são adequados para quantificar julgamentos humanos subjetivos, medidas incertas ou imprecisas, as quais são inerentes ao processo de análise dos riscos (KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012). Uma segunda limitação é o fato de não serem considerados os níveis de importância relativa (pesos) dos critérios avaliados (XIAO et al., 2011). Outro problema está relacionado ao uso de apenas três critérios, pois aspectos importantes como fatores econômicos não são considerados (LIU et al., 2011; LIU; LIU; LIU, 2013; ZHAO; YOU; LIU, 2017).

Com o objetivo de incrementar novos recursos ao FMEA, alguns estudos propõem sua combinação com métodos de decisão multicritério (*Multicriteria Decision Making*, MCDM). Um desses métodos é denominado *Fuzzy-TOPSIS* (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*). Esse método foi proposto por Chen (2000) a partir da combinação entre o TOPSIS e a lógica *fuzzy*. O *Fuzzy-TOPSIS* se distingue das técnicas multicritério tradicionais, como AHP, TOPSIS e ANP, por permitir o uso de valores linguísticos, dados por especialistas, para avaliar a pontuação das alternativas em relação a múltiplos critérios. Os pesos desses critérios também são avaliados por meio de julgamentos linguísticos. Além disso, o processamento das informações é baseado em operações algébricas *fuzzy* com valores numéricos intervalares (CHEN, 2000; LIMA JR.; CARPINETTI, 2015).

Com o propósito de contornar as limitações do FMEA apontadas nesta seção, este estudo propõe um modelo que combina o método *Fuzzy-TOPSIS* com FMEA para apoiar a priorização de riscos em processos de produção industrial. Uma aplicação piloto do modelo foi executada com base nos julgamentos fornecidos por especialistas de uma empresa metalúrgica, fabricante de peças em ferro fundido utilizadas na indústria automotiva. O foco da aplicação foi a priorização das falhas de um processo produtivo denominado fusão e vazamento de ferro nodular. O estudo está organizado como segue: a seção 2 descreve os procedimentos

metodológicos da pesquisa; a seção 3 apresenta um referencial teórico sobre FMEA, *Fuzzy-TOPSIS* e temas relacionados. A seção 4 detalha o modelo proposto. Por fim, a seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para estudos futuros.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Seguindo as definições propostas por Bertrand e Fransoo (2002), o presente estudo pode ser classificado como uma pesquisa de modelagem quantitativa empírica normativa. Nessa abordagem, o modelo é construído a partir da coleta de dados, sendo que existem relacionamentos causais entre as variáveis de entrada e a variável de saída. O propósito é obter soluções a partir do modelo desenvolvido a fim de eliminar ou mitigar os problemas identificados. Para o desenvolvimento deste estudo, adotou-se os seguintes procedimentos:

- a) **Pesquisa bibliográfica:** o levantamento bibliográfico dos modelos prévios foi executado por meio dos seguintes passos: (1) digitação das palavras-chave e acrônimos “FMEA” AND “RPN” AND “Multicriteria” nos campos de busca das bases de dados *Science Direct*, *Scopus*, *Taylor & Francis* e no *Google Scholar*. A busca foi feita considerando o título, resumo e palavras-chave dos artigos; (2) utilização de filtro para selecionar somente os estudos publicados do ano 2000 em diante, cuja escolha se deu por ser o ano do surgimento do *Fuzzy-TOPSIS*; (3) seleção apenas dos estudos publicados em periódicos científicos; (4) seleção de estudos publicados somente nos idiomas inglês e português; (5) seleção dos estudos que abordam modelos de decisão baseados em FMEA para análise de riscos em processos de produção industriais; (6) eliminação dos estudos que se repetem em mais de uma base de dados. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos após a execução deste procedimento. Adicionalmente foram utilizados livros e artigos de periódicos relacionados aos temas centrais do estudo, tais como análise de riscos, FMEA, modelos MCDM e *Fuzzy-TOPSIS*. Essa etapa proporcionou o embasamento teórico-empírico para elaboração e aplicação do modelo;

Tabela 1 - Resultados da pesquisa bibliográfica

Bases de dados	Número de estudos resultantes em cada etapa					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Science Direct</i>	14	14	11	11	5	1
Scopus	5	5	5	4	0	0
Taylor & Francis	8	8	8	7	0	0
Google Scholar	270	263	205	188	13	12
Total de estudos selecionados						13

Fonte: Elaborado pelo autor.

- b) **Modelagem computacional:** a modelagem computacional foi desenvolvida no Microsoft Excel para possibilitar que a replicação do modelo possa ser executada de maneira efetiva e simplificada. As equações implementadas foram baseadas em Chen (2000). As escalas linguísticas utilizadas na modelagem foram definidas a partir de Wang (2011) e Chen (2017). Já os critérios foram escolhidos com base em Liu, Liu e Liu (2013) e Banduka et al. (2018);
- c) **Aplicação piloto:** o modelo foi aplicado na priorização de riscos em um processo de fusão e vazamento de ferro nodular de uma empresa metalúrgica. Os modos de falha analisados na aplicação foram definidos por quatro especialistas de uma empresa metalúrgica, atuantes nas áreas de engenharia, qualidade e produção. As pontuações das falhas e os pesos dos critérios foram fornecidos por eles. A aplicação do modelo resultou em um ranqueamento para priorização dos riscos potenciais, cuja ordenação também foi analisada pelos especialistas. Os resultados são apresentados na Seção 4.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O Método FMEA

O FMEA é um dos métodos mais aplicados para identificar e eliminar falhas potenciais ou conhecidas em um sistema, projeto ou processo. Sua aplicação permite melhorar a segurança, confiabilidade e apoiar a tomada de decisão (LIU; LIU; LIU, 2013). O FMEA apoia a análise de riscos e o desenvolvimento de ações preventivas e corretivas para sistematizar a análise de falhas. Costuma ser aplicado na indústria automotiva, aeroespacial, bélica, eletrônica, tecnologias médicas, dentre outras (CARPINETTI, 2016). A norma IATF 16.949:2016, que trata de requisitos para aplicação da ISO 9001 na cadeia automotiva, estabelece o FMEA como um requisito de gestão da qualidade. Segundo Banduka et al. (2018), esse método tem sido aplicado desde 1993 pela Ford, Chrysler e General Motors.

Maleki e Saadat (2013) e Carpinetti (2016) sugerem que o FMEA seja aplicado conforme as três etapas indicadas na Figura 1. Na etapa I, os especialistas recorrem às informações disponíveis e realizam sessões de “*brainstorming*” sobre os possíveis modos de falhas em um sistema, projeto ou processo sob estudo. Dessa forma, identificam os modos de falhas potenciais ou conhecidos, assim como analisam e descrevem os efeitos destes modos de falhas. Em seguida, os especialistas discutem as causas prováveis e os meios existentes para detecção do modo de falha caso este venha a ocorrer. Para cada modo de falha identificado, deve ser atribuída uma pontuação relativa aos critérios: severidade (S), que quantifica a gravidade do efeito; ocorrência (O), relacionada à frequência e causa; e detecção (D), que avalia os meios de controle existentes. A Figura 2 apresenta a escala de valores usada para cada critério. O último passo da etapa I consiste no cálculo do RPN (Número de Prioridade de Risco) por meio da Equação 1.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Figura 1 - Descrição das etapas de aplicação do FMEA

Etapa I	
<ul style="list-style-type: none"> a) Especificar o sistema, projeto ou processo sob estudo; b) Formar equipe de especialistas; c) Definir os requisitos do processo ou as funções dos componentes do produto; d) Identificar os modos de falhas potenciais ou conhecidos; e) Analisar e descrever os efeitos de cada modo de falha e avaliar sua severidade; f) Investigar e definir as causas prováveis de cada modo de falha e avaliar a ocorrência dessas causas; g) Verificar os controles existentes e avaliar a capacidade de detecção dos modos de falhas por estes recursos; h) Calcular o RPN usando a Equação 1. 	
Etapa II	
<ul style="list-style-type: none"> a) Ordenar decrescentemente os valores de RPN. Os modos de falhas com resultados de RPN mais altos são assumidos como os mais importantes e terão maior prioridade para a tomada de ações; b) Elaborar um plano de ações corretivas ou preventivas priorizado. 	
Etapa III	
<ul style="list-style-type: none"> a) Implementar o plano de ações; b) Avaliar a eficácia destas ações, executando uma nova avaliação dos modos de falha considerando os critérios severidade, ocorrência e detecção. Caso as ações tenham sido eficazes, é esperado que ocorra a redução do valor do RPN em relação ao resultado inicial. 	

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Garcia e Gilabert (2011) e Liu, Liu e Liu (2013).

Figura 2 - Escala utilizada para aplicação da versão tradicional do FMEA

Avaliação	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)
10	Perigoso sem aviso	Extremamente alta	Absolutamente Incerto
9	Perigoso com aviso	Muito alta	Muito Remota
8	Extremo	Falhas repetidas	Remota
7	Maior	Alta	Muito Baixa
6	Significante	Moderadamente alta	Baixa
5	Moderado	Moderada	Moderada
4	Baixo	Relativamente baixa	Moderadamente Alta
3	Menor	Baixa	Alta
2	Muito menor	Remota	Muito Alta

1	Nenhuma	Quase impossível	Quase Certa
---	---------	------------------	-------------

Fonte: Elaborado a partir de Liu, Liu e Liu (2013).

Na etapa II, os valores resultantes do cálculo do RPN para cada falha são ranqueados em ordem decrescente. A classificação do RPN determina o nível de prioridade da falha. Os especialistas e outros funcionários envolvidos no processo analisado devem elaborar e implantar planos de ações para eliminar ou mitigar as causas potenciais das falhas prioritárias. Finalmente, na etapa III, os modos de falhas são reavaliados por meio da Equação 1 para verificar a eficácia das ações implementadas. O novo ranqueamento dos modos de falha direciona as próximas ações de melhoria do processo (MALEKI; SAADAT, 2013; CARPINETTI, 2016).

Embora seja um método bastante aceito e amplamente utilizado, o FMEA vem sendo criticado em diversos estudos que apontam algumas deficiências na etapa I, relacionadas ao procedimento de análise de risco e priorização dos modos de falha do método. A Figura 3 sintetiza os principais problemas identificados. Na tentativa de superar as limitações do FMEA e de melhorar seu desempenho, cada vez mais estudos vêm propondo sua combinação com métodos de decisão multicritério (MCDM) (ZHAO; YOU; LIU, 2017).

Figura 3 - Principais problemas da análise de riscos usando FMEA

i. Uso de valores numéricos determinísticos, que não permitem quantificar medidas incertas ou imprecisas, inerentes ao processo de avaliação dos riscos (LIU et al., 2011; KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012; BOZDAG et al., 2015).
ii. Diferentes conjuntos de classificações de “S”, “O” e “D” podem produzir exatamente o mesmo valor de RPN, mas suas implicações de risco ocultas podem ser totalmente diferentes (PILLAY; WANG, 2003; LIU et al., 2011; MAHMOODI; MIRZAZADEH, 2014).
iii. A importância relativa entre “S”, “O” e “D” não é levada em consideração. Isto pode não ser o caso quando se considera uma aplicação prática do FMEA (LIU et al., 2011; XIAO et al., 2011; MAHMOODI; MIRZAZADEH, 2014).
iv. A fórmula matemática para calcular o RPN é questionável. Não são encontrados argumentos que justifiquem o fato do RPN ser calculado por meio da multiplicação das pontuações em cada critério (LIU et al., 2011; PILLAY; WANG, 2003; MAHMOODI; MIRZAZADEH, 2014).
v. Pequenas variações em uma classificação podem levar a efeitos sobre o RPN, dependendo dos valores dos outros fatores. Por exemplo, se as pontuações de “O” e “D” são 10, a diferença de 1 ponto em “S” causará uma diferença de 100 pontos no RPN. Se os valores de “O” e “D” fossem igual a 2, a mesma diferença de 1 ponto em “S” iria gerar uma variação de apenas 4 pontos no RPN (LIU et al., 2011).
vi. O RPN considera apenas três fatores na análise, sendo que outros aspectos importantes, como fatores econômicos, impactos ambientais e perdas de produção são ignorados (LIU et al., 2011; LIU; LIU; LIU, 2013; ZHAO; YOU; LIU, 2017).
vii. As pontuações das falhas nos três fatores são difíceis de determinar com precisão. Muitas informações podem ser expressas na forma de julgamentos lingüísticos como “provável”, “importante” ou “muito alto” (XU et al., 2002; PILLAY; WANG, 2003; LIU et al., 2011).

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Aplicações do FMEA combinado com métodos MCDM

Os métodos MCDM se apresentam como solução para problemas de decisão em que estão envolvidos critérios qualitativos e quantitativos e pelo menos duas alternativas (GUARNIERI, 2015). Segundo Ahmadi, Molana e Sajadi (2017), os métodos MCDM podem ser subdivididos em dois tipos: MODM (*Multi-Objectives Decision Making*) e MADM (*Multi-Attribute Decision Making*). Enquanto os métodos MODM focam em problemas de otimização, os métodos MADM realizam o ranqueamento de alternativas predefinidas. Maleki e Saadat (2013) recomendam que a escolha e aplicação de uma técnica MCDM seja precedida de ampla pesquisa em função da existência de variados axiomas e diferentes lógicas. Qualquer que seja a técnica MCDM escolhida, estarão presentes benefícios de uso e limitações. Em função disso, alguns estudos combinam duas ou mais técnicas a fim de usufruir de benefícios específicos advindos de cada uma delas (LIMA JR.; OSIRO; CARPINETTI, 2013).

Na Figura 4 são apresentados os estudos prévios encontrados por meio do levantamento bibliográfico realizado, destacando as técnicas de decisão utilizadas em cada um. Todos esses estudos utilizam o FMEA combinado com métodos MCDM para apoiar a análise de riscos a partir do ranqueamento dos valores de RPN. Devido ao recorte da presente pesquisa, foram incluídos apenas os estudos focados em processos de produção industrial. Nessas aplicações, alguns dos objetivos mais comuns são a prevenção e/ou redução de acidentes, peças defeituosas, paradas na produção e desperdício de recursos.

Figura 4 - Modelos de decisão para análise de risco do FMEA

Proposto por:	Técnica(s) Utilizada(s)	Breve descrição
Ekmekçioğlu e Kutlu (2012)	<i>Fuzzy-AHP (Analytic Hierarchy Process) e Fuzzy-TOPSIS (Fuzzy-Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</i>	Aplicação de variáveis linguísticas para determinação de “S”, “O” e “D” em um FMEA de processo de montagem de uma indústria automotiva
Kutlu e Ekmekçioğlu (2012)	<i>Fuzzy-AHP e Fuzzy-TOPSIS</i>	Aplicação de modelo híbrido em ambiente <i>fuzzy</i> de processos de fabricação de uma indústria automotiva
Chang, Chang e Tsai (2013)	<i>GRA (Grey Relational Analysis) e DEMATEL (Decision-making and Trial Evaluation Laboratory),</i>	Demonstração das relações entre os modos de falhas e as causas em um processo de fabricação e montagem de componentes eletrônicos
Maleki e Saadat (2013)	<i>AHP e REMBRANDT System</i>	Demonstração da inversão de <i>ranking</i> e da solução aplicada em um processo de fabricação de bombas hidráulicas
Mahmoodi e Mirzazadeh (2014)	<i>Fuzzy-TODIM (Iterative Multi-Criteria Decision Making) e FTF (Fuzzy Time Function)</i>	Análise de problemas em um processo de uma indústria automotiva
Bozdog et al. (2015)	<i>Interval Type 2 Fuzzy Sets</i>	Melhoria na modelagem de incerteza em um processo de montagem.
Haq et al. (2015)	<i>FST (Fuzzy Set Theory)</i>	Permite o uso de variáveis linguísticas para avaliação de falhas em linha de montagem da Ford Motor Company
Ahmadi, Molana e Sajadi (2017)	<i>TOPSIS</i>	Eliminação dos efeitos da subjetividade na avaliação de riscos em processos de fabricação de aço
Certa et al. (2017)	<i>ELECTRE TRI (Elimination and Choice Expressing Reality)</i>	Atribuição de modos de falhas de processos de uma indústria de laticínios a classes de risco predefinidas
Chen (2017)	<i>Fuzzy-ISM (Interpretive Structural Model), DEMATEL e ANP (Analytic Network Process)</i>	Obtenção de maior acuracidade dos pesos dos fatores de riscos em processos de fabricação de notebooks
Hajimolaali et al. (2017)	<i>Fuzzy-TOPSIS</i>	Identificação dos riscos relacionados à qualidade nos processos de fabricação da indústria farmacêutica
Zhao, Ysuo e Liu (2017)	<i>IVIFS (Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set) e MULTIMOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis)</i>	Redução da incerteza e subjetividade da equipe na avaliação de riscos em um processo de produção de aço
Banduka et al. (2018)	<i>FST (Fuzzy Set Theory)</i>	Resolução dos problemas relativos aos pesos dos fatores de risco do FMEA considerando um processo de fabricação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os 13 estudos descritos na Figura 4, 12 consideram apenas os três critérios de decisão tradicionalmente usados no FMEA: severidade, frequência e controle. A única exceção é o modelo proposto por Banduka et al. (2018), que inclui também um fator relacionado aos custos internos e externos da falha. Em relação às técnicas de decisão, oito estudos utilizam abordagens baseadas na teoria dos conjuntos *fuzzy* (FST), o que parece estar relacionado à sua capacidade de apoiar decisões sob incerteza. Ao contrário dos estudos propostos por Chang,

Chang e Tsai (2013), Ahmadi, Molana e Sajadi (2017) e Certa et al. (2017), os modelos baseados em FST possibilitam utilizar variáveis linguísticas para avaliar os elementos do problema. Nota-se também uma ampla diversidade de combinações entre técnicas de decisão. Chen (2017) combinou o FMEA com os métodos *Fuzzy*-ISM, DEMATEL e ANP. Mahmoodi e Mirzazadeh (2014) aplicaram *Fuzzy*-TODIM com FTF. Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) e Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) sugerem o uso combinado do *Fuzzy*-AHP com *Fuzzy*-TOPSIS.

Embora os modelos baseados em *Fuzzy*-TOPSIS (EKMEKÇIOĞLU; KUTLU, 2012; KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012) tenham trazido contribuições significativas para a literatura deste tema, o uso combinado com *Fuzzy*-AHP para determinação dos pesos dos critérios pode implicar em limitações como: (1) dificuldade de garantir a consistência por meio de julgamentos comparativos, requerendo a realização de vários testes de consistência; (2) necessidade de uma quantidade maior de julgamentos, o que implica em investir mais esforços para coleta de dados; (3) possibilidade de obter pesos nulos para os critérios, o que faz com que as pontuações das falhas no critério com peso zero não sejam consideradas no cálculo do RPN. Vale ressaltar que as duas primeiras limitações apontadas também são válidas para modelos baseados em outras técnicas que requerem comparações pareadas entre os critérios e alternativas, como AHP (MALEKI; SAADAT, 2013) e ANP (CHEN, 2017).

O modelo proposto por Hajimolaali et al. (2017), que utiliza apenas o método *Fuzzy*-TOPSIS para avaliação dos pesos dos critérios e das pontuações das alternativas, não sofre dessas limitações. Entretanto, assim como os modelos desenvolvidos por Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) e Kutlu e Ekmekçioğlu (2012), considera apenas os três critérios tradicionalmente usados pelo FMEA, sem incluir os custos relacionados à falha. Portanto, o desenvolvimento do modelo proposto pelo presente estudo visa contornar essas limitações.

3.3 O Método *Fuzzy*-TOPSIS

3.3.1 Fundamentos do método

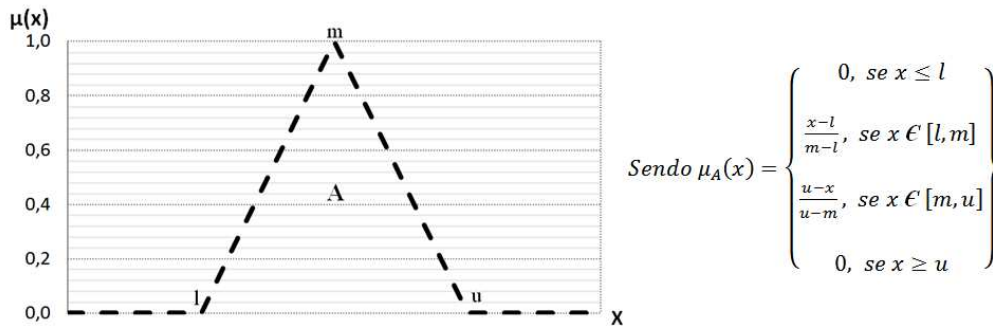
A teoria dos conjuntos *fuzzy* (*Fuzzy Set Theory* - FST) foi criada por Zadeh (1965) para permitir a modelagem de sistemas com categorias de elementos cujas fronteiras são consideradas incertas (LIMA JR.; CARPINETTI, 2015). Chen (2000) foi o primeiro a propor a combinação do método TOPSIS com FST, com o objetivo de adequar o TOPSIS para decisões em cenários de incerteza, caracterizados pela ausência de informações, dados imprecisos, variáveis qualitativas e julgamentos subjetivos. Lima Jr. e Carpinetti (2015) destacam que a adequação da FST a tais cenários está relacionada à lógica que define o grau de pertencimento dos elementos em conjuntos *fuzzy*. Um conjunto *fuzzy* é modelado por uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0.0, 1.0]$, que possibilita níveis parciais de pertinência. Enquanto na teoria dos conjuntos clássica cada conjunto é definido usando uma função característica $\mu_A(x): X \rightarrow \{0.0, 1.0\}$, na lógica *fuzzy* a função $\mu_A(x)$ inclui valores no intervalo contínuo $[0.0, 1.0]$. Dessa forma, considera-se a existência de níveis intermediários entre o "falso" ($\mu_A(x) = 0$) e o "verdadeiro" ($\mu_A(x) = 1$) (ZADEH, 1965; LIMA JR.; CARPINETTI, 2015; PEDRYCZ; GOMIDE, 2007).

No método *Fuzzy*-TOPSIS desenvolvido por Chen (2000), os julgamentos dos especialistas para quantificar a pontuação das alternativas e o peso dos critérios de decisão são modelados por variáveis linguísticas. Uma variável linguística é aquela cujos valores são sentenças definidas em linguagem natural ou artificial (ZADEH, 1973). Seu uso implica na escolha de um conjunto de termos linguísticos a fim de quantificar seus valores de maneira apropriada. Nesse sentido, ao realizar a análise de falhas usando FMEA e *Fuzzy*-TOPSIS, o valor da variável linguística "Severidade" pode ser medido por meio dos termos linguísticos "baixa", "média" e "alta".

Termos linguísticos são representados por números *fuzzy*, cuja função de pertinência pode possuir diferentes formatos, como triangular, sigmoidal ou trapezoidal. Como mostra a

Figura 5, um número *fuzzy* triangular pode ser escrito por meio de seus vértices (l, m, u), sendo que m representa um valor *crisp* central, l é o limite inferior e u é o limite superior. Os números triangulares são frequentemente utilizados devido a maior simplicidade nos cálculos envolvidos. Além disso, as funções do tipo triangular são mais sensíveis do que as funções trapezoidais para responder a variações nos valores de x (PEDRYCZ; GOMIDE, 2007; KAHARAMAN, 2008; LIMA JR.; CARPINETTI, 2015). Pedrycz e Gomide (2007) explicam que as operações algébricas envolvendo dois números triangulares são feitas em função dos valores de l, m e u . Portanto, para somar os números triangulares \tilde{A} e \tilde{B} , usa-se a Equação 2. A Equação 3 é aplicada para subtração, enquanto as equações 4 e 5 realizam as operações de multiplicação e divisão, respectivamente.

Figura 5 - Número *fuzzy* triangular



Fonte: Pedrycz e Gomide (2007)

$$\tilde{A} + \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] + [l_B, m_B, u_B] = [l_A + l_B, m_A + m_B, u_A + u_B] \quad (2)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] - [l_B, m_B, u_B] = [l_A - l_B, m_A - m_B, u_A - u_B] \quad (3)$$

$$\tilde{A} * \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] * [l_B, m_B, u_B] = [l_A * l_B, m_A * m_B, u_A * u_B] \quad (4)$$

$$\tilde{A} / \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] / [l_B, m_B, u_B] = [l_A/u_B, m_A/m_B, u_A/l_B] \quad (5)$$

3.3.2 Etapas do *Fuzzy-TOPSIS*

Baseando-se em Chen (2000) e Lima Jr. e Carpinetti (2015), as etapas do método *Fuzzy-TOPSIS* são descritas a seguir:

- i) Agregar os valores linguísticos de cada um decisores (DM_r), referentes às pontuações das alternativas, por meio da aplicação da Equação 6. Nessa equação, \tilde{x}_{ij}^r descreve a pontuação da alternativa A_i ($i = 1, \dots, n$), em relação ao critério C_j ($j = 1, \dots, m$), fornecida pelo decisor DM_r ($r = 1, \dots, k$). As avaliações relativas aos pesos dos critérios são agregadas usando a Equação 7, sendo que \tilde{w}_j^r descreve o peso de C_j de acordo com DM_r ;

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (6)$$

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad (7)$$

- ii) Usando os resultados obtidos na etapa anterior, deve-se montar a matriz de decisão \tilde{D} , contendo as pontuações agregadas das alternativas, assim como um vetor \tilde{W} para os pesos agregados dos critérios, conforme as equações 8 e 9, respectivamente;

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} & \dots & \tilde{x}_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nj} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (9)$$

iii) Efetuar a normalização dos valores da matriz \tilde{D} . A matriz normalizada \tilde{R} é calculada pela Equação 10, sendo que \tilde{r}_{ij} deve ser obtido por meio das equações 11 ou 12;

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right), \text{ sendo } u_j^+ = \max_i u_{ij} \text{ (critérios de benefício)} \quad (11)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right), \text{ sendo } l_j^- = \min_i l_{ij} \text{ (critérios de custo)} \quad (12)$$

iv) Obter a matriz poderada \tilde{V} , representada pela Equação 13. Os valores componentes dessa matriz são obtidos conforme a Equação 14, que realiza a multiplicação dos pesos \tilde{w}_j pelos elementos \tilde{r}_{ij} da matriz normalizada \tilde{R} ;

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (13)$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad (14)$$

v) Obter a solução ideal positiva *fuzzy* (*Fuzzy Positive Ideal Solution*, FPIS, A^+) e a solução ideal negativa *fuzzy* (*Fuzzy Negative Ideal Solution*, FNIS, A^-), como indicado nas equações 15 e 16. Seguindo Chen (2000), os valores componentes das soluções ideais podem ser definidos como $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ e $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$;

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad (15)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (16)$$

vi) Calcular D_i^+ , que indica a distância entre os valores de FPIS e as pontuações das alternativas. Analogamente, obter a distância D_i^- entre os valores de FNIS e as pontuações das alternativas. Para isso, aplica-se as Equações 17 e 18, nas quais $d(. , .)$ indica a distância entre dois números *fuzzy* conforme o método *vertex*. Nos casos em que são adotados números *fuzzy* do tipo triangular, deve-se aplicar a Equação 19 para obter os valores de $d(. , .)$;

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (17)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (18)$$

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2]} \quad (19)$$

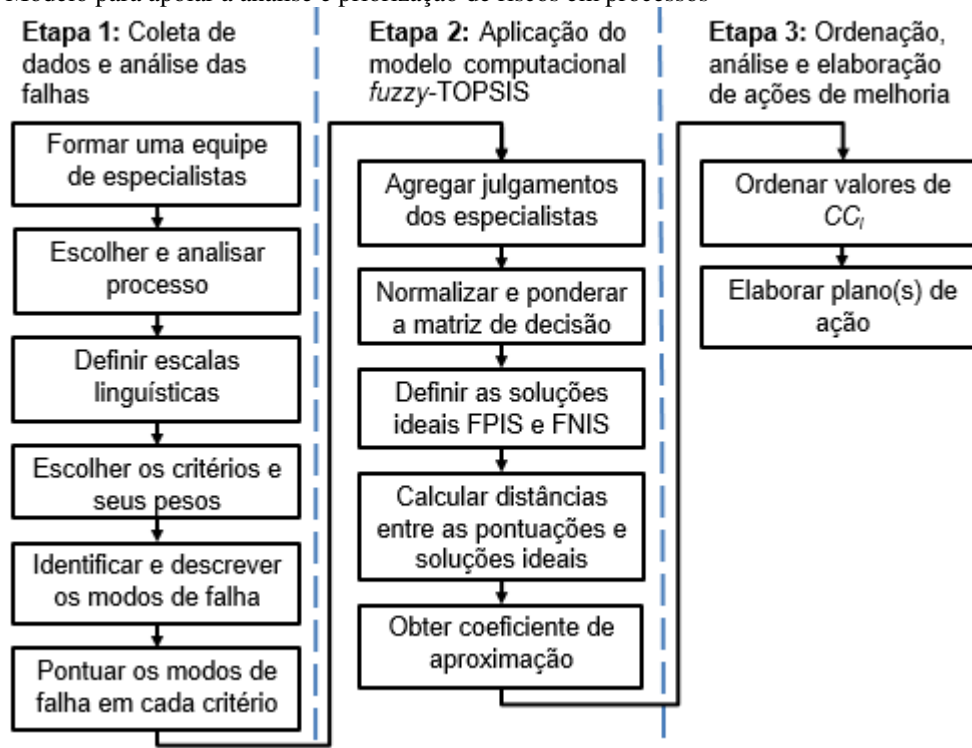
vii) Utilizando a Equação 20 e os valores de D_i^+ e D_i^- , deve-se calcular o coeficiente de aproximação CC_i , que representa o desempenho global de cada uma das alternativas avaliadas. Por fim, é necessário elaborar um ranqueamento das alternativas por meio da ordenação decrescente dos valores de CC_i . Quanto mais próximo de 1,0 for o valor de CC_i , melhor é o desempenho global da alternativa.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (20)$$

4. MODELO PROPOSTO PARA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM PROCESSOS

A Figura 6 apresenta o modelo proposto para apoiar a priorização de riscos em processos de produção. O modelo foi desenvolvido a partir da combinação entre o FMEA (CARPINETTI, 2016) e a técnica *Fuzzy*-TOPSIS (CHEN, 2000), sendo composto por três etapas principais. A etapa 1 se inicia com a formação de uma equipe multidisciplinar, composta de especialistas no processo sob estudo e de gestores da organização, os quais atuarão como tomadores de decisão (ou decisores). Dependendo da natureza do processo em estudo, essa equipe pode envolver profissionais ligados às áreas de engenharia, qualidade, suprimento, manufatura, entre outras. A primeira atribuição dos decisores é definir o escopo da aplicação, ou seja, escolher qual processo será analisado, explicitar sua função e analisar as atividades que o compõem. Por meio de sessões de *brainstorming* e análise da documentação e registros do processo, os decisores também devem identificar e descrever os modos de falhas potenciais ou conhecidos.

Figura 6 - Modelo para apoiar a análise e priorização de riscos em processos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na etapa 1, com base nas preferências dos especialistas e/ou em estudos da literatura, é necessário construir uma escala linguística *fuzzy* para pontuar as falhas e outra para os definir os pesos dos critérios. É de responsabilidade dos decisores escolher os critérios de avaliação das falhas, como também definir a importância relativa (peso) de cada um deles. Os critérios escolhidos devem estar relacionados a fatores capazes de mensurar o impacto das falhas para o cliente final e a organização como um todo. Tais critérios também devem estar associados aos fatores que direcionam a implementação de ações para eliminar ou mitigar os riscos envolvidos. Após a definição dos critérios, os decisores devem individualmente avaliar cada modo de falha descrito e atribuir as pontuações correspondentes a cada critério. Essa avaliação deve ser baseada na experiência dos decisores e demais informações disponíveis.

A etapa 2 segue o procedimento definido pelo método *Fuzzy*-TOPSIS (CHEN, 2000). Os valores atribuídos às falhas e os pesos dos critérios são inseridos no modelo computacional *Fuzzy*-TOPSIS. Inicialmente é feita a agregação dos julgamentos fornecidos pelos decisores. Enquanto a agregação das pontuações das falhas é realizada conforme a Equação 6, a agregação dos pesos dos critérios é realizada por meio da Equação 7. Deve-se normalizar e ponderar as

pontuações das falhas aplicando respectivamente as Equações 13 e 14, para então definir as soluções ideais positiva e negativa. Posteriormente, calculam-se as distâncias de cada pontuação das alternativas em relação aos valores de FPIS e FNIS por meio das Equações 17 e 18. Ao final dessa etapa, aplica-se a Equação 20 para obtenção dos coeficientes de aproximação CC_i que permitem a classificação dos modos de falhas.

Finalmente na etapa 3, classifica-se em ordem decrescente os valores de CC_i , criando um *ranking* no qual as alternativas com maior pontuação global representam os modos de falha mais indesejáveis. Portanto, com base nessa ordenação, as falhas são priorizadas a fim de desenvolver as ações necessárias para eliminar ou mitigar os principais riscos do processo sob análise. Após a implementação dessas ações, o modelo pode ser aplicado novamente para avaliar a efetividade das soluções desenvolvidas. Para isso, é necessário atribuir novas pontuações aos modos falhas, inserí-las no modelo computacional e ordenar os resultados.

4.1 Aplicação Piloto

O modelo foi aplicado em um processo de fusão e vazamento de uma empresa metalúrgica nacional, fornecedora de peças fundidas em ferro cinzento e nodular para o mercado automotivo. Essa empresa adota o FMEA como principal ferramenta de análise de riscos na fase inicial do desenvolvimento de seus processos. A equipe foi composta por quatro especialistas oriundos das áreas de engenharia, qualidade e produção. O processo de fusão e vazamento de ferro nodular utiliza como recurso um forno à indução e painéis refratários manuais suspensas em monovias. Esse processo está mapeado em um fluxograma e possui quatro etapas, as quais estão descritas em procedimentos auditáveis. A partir de uma sessão de *brainstorming* que envolveu a análise dos documentos e registros existentes sobre o processo, os decisores identificaram treze modos de falhas potenciais, listados na Figura 7.

Figura 7 - Modos de falha identificados para o processo sob análise

Etapas do processo	Modo de Falha
Fusão	(1) Erro de composição da carga metálica
Tratamento do metal	(2) Insuficiência de ligas metálicas
Limpeza do metal	(3) Deficiência na limpeza do banho;
Vazamento	(4) Erro na pesagem do banho
	(5) Deficiência de inoculação
	(6) Atraso do início do vazamento
	(7) Temperatura de forno abaixo do especificado
	(8) Deficiência no aquecimento da panela
	(9) Tempo de vazamento acima do especificado
	(10) Vazamento incompleto
	(11) Vazamento interrompido
	(12) Composição química fora do especificado
	(13) Tempo de <i>fading</i> excedido

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, os decisores escolheram os critérios considerando sua capacidade de identificar e medir o impacto dos modos de falhas. Os seguintes critérios (também entendidos aqui como fatores de risco) foram definidos: Custo (C), Gravidade (G), Frequência (F) e Controle (CO). O critério denominado Custo (C) foi selecionado a partir de Banduka et al. (2018). Esse fator está relacionado aos custos internos, associados a retrabalho, refugo, parada de linha, entre outros tipos de perdas, bem como aos custos externos, que incorrem quando a falha afeta o cliente final e resulta em gastos com garantias, ações judiciais, devoluções e/ou perda de participação do mercado. Os critérios Gravidade (G), Frequência (F) e Controle (CO) derivam do FMEA tradicional. As escalas linguísticas para avaliar os pesos dos critérios e as pontuações dos modos de falha foram definidas de acordo com Wang (2011) e Chen (2017). Seguindo Chen (2000), números triangulares *fuzzy* foram adotados para quantificar os termos linguísticos. A Figura 8 apresenta as escalas linguísticas desenvolvidas.

Figura 8 - Escalas lingüísticas para avaliação dos critérios e das alternativas

Avaliação dos pesos dos critérios				Avaliação das pontuações das alternativas			
Termo Linguístico		Número <i>fuzzy</i>		Termo Linguístico		Número <i>fuzzy</i>	
Muito Baixa Importância (MBI)	0,01	0,03	0,25	Muito Baixo (MB)	0,10	0,10	2,50
Baixa Importância (BI)	0,01	0,25	0,50	Baixo (B)	0,10	2,50	5,00
Média Importância (MI)	0,25	0,50	0,75	Moderado (M)	2,50	5,00	7,50
Alta Importância (AI)	0,50	0,75	1,00	Alto (A)	5,00	7,50	10,00
Muito Alta Importância (MAI)	0,75	1,00	1,00	Muito Alto (MA)	7,50	10,00	10,00

Fonte: Elaborado a partir de Wang (2011) e Chen (2017)

Usando as escalas apresentadas, os especialistas pontuaram cada um dos modos de falhas identificados. A Figura 9 mostra as pontuações lingüísticas dos modos de falhas em relação aos critérios avaliados, assim como os pesos destes critérios. Os decisores atribuíram os termos lingüísticos que melhor representam a condição real do processo, com base em seu conhecimento, experiência e outras informações disponíveis. Os termos lingüísticos foram convertidos em números *fuzzy* conforme a Figura 8. Esses valores foram agregados usando média aritmética *fuzzy*, de acordo com as equações 6 e 7, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Figura 9 – Julgamentos lingüísticos dos decisores

Falha	Decisor 1				Decisor 2				Decisor 3				Decisor 4			
	C	G	F	CO	C	G	F	CO	C	G	F	CO	C	G	F	CO
F1	MB	B	A	A	MB	B	M	M	B	B	M	M	MB	B	A	A
F2	M	A	B	A	M	A	B	A	M	MA	B	M	M	A	B	A
F3	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	B	B	M	M	M	A
F4	M	A	MB	MA	M	M	MB	A	M	M	M	B	M	M	MB	A
F5	M	A	M	B	B	M	B	M	B	M	M	M	M	A	M	B
F6	M	B	B	A	B	M	B	A	B	M	M	M	B	M	B	A
F7	M	A	B	A	M	A	B	MA	M	M	B	M	M	A	B	A
F8	B	B	B	A	B	B	B	M	MB	M	B	M	B	B	B	M
F9	M	MA	M	A	M	A	M	M	M	M	B	M	M	MA	M	A
F10	M	A	B	A	M	A	B	A	M	M	M	B	M	A	B	A
F11	M	M	B	B	M	M	B	B	M	M	B	B	M	M	B	B
F12	M	MA	M	M	M	A	M	M	M	MA	B	M	M	A	M	M
F13	M	MA	B	B	M	MA	B	M	M	MA	B	M	M	MA	B	B
Peso	MAI	AI	AI	MAI	AI	MAI	MAI	MAI	AI	AI	MI	AI	MAI	MAI	AI	MAI

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Matriz de decisão com pontuações agregadas e vetor de peso dos critérios

Falha	Custo (C)			Gravidade (G)			Frequência (F)			Controle (CO)		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
F1	0,10	0,70	3,13	0,10	2,50	5,00	3,75	6,25	8,75	3,75	6,25	8,75
F2	2,50	5,00	7,50	5,63	8,13	10,00	0,10	2,50	5,00	4,38	6,88	9,38
F3	2,50	5,00	7,50	2,50	5,00	7,50	1,90	4,38	6,88	2,53	5,00	7,50
F4	2,50	5,00	7,50	3,13	5,63	8,13	0,70	1,33	3,75	4,40	6,88	8,75
F5	1,30	3,75	6,25	3,75	6,25	8,75	1,90	4,38	6,88	1,30	3,75	6,25
F6	0,70	3,13	5,63	1,90	4,38	6,88	0,70	3,13	5,63	4,38	6,88	9,38
F7	2,50	5,00	7,50	4,38	6,88	9,38	0,10	2,50	5,00	5,00	7,50	9,38
F8	0,10	1,90	4,38	0,70	3,13	5,63	0,10	2,50	5,00	3,13	5,63	8,13
F9	2,50	5,00	7,50	5,63	8,13	9,38	1,90	4,38	6,88	3,75	6,25	8,75
F10	2,50	5,00	7,50	4,38	6,88	9,38	0,70	3,13	5,63	3,78	6,25	8,75
F11	2,50	5,00	7,50	2,50	5,00	7,50	0,10	2,50	5,00	0,10	2,50	5,00
F12	2,50	5,00	7,50	6,25	8,75	10,00	1,90	4,38	6,88	2,50	5,00	7,50
F13	2,50	5,00	7,50	7,50	10,00	10,00	0,10	2,50	5,00	1,30	3,75	6,25
Peso	0,63	0,88	1,00	0,63	0,88	1,00	0,50	0,75	0,94	0,69	0,94	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os números *fuzzy* mostrados na Tabela 2 foram normalizados considerando as particularidades de cada critério. Do ponto de vista da modelagem, Custo (C), Gravidade (G) e Frequência (F) foram normalizados como critérios de benefício (Equação 11), uma vez que

quanto maior for a pontuação de uma falha nestes critérios, maior será o seu RPN. No caso do critério Controle (CO), uma pontuação elevada indica que já existem mecanismos para monitoramento e mitigação dos riscos, o que implica em um RPN mais baixo. Portanto, aplicou-se a Equação 12. Após a normalização, ponderou-se a matriz de decisão por meio da Equação 14, que multiplica os valores normalizados pelos respectivos pesos agregados. A matriz normalizada e ponderada é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz com valores normalizados e ponderados

Falha	Custo (C)			Gravidade (G)			Frequência (F)			Controle (CO)		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
F1	0,01	0,08	0,42	0,01	0,22	0,50	0,21	0,54	0,94	0,01	0,02	0,03
F2	0,21	0,58	1,00	0,35	0,71	1,00	0,01	0,21	0,54	0,01	0,01	0,02
F3	0,21	0,58	1,00	0,16	0,44	0,75	0,11	0,38	0,74	0,01	0,02	0,04
F4	0,21	0,58	1,00	0,20	0,49	0,81	0,04	0,11	0,40	0,01	0,01	0,02
F5	0,11	0,44	0,83	0,23	0,55	0,88	0,11	0,38	0,74	0,01	0,03	0,08
F6	0,06	0,36	0,75	0,12	0,38	0,69	0,04	0,27	0,60	0,01	0,01	0,02
F7	0,21	0,58	1,00	0,27	0,60	0,94	0,01	0,21	0,54	0,01	0,01	0,02
F8	0,01	0,22	0,58	0,04	0,27	0,56	0,01	0,21	0,54	0,01	0,02	0,03
F9	0,21	0,58	1,00	0,35	0,71	0,94	0,11	0,38	0,74	0,01	0,02	0,03
F10	0,21	0,58	1,00	0,27	0,60	0,94	0,04	0,27	0,60	0,01	0,02	0,03
F11	0,21	0,58	1,00	0,16	0,44	0,75	0,01	0,21	0,54	0,01	0,04	1,00
F12	0,21	0,58	1,00	0,39	0,77	1,00	0,11	0,38	0,74	0,01	0,02	0,04
F13	0,21	0,58	1,00	0,47	0,88	1,00	0,01	0,21	0,54	0,01	0,03	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

As soluções ideais positivas *fuzzy* (FPIS) e as soluções ideais negativas *fuzzy* (FNIS) foram definidas de acordo com Chen (2000) para cada um dos critérios. Utilizando as equações 15 e 16, obteve-se $A^+ = [(1,0, 1,0, 1,0), (1,0, 1,0, 1,0), (1,0, 1,0, 1,0), (1,0, 1,0, 1,0)]$ e $A^- = [(0,0, 0,0, 0,0), (0,0, 0,0, 0,0), (0,0, 0,0, 0,0), (0,0, 0,0, 0,0)]$. A distância entre as pontuações de cada alternativa em relação à FPIS (D^+) foi calculada por meio da Equação 17. Em seguida, obteve-se a distância relativa à FNIS (D^-) pela Equação 18. Os resultados dos cálculos das distâncias individuais em cada critério (colunas 2 a 5 e 7 a 10) e da soma destas distâncias (colunas 6 e 11) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Distâncias positivas e negativas em relação a FPIS e FNIS

Falha	Critérios				D^+	Critérios				D^-
	(C)	(G)	(F)	(CO)		(C)	(G)	(F)	(CO)	
F1	0,49	0,45	0,30	0,57	1,82	0,14	0,14	0,16	0,18	0,62
F2	0,30	0,24	0,45	0,57	1,55	0,39	0,40	0,43	0,43	1,65
F3	0,30	0,35	0,37	0,56	1,58	0,39	0,39	0,37	0,29	1,44
F4	0,30	0,32	0,48	0,57	1,67	0,39	0,39	0,38	0,32	1,48
F5	0,36	0,30	0,37	0,56	1,58	0,32	0,32	0,34	0,35	1,33
F6	0,39	0,37	0,42	0,57	1,75	0,28	0,28	0,28	0,27	1,11
F7	0,30	0,28	0,45	0,57	1,59	0,39	0,40	0,40	0,38	1,57
F8	0,44	0,43	0,45	0,57	1,88	0,21	0,21	0,22	0,21	0,84
F9	0,30	0,24	0,37	0,57	1,48	0,39	0,40	0,43	0,41	1,63
F10	0,30	0,28	0,42	0,57	1,57	0,39	0,40	0,40	0,38	1,57
F11	0,30	0,35	0,45	0,46	1,56	0,39	0,39	0,37	0,29	1,44
F12	0,30	0,22	0,37	0,56	1,45	0,39	0,41	0,44	0,44	1,68
F13	0,30	0,18	0,45	0,56	1,49	0,39	0,42	0,47	0,47	1,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o coeficiente de aproximação CC_i de cada alternativa foi gerado pela Equação 20. Esses valores representam a pontuação global de cada falha, indicando assim o nível de prioridade de risco. Como mostra a Tabela 5, os valores dos coeficientes de aproximação foram ordenados do maior para o menor obtendo-se, assim um ranqueamento que permite orientar a tomada de decisão sobre os riscos mais nocivos ao processo e dar suporte à elaboração de planos de ação.

Tabela 5 - Resultado do ranqueamento dos modos de falha

Classificação	CC _i	Modo de falha
1º	0,540	F13 Tempo de <i>fading</i> excedido
2º	0,536	F12 Composição química fora do especificado
3º	0,525	F9 Tempo de vazamento acima do especificado
4º	0,514	F2 Insuficiência de ligas metálicas
5º	0,501	F10 Vazamento incompleto
6º	0,496	F7 Temperatura de forno abaixo do especificado
7º	0,481	F11 Vazamento interrompido
8º	0,477	F3 Deficiência na limpeza do banho;
9º	0,471	F4 Erro na pesagem do banho
10º	0,457	F5 Deficiência de inoculação
11º	0,387	F6 Atraso do início do vazamento
12º	0,308	F8 Deficiência no aquecimento da panela
13º	0,255	F1 Erro de composição da carga metálica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos foram endossados pelos especialistas da empresa. Segundo eles, a falha F13 (tempo de *fading* excedido), classificada como prioritária, afeta drasticamente as propriedades mecânicas das peças, fazendo com que os lotes produzidos tenham que ser descartados. Caso alguma unidade defeituosa chegue ao cliente, os riscos associados serão muito elevados. Já a falha F1 (erro de composição da carga metálica), recebeu o menor valor de CC_i , sendo assim considerada a de menor prioridade. De acordo com os especialistas, isso é justificado pelo fato de que esta falha pode ser detectada e corrigida durante a operação, a partir de mecanismos já existentes na empresa. Portanto, os especialistas devem prioritariamente focar no desenvolvimento de ações para mitigar os riscos referentes ao tempo de *fading*. Se houver recursos suficientes, também devem investir esforços na elaboração e implantação de planos de ação relacionados às falhas F12 (composição química fora do especificado), F9 (tempo de vazamento acima do especificado), F2 (insuficiência de ligas metálicas), F10 (vazamento incompleto), e assim por diante.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo apresentou uma nova abordagem para apoiar a análise e priorização de riscos em processos de produção industrial. O modelo de decisão proposto combina o FMEA com o método *Fuzzy-TOPSIS* desenvolvido por Chen (2000). Uma aplicação do modelo foi feita em um processo metalúrgico com a participação de quatro especialistas. Os resultados sugerem que a falha F13 “tempo de *fading* excedido” seja tratada com maior prioridade. As saídas do modelo fornecem subsídios para formulação e implantação de planos de ação focados na minimização ou eliminação das falhas prioritárias.

A abordagem proposta é uma alternativa para contornar todas as limitações do FMEA descritas na Figura 3. Nesse sentido, algumas das contribuições deste estudo para a análise e priorização de riscos em processos são: (1) possibilidade de considerar os pesos (nível de importância) dos diferentes critérios; (2) utilização de termos linguísticos para expressar os julgamentos dos decisores, possibilitando apoiar decisões em cenários de incerteza; (3) permite considerar outros fatores de risco, além daqueles tradicionalmente usados no FMEA; (4) suporte à tomada de decisão em grupo, de modo a considerar o conhecimento e a experiência de especialistas oriundos de diferentes áreas. Quando comparado aos modelos multicritério propostos por Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) e Kutlu e Ekmekçioğlu (2012), que utilizam *Fuzzy-TOPSIS* para avaliação dos modos de falha, porém aplicam o *Fuzzy-AHP* para determinação dos pesos, o modelo proposto requer uma quantidade menor de julgamentos dos especialistas para avaliação dos pesos. Além disso, o procedimento de determinação dos pesos é mais simples, fácil de compreender, não requer testes de consistência nem gera pesos nulos para os critérios. Outra contribuição é que, diferentemente da ampla maioria dos modelos mostrados na

Figura 4, este estudo considera os custos internos e externos das falhas como um fator determinante na priorização destas.

Estudos futuros podem aplicar o modelo em empresas de outros setores industriais para priorização de riscos de falhas potenciais e/ou conhecidas. Também pode ser adaptado para análise de riscos em empresas de serviços, de modo a considerar critérios específicos para este ambiente, tais como a existência de mecanismos para recuperação de clientes. Além da análise de falhas em processos, o modelo pode ser aplicado para analisar outros tipos de riscos, incluindo acidentes de trabalho. Embora a implementação computacional em MS Excel contribua para transparência dos cálculos e facilite a replicação, o modelo também pode ser implementado na forma de *software* com interface gráfica para promover sua usabilidade. Sobre as limitações da proposta, uma vez que o modelo é voltado para situações de incerteza, não é possível utilizar valores numéricos exatos (como número de falhas expressos em ppm) como pontuações de entrada. Outra limitação deste estudo consiste em ter utilizado apenas quatro critérios para análise das falhas, ainda que esta tenha sido uma escolha dos decisores. Estudos futuros podem considerar critérios relacionados a impactos ambientais e outros fatores de risco relevantes para o ambiente de aplicação.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, M.; MOLANA, S.M.H.; SAJADI, S.M. A hybrid FMEA-TOPSIS method for risk management, case study: Esfahan Mobarakeh Steel Company. **International Journal of Process Management and Benchmarking**, v. 7, n. 3, p. 397-408, 2017.
- AVEN, T. Selective critique of risk assessments with recommendations for improving methodology and practise. **Reliability Engineering & System Safety**, v.96, p.509-514, 2011.
- AVEN, T.; RENN, O. On risk defined as an event where the outcome is uncertain. **Journal of risk research**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2009.
- BANDUKA, N.; TADIĆ, D.; MAČUŽIĆ, I.; CRNJAC, M. Extended process failure mode and effect analysis (PFMEA) for the automotive industry: The FSQC-PFMEA. **Advances in Production Engineering & Management**, v. 13, n. 2, p. 206-215, 2018.
- BERTRAND, J.; FRANSOO, J.C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BOZDAG, Erhan et al. Risk prioritization in Failure Mode and Effects Analysis using interval type-2 fuzzy sets. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 8, p. 4000-4015, 2015.
- CARPINETTI, L.C.R. **Gestão da qualidade: conceitos e técnicas**. 3 ed. Gen-Atlas, 2016.
- CERTA, A.; ENEA, M.; GALANTE, G.M.; LA FATA, C.M. ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number. **Computers & Industrial Engineering**, v. 108, p. 100-110, 2017.
- CHANG, K.; CHANG, Y.; TSAI, I. Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 211-224, 2013.
- CHEN, C. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy sets and systems**, v. 114, n. 1, p. 1-9, 2000.
- CHEN, J. Prioritization of corrective actions from utility viewpoint in FMEA application. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 4, p. 883-894, 2017.
- EKMEKÇIOĞLU, M.; KUTLU, A. A fuzzy hybrid approach for fuzzy process FMEA: An application to a spindle manufacturing process. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 5, n. 4, p. 611-626, 2012.
- GARCÍA, A.; GILABERT, E. Mapping FMEA into Bayesian networks. **International Journal of Performability Engineering**, v. 7, n. 6, p. 525-537, 2011.

GUARNIERI, P. Síntese dos principais critérios, métodos e subproblemas da seleção de fornecedores multicritério. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 19, p. 1-25, 2015.

HAJIMOLAALI, M.; KEBRIAEZADEH, A.; ABDOLLAHIASL, A.; SAFARI, H.; YEKTADOOST, A. A new approach in identifying and evaluating quality risks in the pharmaceutical industry. **Journal of Pharmaco economics and Pharmaceutical Management**, v. 3, n. 1/2, p. 17-20, 2017.

HAQ, I.; IZHAR, K.; ANWAR, S.; KHAN, M.; AHMED, B.; MAQSOOD, S. Fuzzy logic based failure mode and effect analysis of automotive powertrain assembly systems. **Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila, 20 (SI)**, p. 57-64, 2015.

KAHRAMAN, C. (Org.) Fuzzy Multicriteria Decision Making - Theory and Applications with Recent Developments. 1 ed. Springer Science: Turkey, 2008.

KUTLU, A.; EKMEKÇIOĞLU, M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 1, p. 61-67, 2012.

LIMA JR., F.R.; CARPINETTI, L.C.R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 1, p. 17-34, 2015.

LIMA JR., F.R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L.C.R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 781-801, 2013.

LIU, H.; LIU, L.; BIAN, Q.; LIN, Q.; DONG, N.; XU, P. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 4403-4415, 2011.

LIU, H.; LIU, L.; LIU, N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert systems with applications**, v. 40, n. 2, p. 828-838, 2013.

MAHMOODI, A. M.; MIRZAZADEH, A. A New Analysis of Failure Models and Effects by Fuzzy Todim with using Fuzzy Time Function. **International Journal of Fuzzy Logic System**, v. 4, n. 2, p. 7-21, 2014.

MALEKI, H.; SAADAT, Y. Comparison of failure mode and effects analysis by using AHP vs. REMBRANDT system. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 14, n. 1, p. 5-19, 2013.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing**. John Wiley & Sons, 2007.

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

TIXIER, J.; DUSSERE, G.; SALVI, O.; GASTON, D. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. **Journal of Loss Prevention in the process industries**, v. 15, n. 4, p. 291-303, 2002.

WANG, C. H. A novel approach to conduct risk analysis of FMEA for PCB fabrication process. *In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. IEEE, 2011. p. 1275-1278.

XIAO, N.; HUANG, H.; LI, Y.; HE, L.; JIN, T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. **Eng. Failure Analysis**, v.18, p.1162-1170, 2011.

XU, K.; TANG, L.C.; XIE, M.; HO, S.L.; ZHU, M.L. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 75, n. 1, p. 17-29, 2002.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics**, v. 3, p. 28-44, 1973.

ZHAO, H.; YOU, J.; LIU, H. Failure mode and effect analysis using MULTIMOORA method with continuous weighted entropy under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. **Soft Computing**, v. 21, n. 18, p. 5355-5367, 2017.