INTEGRAÇÃO DO FMECA E ESTRATÉGIAS DO PILAR DE SEGURANÇA NO WORLD-CLASS MANUFACTURING ATRAVÉS DO MÉTODO FTOPSIS-CLASS

Naiara Meireles de Souza
Faculdade de Tecnologia de Sinop e UFPE
Estrada Claudete, 442a, Sinop - MT, CEP 78555-810
naiara@greefo.org.br

Diana Cavalcanti de Melo Souza
Unilever Industrial
Unilever Industrial Igarassu, Igarassu - PE
diana.cavalcanti@unilever.com

Adiel Teixeira de Almeida Filho
Centro de Informática - Universidade Federal de Pernambuco
Av. Jornalista Anibal Fernandes, Recife - PE, CEP 50740-560
adielfilho@cin.ufpe.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo multicritério para integrar o FMECA em conjunto com o pilar de segurança do World Class Manufacturing (WCM). Para considerar todos os critérios em conjunto, é utilizada uma variante do método TOPSIS para estabelecer prioridades nos planos de ações de acordo com o grau de risco de cada setor industrial. Propomos considerar indicadores de desempenho já utilizados no pilar de segurança do programa WCM através de uma abordagem similar ao número de prioridade de risco (RPN). O método multicritério utilizado, FTOPSIS-Class, pondera avaliações linguísticas de especialistas para classificar cada setor industrial de acordo com seu nível de risco. Para ilustrar o modelo proposto, é apresentado um estudo de caso com dados reais de uma planta industrial que tem o Programa WCM implantado. Os resultados obtidos permitiram identificar setores industriais com os maiores riscos de segurança e dar suporte ao programa de melhoria.

PALAVRAS CHAVE. WCM, FMECA, Segurança, TOPSIS. MCDM.

Tópicos (WCM; Segurança; Apoio Multicritério a Decisão)

ABSTRACT

This work presents a multicriteria model for integrating FMECA within WCM Program's safety pillar. To consider all criteria, a TOPSIS based method was used to establish priority on the action plan according to the risk level of each industrial plant area. We propose to consider performance indicators already used in the safety pillar of the WCM Program through a risk priority number (RPN) based approach. The multicriteria method used, FTOPSIS-Class, considers expert linguistic assessments to sort each industrial sector according to its level of risk. To illustrate the proposed model, a case study using real-world data from an industrial plant that adopts the WCM Program. The results obtained enabled identify the industrial areas with the greatest safety risk level for supporting the improvement program.

KEYWORDS. WCM. FMECA. Safety. TOPSIS. MCDM.

Paper topics (WCM; Safety; Multi Criteria Decision Making)

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

A análise de modo de falha, efeitos e criticidade (FMECA) derivou da análise de modo de falha e efeitos (FMEA) e são classificas como técnicas de engenharia que podem ser praticas nas áreas de qualidade, manutenção, análise de risco e segurança, bem como em melhorias de processos industriais [Animah e Shafiee 2020], [Kim e Zuo 2018], [Wang et al. 2020]. Uma revisão da literatura sobre o uso de abordagens de apoio a tomada de decisão multicritério (MCDA) associada ao FMEA foi realizada por Liu et al. [2019], permitindo uma análise mais ampla considerando outros critérios.

O termo WCM foi desde seu início categorizado como uma bússola de melhoria contínua [Schonberger 1982, 1984, 1986] e ordenada quanto a redução de desperdícios e perdas, envolvendo as pessoas e buscando o desenvolvimento de competências [Yamashina e Kubo 2002]. Em 2005, Hajime Yamashina, juntamente a Fiat Automóveis e empresas parceiras desenvolveram o "Programa WCM", fundamentado em pilares técnicos e gerenciais [Chiarini e Vagnoni 2015].

Dentre os dez pilares técnicos do Programa WCM, a segurança é o primeiro pilar técnico desenvolvido e um dos mais importantes, coincidindo com uma série de filosofias e princípios de gestão de engenharia industrial voltadas aos fatores humanos [Vukadinovic et al. 2019]. Dentro de instalações industriais diversas estratégias de segurança são implementadas, incluindo manufaturas de classe mundial, como as world-class manufacturing (WCM) [Ansari e Modarress 1997], permitindo que índices de desempenho chave (KPIs) possam ser considerados em abordagens MCDA.

Os métodos MCDA pode ser utilizados de acordo com a finalidade, podendo esta ser de escolha de uma alternativa [de Almeida-Filho et al. 2017] ou classificação dessas alternativas [de Lima Silva e de Almeida Filho 2020], [Ferreira et al. 2018], [Silva et al. 2020]. Os fins gerais de decisão foram definidos como "problemáticos", a partir de quando eles costumam ser usados para classificar os métodos MCDA [Roy 1996]. E embora exista uma ampla literatura relacionada ao MCDA e FMEA [Liu et al. 2019], poucas pesquisas foram realizadas conectando MCDA e WCM. Por outro lado, ao levar em consideração o pilar de segurança do Programa WCM e MCDA, até onde se sabe, nenhum estudo usou FMECA e MCDA de modo integrado no contexto de um gerenciamento industrial.

O método MCDA escolhido para classificação de risco neste estudo é o FTOPSIS-Class, baseado em variáveis linguísticas e concebido por Ferreira et al. [2018]. Neste sentido, este estudo visa apresentar uma abordagem integrando MCDA e FMECA para avaliação de segurança e fornecer um processo de tomada de decisão estruturada para o pilar de segurança considerando as premissas do Programa WCM, bem como demonstrar uma aplicação do modelo proposto utilizando dados reais coletados de planta industrial que tem o Programa WCM já implementado.

2. Referencial teórico

2.1 Programa WCM e o pilar de Segurança

Ao longo de quase quatro décadas, princípios como Total Quality Management (TQM), Total Industrial Engineering (TIE), Total Production Maintenance (TPM), Lean Manufacturing (LM) e Six Sigma (SS), System Management (SM) etc. foram sendo incorporados e combinados as concepções do World-Class Manufacrtuing (WCM) ou Manufatura de Classe Mundial [De Felice et al. 2013, 2019], [Petrillo et al. 2019] e [Satolo et al. 2018].

A WCM ou Manufatura de Classe Mundial configura-se como um sistema de manufatura integrado e ordenado que envolve processos e toda organização, do topo ao chão de fábrica [Yamashina e Kubo 2002]. Por meio de princípios, pilares técnicos e gerenciais, métodos e ferramentas o programa WCM visa aumentar o nível dos serviços, do overall equipment effectiveness (OEE) de equipamentos e máquinas, da produtividade com a melhor qualidade possível [De Felice et al. 2013] e [Flynn et al. 1997].

O Programa WCM implementado pela Fiat Group Automomobiles, parceiros e Hajime Yamashina, foi redesenhado e implementado por meio de duas linhas de ações, pilares gerenciais

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

e técnicos. Os pilares técnicos são: segurança (safety - SAF), cost deployment (CD), focused improvement (FI), autonomous maintenance (AM) e workplace organization (WO), professional maintenance (PM), quality control (QC), logistics e customer service (LCS), early equipment management (EEM) and early product management (EPM), people development (PD), environment (ENV) and energy (E) [Giovando et al. 2017].

Cada pilar técnico tem um modo de operação e etapas a serem desempenhadas para melhoria progressiva. Cada etapa detém de um grupo de ferramentas designadas para cada situação e abordagem, que pode ser reativa, preventiva e proativa [Yamashina 2000].

Na literatura, o pilar de safety foi abordado juntamente com o de qualidade por Kukla [2016], conforme as premissas do WCM e MCDA, em processos de fabricação de ferro fundido, de controle de qualidade e pós-usinagem de moldes de ferro produzidos em linhas de fundição automáticas.

No Programa WCM a segurança é o primeiro e principal pilar técnico, foco deste trabalho, vista como elemento-chave para que haja melhoria constante do ambiente de trabalho através da eliminação de condições e atos inseguros [Kukla 2016].

De tal forma, existem vários KPI que servem como métricas dentro do pilar de segurança, no Programa WCM, além dos key activity indicators (KAI), que estão ligadas as atividades que devem ser realizadas conforme a definição de cada KPI. Segundo De Felice et al. [2013], os critérios ou KPIs principais do pilar de segurança são: fatalidade (FA), acidente com afastamento (LTA), caso de trabalho restrito (RWC), caso de tratamento médico (MTC), caso de primeiros socorros ou incidentes (FAC ou FAI), quase acidente ou near miss (NM), condição insegura (UC) e ato inseguro (UA).

Fatalidade pode ser definido como um acidente, desastre ou doença ocupacional que resulta em morte. LTA refere-se ao acidente sofrido no trabalho resultando em absenteísmo ou atraso na carga de trabalho normal realizada. RWC configura-se na restrição de execução de funções normais devido alguma lesão ou doença ocupacional, culminando na transferência temporária de função. MTC significa doença ou lesão causada ao trabalhador que seja necessário assistência médica, mas que não resulte em um RWC ou LTA. FAC consiste na prestação de cuidados médicos básicos a alguém que tenha sofrido uma doença súbita ou lesão no local de trabalho. NM é definido como um incidente que consiste em uma ocorrência não planejada e que poderia ter levado a um acidente. UC significa um perigo, risco ou um ambiente físico ou mecânico que é ou está inseguro. UA consiste no comportamento de uma pessoa que se desvia do método de segurança que deveria ser desempenhado [Michaud 1995] e [Stranks 2002].

Atos e condições inseguras (UA e UC) são considerados os principais responsáveis por acidentes de trabalho em todo o mundo, uma vez que a maior parte dos acidentes são causados por erros humanos [Karwowski e Salvendy 2010].

As atividades preliminares para implementação total do pilar de SAF devem seguir sete etapas e as principais ferramentas utilizadas dentro do pilar de segurança para gestão e tratativas de acidentes ou incidentes, baseadas no WCM Program, são Matriz de segurança (Matriz S), Cruz Verde ou de Segurança, Safety Emergency Work Order (SEWO), Pirâmide de Heinrich, Auditoria Smart e Safety Tag [Chiarini e Vagnoni 2015].

Tradicionalmente, o Programa WCM tem como abordagem priorizar tratativas a partir de uma área modelo (a mais crítica) e depois estender a toda a empresa [De Felice et al. 2013].

2.2. FMECA

O FMECA derivou-se do FMEA e seu desenvolvimento foi atribuído, em 1960, a indústria aeroespacial devido a necessidade de confiabilidade e segurança [Bowles e Peláez 1995], assim como, em 1980, ao uso militar por meio de padrões, como o MIL - STD - 1629A [Washington, 1980]. Desde então, o FMECA vem sendo utilizado como ferramenta de auxílio a segurança e a confiabilidade de produtos em indústrias em geral.

Dentro de um sistema ou processo de fabricação, existem vários componentes que são,

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

individualmente, responsáveis pelo comportamento do sistema. Cada possível modo de falha destes componentes implica diretamente no funcionamento do sistema. Portanto, avaliar os efeitos é importante para redução ou mitigação dos modos de falhas. Já a criticidade prioriza corrigir as falhas em ações corretivas baseadas na probabilidade do modo de falha de um item e na gravidade de cada efeito [Erozan, 2019].

De acordo com Bowles e Peláez [1995], no FMECA, a avaliação de criticidade pode ser realizada pelo desenvolvimento de um número de prioridade de risco (RPN) ou pelo cálculo de um número de criticidade de um item.

Tradicionalmente, o RPN utiliza termos linguísticos para classificar a gravidade (S) do efeito do modo de falha, a probabilidade de ocorrência (O) do modo de falha e a probabilidade de falha ser detectada (D) em uma escala numérica de 1 a 10 [Dong 2007]. Já para Abdelgawad e Fayek [2010] o valor do RPN (S x O x D) obtido podem variar de 1 a 1000.

Entretanto, autores observaram que o RPN não considerada potenciais julgamentos quanto à importância da gravidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) [Puente et al. 2002].

Por isso, Xu *et al.* [2002] ressaltaram a dificuldade de utilizar valores numéricos para medir a ocorrência do modo de falha e criaram argumentos sobre a vantagem de utilizar outros métodos que pudessem apoiar a avaliação linguística dos modos de falha.

2.3 FTOPSIS-Class

A obtenção de pesos em decisões multicritério explana a importância relativa de cada critério, podendo ser dividida, segundo Liu et al. [2019], em abordagens subjetiva, objetiva e integrada.

Em problemas de fuzzy multiple criteria decision making (FMCDM) as classificações e os pesos são geralmente expressos em termos linguísticos e depois traduzidos em números fuzzy [Vahdani e Zandieh 2010].

Ressalta-se que a lógica clássica foi desenvolvida por Aristóteles e através desses conceitos os primeiros elementos relacionados a lógica fuzzy foram desenvolvidos por Jan Lukasiewic que adentrou conjuntos com grau de pertinência com valores entre 0 e 1 [Read 2015].

Desta forma, a lógica fuzzy (FL) também pode ser entendida como uma computação com palavras (CW), uma vez que a FL exerce um papel fundamental na CW por unir elementos da lógica clássica com a FL [Zadeh 1996].

O TOPSIS (técnica para a Preferência de Ordem por Similaridade à Solução Ideal), técnica que tem funcionado de modo satisfatório em diversas áreas de aplicação, incorporou elementos da CW e se baseou na avaliação da solução ideal e não ideal (solução negativa) [Behzadian et al. 2012].

Dando continuidade a esta lógica, o FTOPSIS – Class derivou do TOPSIS tradicional, que foi criado por Hwang e Yoon [1981] e de sua versão fuzzy, o FTOPSIS [C.-T. Chen 2000]. Existem versões mais recentes do método TOPSIS para classificação, como o TOPSIS-Sort-B e TOPSIS-Sort-C [de Lima Silva e de Almeida Filho 2020], PDTOPSIS-Sort [Silva et al. 2020], TOPSIS-R [Aires e Ferreira, 2019], no entanto, apenas o FTOPSIS-Class considera variáveis linguísticas para classificação.

3. O modelo proposto

3.1 Algoritmo: FTOPSIS-Class

A ampliação do TOPSIS tradicional para o FTOPSIS-Class seguiu o julgamento de que uma pontuação de uma alternativa $i \in I$ em um perfil $p \in P$ é o coeficiente de proximidade CC_i^p, avaliado com base nas distâncias da alternativa *i* à solução ideal do perfil p ($A_i^* = [\tilde{v}_{pi}^*]_m$) e à solução não ideal do perfil p ($A_i^- = [\tilde{v}_{qi}^-]_m$). Estas soluções, positivas e negativas, do perfil p precisam ser avaliadas usando a matriz $\tilde{Q} = [\tilde{q}_{pj}]|P| \times n$, uma vez que $\tilde{q}_{pj}$ caracteriza-se como termo linguístico ou CW relacionado a menção principal para classificar o perfil p no critério

de avaliação j. Adverte-se que, as avaliações da matriz $\tilde{Q}$ necessite ser definido por especialista [Ferreira et al. 2018].

De tal modo, um problema de decisão deve ser estruturado através de um conjunto de alternativas $A = \{A_1,\ A_2, \dots, A_m\}$ e de critérios $C = \{C_1,\ C_2, \dots, C_n\}$, assim como por meio da identificação de quem será o tomador de decisão [de Almeida et al. 2015].

Os passos do FTOPSIS-Class, de acordo com o modelo desenvolvido por Ferreira et al. [2018], são:

Passo 1: Escolher os termos para cálculo da importância relativa dos critérios, bem como para calcular a classificação $(\tilde{R})$ das alternativas;

Passo 2: Arquitetar e normalizar a matriz de decisão, como tentativa de transformar as várias extensões dos critérios, permitindo os compará-los. Tal como a equação abaixo, onde cada critério possui a mesma unidade do vetor:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (1)$$

Passo 3: Para construção da matriz de decisão normalizada, deve-se:

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{mxn}\ from\ \tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}] and\ \tilde{W} = [\tilde{w}_{ij}] as\ \tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \otimes \tilde{w}_{ij} \quad (2)$$

Passo 4: Deve-se supor que o problema de decisão implique em: $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]\ m \times n$. Assim, para cada perfil $p = 1, 2, 3, \dots, |P|$, necessita ser realizado os seguintes passos:

Passo 5: Deve ser definido a solução ideal positiva em relação ao perfil p como $\check{A}_p^* = \{\tilde{v}_{p1}^*, \tilde{v}_{p2}^*, \tilde{v}_{p3}^*, \dots, \tilde{v}_{pn}^*\}$, onde $\tilde{v}_{pj}^* = \tilde{q}_{pj}$, já que a finalidade do modelo é maximizar a adequação da alternativa i em relação à classe p, tornando mínima a distância entre $\tilde{A}_q^*$ e as estimativas de referência de cada classe;

Passo 6: Deve ser definido a solução ideal negativa em relação à classe p como $\tilde{A}_p^- = \{\tilde{v}_{p1}^-, \tilde{v}_{p2}^-, \tilde{v}_{p3}^-, \dots, \tilde{v}_{pn}^-\}$, onde $\tilde{v}_{pj}^-$ são as estimativas de pj do perfil mais distante de p;

Passo 7: Avaliar as distâncias de cada alternativa i em relação à classe p, como é apresentado nas Equações 3 e 4:

$$\tilde{d}_i^* = \sum_{j=1}^{n} \delta(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_{pj}^*), i = 1,2,3, \dots, m. \quad (3)$$

$$\tilde{d}_i^- = \sum_{j=1}^{n} \delta(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_{pj}^-), i = 1,2,3, \dots, m. \quad (4)$$

Passo 8: Calcular o coeficiente de proximidade de cada alternativa i em relação ao perfil p, conforme feito na Equação 5:

$$CC_i^p = \frac{\tilde{d}_i^{p-}}{\tilde{d}_i^{p*} + \tilde{d}_i^{p-}}, i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (5)$$

Passo 9: Para cada alternativa i é possível encontrar a classe $\tilde{p}_i^* = argamax_{p \in P}\ \{CC_i^p\}$. Logo, p_i^* é a classe com maior valor de i.

3.2 Termos linguísticos

É importante destacar que a FL desempenhada no FTOPSIS – Class é o Fuzzy Trapezoidal que originou do fato de existir pontos cujo grau de aderência é no máximo 1 ($\propto = 1$), sendo um número fuzzy ($\tilde{A}$) apresentado como qualquer subconjunto fuzzy de um número real ($\mathbb{R}$). Assim, existe uma função de associação $\mu_{\tilde{A}}$ contínua por partes, satisfazendo a um mapeamento contínuo de um $\mathbb{R}$ para o intervalo fechado [0,1] [Kaufmann e Gupta 1986].

Para ponderar o grau de importância de cada critério e para categorizar as alternativas

de acordo com o risco, um conjunto de termos linguísticos deve ser utilizado:

Tabela 1: Termos linguísticos

Classes de risco	*Números Fuzzy*				*Pesos dos Critérios (W)*	*Números Fuzzy*			
Very Low (VL)	*0*	*0*	*0,1*	*0,2*	*Unimportant (U)*	*0*	*0*	*0,1*	*0,2*
Low (L)	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,4*	*Moderately important (MI)*	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,4*
Medium (M)	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,6*	*Medium (M)*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,6*
Hight (H)	*0,5*	*0,6*	*0,7*	*0,8*	*Very Important (VI)*	*0,5*	*0,6*	*0,7*	*0,8*
Very Hight (VH)	*0,7*	*0,8*	*0,9*	*1*	*Extremely important (EI)*	*0,7*	*0,8*	*0,9*	*1*

O protocolo de avaliação ilustra a lógica do RPN de acordo com a Tabela 2, para que os KPIs possam ser ponderados de acordo com o RPN (S x O x D). Assim, cada área industrial é analisada com vistas à gravidade das falhas, ocorrência e capacidade de detectar ou controlar aspectos que afetam a segurança dessa área industrial.

Tabela 2: Uso do RPN

RPN	Sigla	Compreensão
Gravidade	S	Quanto menor melhor (-)
Ocorrência	O	Quanto menor melhor (-)
Detecção	D	Quanto maior melhor (+)

A severidade e a detectabilidade podem ser avaliadas para cada critério por meio de avaliações linguísticas de acordo com a Tabela 1, e a ocorrência pode ser avaliada de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Avaliações de Ocorrência

Ratings	(O)
Very Low (VL)	Chance de ocorrência menor que 1%
Low (L)	Entre 1-10% de chance de ocorrência
Medium (M)	Chance de ocorrência entre 10-33% (1/3)
High (H)	Chance de ocorrência entre 33-67% (2/3)
Very High (VH)	> 67% (2/3) de chance de ocorrência (isso ocorrerá em algum momento)

Fonte: Adapted de Abdelgawad e Fayek [2010].

O RPN para cada dimensão do pilar Segurança é obtido agregando as avaliações de gravidade, ocorrência e detectabilidade. Assim, é construída uma matriz de decisão com variáveis linguísticas que relaciona a avaliação da RPN a cada dimensão do pilar Segurança e a cada alternativa. Cabe também ao especialista avaliar e definir os perfis das classes, que serão considerados em conjunto com os pesos dos critérios de classificação com o método da classe FTOPSIS.

Em relação aos perfis do modelo, conforme passos de 4 a 9, os mesmos serão P1, P2, P3 e P4. Assim, as alternativas pertencentes à coluna P1 devem ser alocadas à classe 1 – muito baixo risco de acidente, P2 à classe 2 - baixo risco, P3 à classe 3 – médio risco e P4 à classe 4 - alto risco.

4. Estudo de Caso

Para aplicar o modelo proposto, este estudo utilizou dados reais de uma planta industrial de bens de consumo que tem o Programa WCM implementado. Os dados foram coletados nesta planta industrial que fabrica três tipos de detergente em pó, operando com mais de 300 funcionários, que teve um orçamento de 16 milhões de euros no ano passado e está localizada no Brasil, com mais de duas décadas de operação.

As alternativas consideradas no estudo de caso são as áreas da planta industrial, para as quais os indicadores já foram avaliados no Programa WCM e visam o planejamento de estratégias para melhoria e gerenciamento da segurança. Essas áreas industriais são mostradas na Tabela 4.

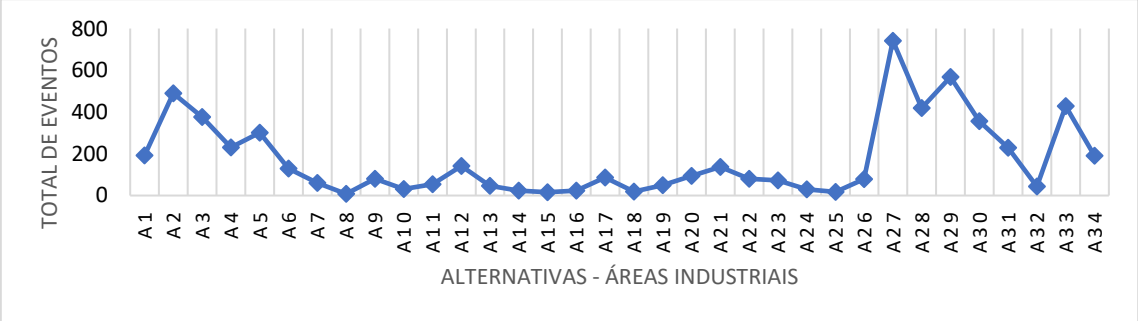
A classe mais crítica (4), em termos de segurança, deve ser 'abordada' primeiro em termos de solução de problemas, a fim de reduzir ou eliminar completamente o número de ocorrências em relação à segurança. Posteriormente, a atenção deve mudar para as classes subsequentes, como as classes 3, 2 e 1 (menos crítica).

Tabela 4: Alternativas

Áreas industriais	A_m
Soprado Térreo PH	A1
1° Piso PH	A2
2° Piso PH	A3
3° Piso PH	A4
4° Piso PH	A5
5° Piso PH	A6
Torre de sopro	A7
Soprado Térreo SD	A8
1° Piso SD	A9
2° Piso SD	A10
3° Piso SD	A11
4° Piso SD	A12
5° Piso SD	A13
6° Piso SD	A14
Fornalha	A15
Cabine de Jato	A16
Ciclones	A17
Torre de sopro / Topo da torre	A18
Soprado Térreo SM	A19
1° Piso SM	A20
2° Piso SM	A21
3° Piso SM	A22
4° Piso SM	A23
Torre de sopro	A24
Corte de reprocesso soprado	A25
Fluidizado - Térreo	A26
Fluidizado – SAMP	A27
Fluidizado - 1º Piso	A28
Fluidizado - 2º Piso	A29
Fluidizado - 3º Piso	A30
Corde de reprocesso - Fluidizado	A31
Armazém	A32
Tancagem / Transporte pneumático	A33
Tancagem - Fluidizado (Armazém)	A34

Para cada uma das áreas identificadas na Tabela 4, são monitorados acidentes e eventos que ameaçam a segurança. A Figura 1 mostra a proporção do total de eventos (ocorrências) por área industrial (alternativa) nos últimos 12 meses.

Figura 1: Total de eventos por área industrial



Para construir a matriz de decisão fuzzy, conforme passo 2 da seção 3.1, os critérios de avaliação são considerados de acordo com os indicadores do pilar Segurança, apresentados na Tabela 5, conforme descrito na Seção 2.1.

Tabela 5: Critérios

Critérios	C_n
FA	C1
LTA	C2
RWC	C3
MTC	C4
FAC	C5
NM	C6
UC	C7
UA	C8

Após avaliar cada área industrial em termos de gravidade, ocorrência e detectabilidade, o RPN de cada dimensão do pilar Segurança é caracterizada em variáveis linguísticas. Para não

ultrapassar o limite de páginas foi necessário suprimir a relação de variáveis linguísticas de todas as alternativas, contudo as alternativas com os respectivos coeficientes de proximidade são apresentadas na Tabela 8.

Os pesos foram obtidos do especialista. A ordem de importância usada na pontuação da avaliação dos indicadores do pilar de segurança foi considerada para permitir a comparação com a abordagem tradicional usada anteriormente. A Tabela 6 apresenta os pesos de acordo com as variáveis linguísticas apresentadas.

Tabela 6: Pesos dos critérios

C_m	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
W_m	EI	EI	VI	VI	VI	VI	EI	EI

A definição de classes está associada ao que é desejado em termos do processo de tomada de decisão, ou seja, está associada às características que definem quais riscos podem ser tolerados e aqueles que não podem ser tolerados. Portanto, a classificação a ser obtida pela abordagem proposta difere do processo tradicional adotado para o Programa WCM. Os perfis que definem as classes a serem consideradas foram definidos pelo especialista e estão apresentados na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7: Perfis de classificação

C_m	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
$P1$	VL	VL	L	VL	L	L	VL	VL
$P2$	L	L	L	L	M	M	L	L
$P3$	M	M	M	L	H	M	M	M
$P4$	M	H	H	M	VH	H	H	VH

4. Aplicação e resultados

As alternativas são classificadas considerando os valores apresentados na Tabela 9, conforme procedimento estabelecido por Ferreira et al. [2018] para aplicação da classe FTOPSIS, realizada de acordo com dados coletados no estudo de caso. A Tabela 8 apresenta os valores de CC para cada alternativa em relação ao perfil da classe, respectivamente, e destaca os valores de acordo com a adesão à classe.

Tabela 8: Coeficiente de proximidade

	P1	P2	P3	P4
A1	0.3770768310058755	0.5006106233036517	0.5954201958135213	**0.6229231689941246**
A2	**0.6859409312199034**	0.6544539726785035	0.5448300650519707	0.3140590687800966
A3	**0.7419371647447596**	0.7065786035248849	0.5382676547633042	0.2580628352552404
A4	**0.7759661462519533**	0.7320068000408189	0.5365754334067978	0.22403385374804674
A5	**0.7941176426705898**	0.7011347303610842	0.5312491900813505	0.2058823573294101
A6	**0.8414871023223147**	0.7322168785155424	0.502664742101648	0.15851289767768528
A7	**0.7036788718759055**	0.7080336909155066	0.5782364004502505	0.2963211281240945
A8	0.8414871023223147	**0.7322168785155424**	0.502664742101648	0.15851289767768528
A9	**0.8540682858299271**	0.7123651206777766	0.47561134996804916	0.14593171417007286
A10	**0.8540682858299271**	0.7123651206777766	0.47561134996804916	0.14593171417007286
A11	**0.8256496364957028**	0.723030868761407	0.4743199079941259	0.1743503635042971
A12	**0.8540682858299271**	0.7123651206777766	0.47561134996804916	0.14593171417007286
A13	**0.8406551405928387**	0.7428983742511014	0.471793235195482	0.15934485940716123
A14	**0.8540682858299271**	0.7123651206777766	0.47561134996804916	0.14593171417007286
A15	**0.7629784768977901**	0.7452876024935013	,0.5387550002409148	0.23702152310220986
A16	**0.7656914463937505**	0.7118593929692578	0.5331219867411874	0.23430855360624941
A17	0.6435328002096483	**0.6975729259878899**	0.6325424485979345	0.3564671997903517

A18	0.6435328002096483	**0.6975729259878899**	0.6325424485979345	0.3564671997903517
A19	**0.8414983257659747**	0.7322333768836902	0.4732344675273272	0.1585016742340253
A20	0.3520938188410043	0.46760284421754905	0.6361672585607662	**0.6479061811589956**
A21	**0.7786503869973127**	0.7211188196051168	0.5022432652198205	0.22134961300268724
A22	**0.8117090274757695**	0.7450217461913449	0.5029248073139456	0.1882909725242305
A23	**0.8084424311324856**	0.7094819868508124	0.4705367098375453	0.19155756886751432
A24	0.6753732635149319	**0.6847501224479815**	0.5952481350001125	0.3246267364850681
A25	**0.7940947255625889**	0.7011053587949653	0.47182009713980505	0.2059052744374111
A26	0.39818024847737626	0.47215870884412803	0.42185775276610954	**0.6018197515226238**
A27	**0.7419371647447596**	0.7065786035248849	0.5382676547633042	0.2580628352552404
A28	0.39818024847737626	0.47215870884412803	0.42185775276610954	**0.6018197515226238**
A29	**0.5968978684929243**	0.5956925342161516	0.4892735773081697	0.40310213150707574
A30	**0.7930126612389972**	0.731350060552574	0.5360829558433522	0.20698733876100292
A31	**0.7741173132800063**	0.7726245281129677	0.5022549626006347	0.22588268671999365
A32	0.7018693166577759	**0.7614313479749296**	0.4817561129682461	0.2981306833422242
A33	**0.7583281760415316**	0.7060091661263663	0.5377341897850031	0.2416718239584684
A34	**0.7940947255625889**	0.7011053587949653	0.47182009713980505	0.2059052744374111

O procedimento realizado levou à classificação das alternativas, de acordo com a área industrial com maior potencial de propensão ao modo de falha e / ou riscos à segurança.

Assim, de acordo com a aplicação s primeiras ações corretivas devem ser desenvolvidas em áreas industriais classificadas na classe 4, depois classe 3, classe 2 e, finalmente, classe 1.

A abordagem tradicional do pilar de segurança do programa WCM começa com uma área de modelo e se estende genericamente a toda a empresa. Assim, a abordagem WCM 'atacaria' o setor industrial com o pior resultado de segurança. Ainda assim, nessas áreas, pode haver áreas industriais que não apresentem resultados tão ruins quanto os encontrados na A26, por exemplo. Embora a A26, por exemplo, não tenha mostrado um número maior de questões de segurança, foi apontada como uma área industrial de alto risco.

Ao mesmo tempo, é possível perceber que A28, por exemplo, tem muitos eventos e aparece na classe 4, ou seja, deve ser priorizado primeiramente, o que pode demonstrar o quanto o modelo se aproxima da realidade.

5. Conclusão

Neste estudo propomos uma estrutura que classifique primeiro as áreas industriais (alternativas), de acordo com a área com maior potencial para modos de riscos e falhas, e posteriormente formas de lidar com elas podem ser desenvolvidas especificamente dentro de cada área.

Desta forma, a estrutura faz com que as formas de minimizar os riscos, de acordo com as ferramentas do Programa WCM no pilar de segurança, sejam realizadas de maneira organizada e sequencial. Assim, este artigo procurou apresentar uma técnica para classificar alternativas em relação ao pilar de segurança em empresas de manufatura de classe mundial, integrando a FMECA na análise para estabelecer prioridades por meio de uma abordagem multicritério, utilizando o método da classe FTOPSIS-Class.

Por meio de um estudo de caso, foi possível relacionar os principais conceitos utilizados no artigo, para que a abordagem proposta pudesse ser testada e replicada. Assim, as etapas sugeridas para apoiar estratégias para o pilar Segurança foram demonstradas em plantas onde o Programa WCM foi implementado.

Os resultados mostraram que as classificações com o auxílio da classe FTOPSIS-Class e FMECA demonstram que essa estrutura pode ser replicada para outros estudos de caso e outras empresas.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). Risk Management in the Construction Industry Using Combined Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, *136*(9), 1028–1036. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000210

Aires, R. F. de F., & Ferreira, L. (2019). A new approach to avoid rank reversal cases in the TOPSIS method. *Computers & Industrial Engineering*, *132*(August 2018), 84–97. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.023

Animah, I., & Shafiee, M. (2020). Application of risk analysis in the liquefied natural gas (LNG) sector: An overview. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *63*. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103980

Ansari, A., & Modarress, B. (1997). World-class strategies for safety: a Boeing approach. *International Journal of Operations & Production Management*, *17*(4), 389–398. https://doi.org/10.1108/01443579710159978

Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, *39*(17), 13051–13069. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056

Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, *50*(2), 203–213. https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00068-D

Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, *114*(1), 1–9. https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1

Chiarini, A., & Vagnoni, E. (2015). World-class manufacturing by Fiat. Comparison with Toyota Production System from a Strategic Management, Management Accounting, Operations Management and Performance Measurement dimension. *International Journal of Production Research*, *53*(2), 590–606. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.958596

de Almeida-Filho, A. T., de Almeida, A. T., & Costa, A. P. C. S. (2017). A flexible elicitation procedure for additive model scale constants. *ANNALS OF OPERATIONS RESEARCH*, *259*(1–2), 65–83. https://doi.org/10.1007/s10479-017-2519-y

de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A. T., & Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis* (Vol. 231). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17969-8

De Felice, F., Petrillo, A., & Monfre, S. (2013). Improving Operations Performance with World Class Manufacturing Technique: A Case in Automotive Industry. In M. Schiraldi (Ed.), *Operations Management* (pp. 1–37). InTech. https://doi.org/10.5772/54450

De Felice, F., Petrillo, L., Ranieri, L., & Petrillo, A. (2019). Previous Studies and Differences Between Lean Management and World Class Manufacturing. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, *18*(06), 1941–1966. https://doi.org/10.1142/S0219622019500391

de Lima Silva, D. F., & de Almeida Filho, A. T. (2020). Sorting with TOPSIS through boundary and characteristic profiles. *Computers and Industrial Engineering*, *141*(June 2019), 106328. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106328

Dong, C. (2007). Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *24*(9), 958–971. https://doi.org/10.1108/02656710710826216

Erozan, İ. (2019). A fuzzy decision support system for managing maintenance activities of critical

components in manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, *52*(A), 110–120. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.06.002

Ferreira, L., Borenstein, D., Righi, M. B., & de Almeida Filho, A. T. (2018). A fuzzy hybrid integrated framework for portfolio optimization in private banking. *Expert Systems with Applications*, *92*, 350–362. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.09.055

Flynn, B. B., Schroeder, R. G., Flynn, E. J., Sakakibara, S., & Bates, K. A. (1997). World-class manufacturing project: overview and selected results. *International Journal of Operations & Production Management*, *17*(7), 671–685. https://doi.org/10.1108/01443579710175592

Giovando, G., Crovini, C., & Venturini, S. (2017). Cost Deployment Implementation: A case study. In E. Vrontis, D and Weber, Y and Tsoukatos (Ed.), *Global and National Business Theories and Practice: Bridging the past with the future* (pp. 652–664). Euromed Press.

Hwang, C., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State of the Art Survey. In *Springer-Verlag* (Vol. 1). https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

Karwowski, W., & Salvendy, G. (2010). Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries. In W. Karwowski & G. Salvendy (Eds.), *Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/EBK1439834992

Kaufmann, A., & Gupta, M. (1986). Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. *Mathematics of Computation*, *47*. https://doi.org/10.2307/2008199

Kim, K. O., & Zuo, M. J. (2018). General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, *169*(September 2017), 321–329. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.010

Kukla, S. (2016). Quality and Safety Assurance of Iron Casts and Manufacturing Processes. *Archives of Foundry Engineering*, *16*(2), 17–20. https://doi.org/10.1515/afe-2016-0019

Liu, H., Chen, X., Duan, C., & Wang, Y. (2019). Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, *135*(April), 881–897. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.055

Liu, Y., Eckert, C., Yannou-Le Bris, G., & Petit, G. (2019). A fuzzy decision tool to evaluate the sustainable performance of suppliers in an agrifood value chain. *Computers & Industrial Engineering*, *127*(November 2018), 196–212. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.022

Michaud, P. A. (1995). *Accident Prevention and OSHA Compliance*. CRC Press - Taylor & Francis Group.

Petrillo, A., De Felice, F., & Zomparelli, F. (2019). Performance measurement for world-class manufacturing: a model for the Italian automotive industry. *Total Quality Management & Business Excellence*, *30*(7–8), 908–935. https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1408402

Puente, J., Pino, R., Priore, P., & de la Fuente, D. (2002). A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality and Reliability Management*, *19*(2), 137–150. https://doi.org/10.1108/02656710210413480

Read, S. (2015). Aristotle and Łukasiewicz on Existential Import. *Journal of the American Philosophical Association*, *1*(3), 535–544. https://doi.org/10.1017/apa.2015.8

Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding* (Springer (ed.)). Kluwer Academic Publishers.

Satolo, E. G., Leite, C., Calado, R. D., Goes, G. A., & Salgado, D. D. (2018). Ranking lean tools for world class reach through grey relational analysis. *Grey Systems: Theory and Application*, *8*(4), 399–423. https://doi.org/10.1108/GS-06-2018-0031

Schonberger, R. J. (1982). The Transfer of Japanese Manufacturing Management Approaches to U.S. Industry. *Academy of Management Review*, *7*(3), 479–487. https://doi.org/10.5465/amr.1982.4285372

Schonberger, R. J. (1984). Just-in-Time Production Systems-Replacing Complexity with Simplicity in

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Manufacturing Management. *Industrial Engineering*, *16*(10), 52.

Schonberger, R. J. (1986). *World Class Manufacturing - The lessons of simplicity applied*. Schonberger & Associates. ISBN 0-02-929270-0.

Silva, D. F. de L., Ferreira, L., & de Almeida-Filho, A. T. (2020). A new preference disaggregation TOPSIS approach applied to sort corporate bonds based on financial statements and expert's assessment. *Expert Systems with Applications*, *152*, 113369. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113369

Stranks, J. (2002). *Health and Safety at Work: Key Terms* (First, Vol. 1). Oxford.

Vahdani, B., & Zandieh, M. (2010). Selecting suppliers using a new fuzzy multiple criteria decision model: the fuzzy balancing and ranking method. *International Journal of Production Research*, *48*(18), 5307–5326. https://doi.org/10.1080/00207540902933155

Vukadinovic, S., Macuzic, I., Djapan, M., & Milosevic, M. (2019). Early management of human factors in lean industrial systems. *Safety Science*, *119*(June 2017), 392–398. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.008

Wang, Z., Ran, Y., Chen, Y., Yu, H., & Zhang, G. (2020). Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP. *Computers & Industrial Engineering*, *140*(December 2019), 106233. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106233

Washington, D. of defense. (1980). *Military Standard*. Procedures for Perfoming a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. http://www.barringer1.com/mil_files/MIL-STD-1629RevA.pdf

Xu, K., Tang, L. C., Xie, M., Ho, S. L., & Zhu, M. L. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering and System Safety*, *75*(1), 17–29. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00101-6

Yamashina, H. (2000). Challenge to world-class manufacturing. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *17*(2), 132–143. https://doi.org/10.1108/02656710010304546

Yamashina, H., & Kubo, T. (2002). Manufacturing cost deployment. *International Journal of Production Research*, *40*(16), 4077–4091. https://doi.org/10.1080/00207540210157178

Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic Compution with word.pdf. *Ieee Transactions on Fuzzy Systems*, *4*(2), 103–111.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings