



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NAIARA MEIRELES DE SOUZA

**FRAMEWORK PARA APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO NOS PILARES DE
CUSTO E SEGURANÇA DO PROGRAMA WORLD-CLASS MANUFACTURING**

Recife

2020

NAIARA MEIRELES DE SOUZA

**FRAMEWORK PARA APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO NOS PILARES DE
CUSTO E SEGURANÇA DO PROGRAMA WORLD-CLASS MANUFACTURING**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gerência da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho.

Recife
2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S729f Souza, Naiara Meireles de.
Framework para apoio à decisão multicritério nos pilares de custo e segurança do programa World-Class Manufacturing / Naiara Meireles de Souza. - 2020.
131 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia de Produção. 2. Manufatura de classe mundial. 3. Custo. 4. Segurança. 5. *Fuzzy* TOPSIS. 6. MCDM/A. I. Almeida Filho, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2021-44

NAIARA MEIRELES DE SOUZA

**FRAMEWORK PARA APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO NOS PILARES DE
CUSTO E SEGURANÇA DO PROGRAMA WORLD-CLASS MANUFACTURING**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 28 / 12 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Denise Dumke de Medeiros (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Isis Didier Lins (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Sérgio Eduardo Gouvea da Costa (Examinador externo)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná / Universidade Tecnológica do Paraná

Profa. Dra. Mariana Rodrigues de Almeida (Examinadora interna)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre apoiaram e se orgulharam do meu trabalho, muitas vezes mesmo sem compreender a necessidade de todos os meus esforços ou decisões. Muito obrigada por serem meus amigos, por me ouvirem, me compreenderem e sobretudo por vencer cada desafio junto comigo.

À minha mãe, Neuza Meireles, que sempre comemorou cada conquista comigo, muito obrigada! À minha irmã, Neliandra Meireles, obrigada por sempre se preocupar, orar e torcer. Ao meu pai, que mesmo tendo pouca escolaridade, sempre fez de tudo para que não somente eu, mas que meus irmãos pudessem ter o melhor estudo que ele pudesse proporcionar. Aos meus sobrinhos, Miguel, Gabriel, Maria Clara e Júnior, por renovarem minha energia com a alegria que transmitem. A cada chegada de viagem ou partida, o Miguel e o Gabriel especialmente, sempre estavam ali para me receber com alegria e para me dar um abraço apertado.

Agradeço ao professor e orientador Adiel Filho, que desde 2015 me acompanha nesta caminhada. Obrigada por todas as recomendações, conselhos e ensinamentos ao longo desses 6 anos! A preocupação e incentivos nos últimos dois anos especialmente, foram fundamentais para que eu não pudesse desistir deste sonho mesmo diante de tantas baixas. Todas as vezes que desanimei ou precisei, estando longe ou perto, meu orientador Adiel Filho parou o que tinha para fazer e dedicou o seu tempo para conversar e dizer que tudo iria dar certo no final.

Aos professores, Denise, Ísis, Danielle, Marcelo Hazin, Luciana, Cristiano, Ana Paula, Carol e Adiel, cada um ao seu modo, pelos ensinamentos e transmissão de conhecimentos, muito obrigada! Agradeço também ao professor Sérgio Gouvea e a professora Mariana Almeida pelas contribuições neste trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP, obrigada pela oportunidade de aprimoramento e elevação do meu nível acadêmico. Agradeço, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro nos dois primeiros anos do doutorado.

A Diana Cavalcanti, que contribuiu significativamente para realização deste trabalho por meio do fornecimento de dados e informações valiosas relacionadas ao tema.

Aos amigos do GREEFO, Diogo e Júlio César, muito obrigada por compreenderem todas as fases que passei ao longo desses 4 anos e por todo suporte acadêmico!

Aos meus velhos amigos espalhados pelos estados de Rondônia, Mato Grosso, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, muito obrigada pelo apoio e por todos os incentivos que

recebi em inúmeras situações. Alguns destes amigos, fizeram questão de viajar 3, 4 ou 5 mil km somente para me visitar, sobretudo após momentos complexos.

Agradeço, especialmente a Camila Conti, Juliana Miranda, Beatriz Miranda, Carlos e Olívia por me ouvirem, suportarem minhas reclamações e me colocarem para cima sempre que necessário. Aos novos amigos, que os conheci na UFPE, em especial Eliana Lima, Mirella, Alexandre, Lucas Frederico, Lucas Ambrósio, Danielle, Fagner, Priscilla, Rachel, Mirian e Madson, muito obrigada pelo apoio direto ou indireto, bem como pelas incansáveis conversas! Aos amigos que fiz fora da UFPE, sou grata por compreenderem meus sumiços e dedicação aos estudos, mas especialmente por me ajudarem a vivenciar outras circunstâncias. A maior parte deles, tenho certeza de que são amigos que fiz para a vida.

Aos professores de inglês, especialmente a Betânia e o Túlio por contribuírem com preceitos que vão além de uma aula.

Por fim, agradeço sobretudo à Deus, pois sem ele nenhum desses agradecimentos seria possível!

“Quando você melhora um pouco a cada dia, coisas grandes começam a ocorrer. Não procure por melhoras rápidas e grandiosas, busque uma pequena melhoria, um dia de cada vez. É o único modo para que aconteça e quando acontece, dura. Apaixone-se pelo processo de se tornar sua melhor versão.”

(John Wooden)

RESUMO

A World-Class Manufacturing (WCM) está se tornando popular em vários setores industriais com o objetivo de aplicar os padrões identificados pela indústria e ferramentas potencialmente de excelência. A WCM tem sido visto por muitas empresas como gerenciamento de ações estruturadas para melhorar a fabricação. O presente estudo tem como finalidade propor dois frameworks de decisão para priorização de ações visando melhorias na WCM por meio do uso estruturado de ferramentas de apoio à decisão multicritério, com foco nos pilares de custo e segurança do Programa de Manufatura de Classe Mundial (WCM). Portanto, a proposta desta tese considera que áreas industriais ou projetos sejam categorizados antes de serem priorizados, diferentemente da maneira tradicional do Programa WCM, que apenas prioriza ações e em alguns casos as tratam num processo ad hoc. No pilar de custo, a contribuição deste estudo é a proposta de um framework para integração da estratégia de manufatura com o pilar de custo, para que empresas que adotam o Programa WCM possam classificar projetos de forma mais sofisticada, enriquecendo assim o processo de análise por considerar também os aspectos competitivos da função produção. Estes projetos poderão ser classificados através do método FTOPSIS-Class, de acordo com o nível de prioridade. O segundo framework proposto neste trabalho considera o pilar de segurança, integrando estratégias do Programa WCM com os princípios da Análise do Modo de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) para estabelecer prioridades por meio do FTOPSIS-Class e de acordo com o nível de risco de cada área da instalação industrial. Portanto, esta abordagem proposta considera os Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) utilizados no Programa WCM integrados com a gravidade, ocorrência e detectabilidade de cada aspecto observado. A construção do modelo multicritério considera avaliações linguísticas fornecidas por especialistas das instalações industriais para classificar cada área industrial conforme o respectivo nível de risco de forma integrada. Para demonstrar como o framework proposto pode ser aplicado, foram realizadas aplicações numéricas envolvendo o pilar de custo e segurança. Essas aplicações foram apoiadas por um caso com coleta de dados reais em uma planta industrial de uma empresa multinacional que adota o Programa WCM. Na análise dos resultados obtidos, foram elaboradas recomendações em termos de custos e potenciais projetos visando melhorias voltadas a redução de custos com manutenção por meio do uso do modelo *delay time* foram sugeridos. Esse processo estruturado pode ser aplicado em outras fábricas ou segmentos da indústria que possuam programas de redução de custos. Os resultados alcançados também permitem identificar as

áreas industriais com maiores riscos de segurança, não somente áreas com o maior número de eventos. O framework proposto pode ser implantado em instalações industriais que possuam um programa de melhoria de segurança. Em síntese, este trabalho contribui e inova com a proposta de frameworks para o estabelecimento de prioridades voltadas ao pilar de custo e segurança do Programa WCM integrado à tomada de decisão multicritério, considerando os impactos na estratégia de manufatura em relação ao pilar de custo e o nível de risco no pilar de segurança.

Palavras-chave: Manufatura de classe mundial. Custo. Segurança. *Fuzzy* TOPSIS. MCDM/A.

ABSTRACT

World-Class Manufacturing (WCM) is becoming popular in various industrial sectors intending to apply the industry's standards and potentially excellent tools. Many companies have seen WCM as managing structured actions to improve manufacturing. The purpose of this study is to propose two frameworks for the decision process of prioritizing improvements in WCM pillars. Through the structured use of multi-criteria decision-making tools integrated with the pillars of WCM, this work considered cost deployment and security pillars of the WCM Program. Therefore, the proposal of this thesis considers that industrial areas or projects are categorized before being prioritized, unlike the traditional way of the WCM Program, which only prioritizes actions and, in some cases, deals with them in an ad hoc process. In the cost pillar, the contribution of this study is the proposal of a framework for integrating the manufacturing strategy with the cost pillar, so that companies that adopt the WCM Program can classify projects in a more sophisticated way, thus enriching the process of analysis because it also considers the competitive aspects of the production function. These projects can be classified using the FTOPSISIS-Class method, according to the priority level. The second framework proposed in this work considers the safety pillar, integrating the WCM Program strategies with the principles of Failure Mode Analysis, Effects and Criticality (FMECA) to establish priorities through the FTOPSISIS-Class and according to the risk level of each area of the industrial installation. Therefore, this proposed approach considers the Key Performance Indicators (KPIs) used in the WCM Program integrated with the severity, occurrence, and detectability of each aspect observed. The construction of the multicriteria model considers linguistic assessments provided by specialists from industrial facilities to classify each industrial area according to the respective level of risk in an integrated manner. To demonstrate how the proposed framework can be superimposed, numerical applications were carried out involving the cost and security pillar. These applications were supported by a case with the collection of real data in an industrial plant of a multinational company that adopts the WCM Program. In the analysis of the results obtained, recommendations were made in terms of costs, and potential projects aiming at improvements oriented at reducing maintenance costs through the use of the delay time model were suggested. This structured process can be applied to other factories or industry segments that have cost reduction programs. The results achieved also allow the identification of the industrial areas with the highest security risks, not only areas with the highest number of events. The proposed

framework can be implemented in industrial installations that have a security improvement program. In summary, this work contributes and innovates with the proposal of frameworks for the establishment of priorities focused on the cost and safety pillar of the WCM Program integrated into the multi-criteria decision making, considering the impacts on the manufacturing strategy about the cost pillar and the level of risk in the safety pillar.

Keywords: World-class manufacturing. Cost. Safety. Fuzzy TOPSIS. MCDM/A.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da tese.....	25
Figura 2: Visão geral do Programa WCM.....	34
Figura 3: Visão geral das etapas do pilar de custo	36
Figura 4: Visão geral dos passos para implementação do pilar de segurança.....	42
Figura 5: Termos de buscas utilizados na RL.....	54
Figura 6: Etapas da RL.....	55
Figura 7: Visualização de rede	57
Figura 8: Termos mais abordados por ano	58
Figura 9: Incidência dos termos.....	58
Figura 10: Framework proposto para o pilar de custo.....	69
Figura 11: Categorizações	77
Figura 12: Classificações após análise de sensibilidade 1 – pilar de custo	80
Figura 13: Classificações após análise de sensibilidade 2 – pilar de custo	81
Figura 14: Breakdown por área	83
Figura 15: Custo esperado por inspeção - Equipamento 1	85
Figura 16: Custo esperado por inspeção – Equipamento 2	86
Figura 17: Custo esperado por inspeção – Equipamento 3	88
Figura 18: Framework proposto para o pilar de segurança	91
Figura 19: Número total de eventos por área industrial	96
Figura 20: Categorizações do pilar de segurança	102
Figura 21: Classificações após análise de sensibilidade 1 – pilar de segurança.....	106
Figura 22: Classificações após análise de sensibilidade 2 – pilar de segurança.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Termos linguísticos	49
Quadro 2: Abordagens gerais do termo WCM e Programa WCM.....	59
Quadro 3: Abordagens referentes aos pilares técnicos do Programa WCM	62
Quadro 4: Abordagens envolvendo a estratégia de manufatura conectada a WCM	63
Quadro 5: Junção do MCDM/A e WCM	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Termos linguísticos para aplicação numérica	71
Tabela 2 - Relação de alternativas do pilar de custo	73
Tabela 3 - Relação de critérios do pilar de custo.....	73
Tabela 4 - Matriz de decisão (\check{R})	74
Tabela 5 - Matriz de referência (\check{Q}) para cada perfil	75
Tabela 6 - Pesos (W) para o pilar de custo	75
Tabela 7 - Coeficiente de proximidade.....	76
Tabela 8 - Matriz de referência (\check{Q}) para cada perfil – análise se de sensibilidade 2.....	80
Tabela 9 - Parâmetros do modelo delay time	82
Tabela 10- Parâmetros do modelo para o equipamento 1	84
Tabela 11 - Parâmetros do modelo para o equipamento 2	86
Tabela 12 - Parâmetros do modelo para o equipamento 3	87
Tabela 13 - Uso do RPN.....	93
Tabela 14 - Avaliações de ocorrência.....	93
Tabela 15 - Relação de alternativas do pilar de segurança.....	94
Tabela 16 - Relação de critérios do pilar de segurança	96
Tabela 17 - Matriz de decisão do pilar de segurança	97
Tabela 18 - Pesos dos critérios - pilar de segurança.....	98
Tabela 19 - Perfis de classificação - pilar de segurança	99
Tabela 20 - Coeficiente de proximidade - pilar de segurança	99
Tabela 21 - Matriz de decisão - análise de sensibilidade	104
Tabela 22 - Coeficiente de proximidade – Análise de sensibilidade 1.....	127
Tabela 23 - Coeficiente de proximidade – Análise de sensibilidade 2.....	127
Tabela 24 - Número de eventos por alternativa.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CD	<i>Cost deployment</i>
DTM	<i>Delay Time Modelling</i>
FL	<i>Fuzzy Logic</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode Effects and Criticality Analysis</i>
FTOPSIS	<i>Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal</i>
GE	<i>General Electric</i>
JIT	<i>Just-in-time</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
MAUT	<i>Multiattribute utility theory</i>
MCDA	<i>Multi-criteria decision analysis</i>
MCDM	<i>Multiple-criteria decision-making</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
QM	<i>Quality management</i>
RL	Revisão da Literatura
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SAF	<i>Safety</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
WCM	<i>World-Class Manufacturing</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO	20
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	21
1.2.1	Objetivo geral.....	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	METODOLOGIA.....	22
1.4	ESTRUTURA DA TESE	24
2	BASE CONCEITUAL.....	27
2.1	ESTRATÉGIAS DE MANUFATURA	27
2.2	METODOLOGIAS DE GESTÃO INCORPORADAS NAS CONCEPÇÕES DA WORLD-CLASS MANUFACTURING.....	30
2.3	PROGRAMA WCM E PILARES TÉCNICOS	32
2.3.1	Pilar de custo	36
2.3.1.1	<i>Delay time modelling</i> como alternativa de redução de custos de perdas.....	38
2.3.2	Pilar de segurança.....	40
2.4	APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO E O PROCESSO DECISÓRIO	43
2.4.1	Métodos MCDM/A	44
2.5	OBTENÇÃO DE PESOS, LÓGICA FUZZY E TOPSIS	45
2.6	FTOPSIS-CLASS	47
2.6.1	Fuzzy Trapezoidal	48
2.6.2	Termos Linguísticos.....	49
2.7	FMECA.....	50
2.8	CONSIDERAÇÕES	51
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	53
3.1	QUESTÕES DE PESQUISA E ETAPAS DO PRISMA	53
3.2	DISCUSSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA.....	56
3.2.1	WCM e Programa WCM.....	59
3.2.1.1	Pilares técnicos do Programa WCM.....	61
3.2.2	Estratégia de manufatura e WCM.....	62
3.2.3	MCDM/A e WCM.....	63
3.3	RESULTADOS DA REVISÃO DA LITERATURA	64
3.4	CONSIDERAÇÕES	65

4	FRAMEWORK PROPOSTO PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE CUSTO DO PROGRAMA WCM.....	67
4.1	PROPOSTA PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE CUSTO DO PROGRAMA WCM	67
4.2	APLICAÇÃO NUMÉRICA	71
4.3	IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS	78
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	79
4.5	PROPOSTA DE PROJETO DE MELHORIA	81
4.6	CONSIDERAÇÕES	88
5	FRAMEWORK PROPOSTO PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE SEGURANÇA DO PROGRAMA WCM.....	90
5.1	PROPOSTA PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE SEGURANÇA DO PROGRAMA WCM.....	90
5.2	APLICAÇÃO NUMÉRICA	94
5.3	IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS	102
5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	103
5.5	CONSIDERAÇÕES	107
6	CONCLUSÕES.....	109
6.1	LIMITAÇÕES E DIFICULDADES.....	111
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS.....	114
	APÊNDICE A – COEFICIENTES DE PROXIMIDADE.....	127
	APÊNDICE B – NÚMERO DETALHADO DE EVENTOS RELACIONADOS A SEGURANÇA.....	129

1 INTRODUÇÃO

Estratégias de manufatura são reavaliadas para compatibilizar a minimização de custos e riscos, aumento da segurança e outros objetivos competitivos que permitam a diferenciação dos concorrentes. Portanto, isso pode ocorrer através da melhoria de processos para o atendimento ao cliente. Então, o papel estratégico da manufatura está relacionado ao potencial que a manufatura tem para apoiar a estratégia macro da empresa (PARK; DAHLGAARD-PARK; KIM, 2020; VIVARES; SARACHE; HURTADO, 2018).

A obtenção de vantagens competitivas com base na manufatura é uma característica predominante em World-Class Manufacturing (WCM) ou Manufatura de Classe Mundial, que tem se apresentado como um conjunto de regras, procedimentos fundamentados em técnicas e ferramentas visando à melhoria contínua de longo prazo na forma de atuação da manufatura e assertividade em estratégias. Por isso, a metodologia baseada nos princípios de WCM tem conquistado reconhecimentos em termos de resultados (PETRILLO; FELICE; ZOMPARELLI, 2019) e pela excelência operacional, que agora é atrelada às tecnologias da Indústria 4.0 com intuito de associação com as dimensões que movem a WCM, uma vez que isso pode permitir identificar em qual solução tecnológica uma manufatura deve se alavancar (D’ORAZIO; MESSINA; SCHIRALDI, 2020).

O termo WCM foi desde seu início categorizado como uma bússola de melhoria contínua célere sob a ótica da excelência japonesa (SCHONBERGER, 1982, 1984, 1986) e ordenada quanto a redução de desperdícios e perdas, envolvendo as pessoas e buscando o desenvolvimento de competências (YAMASHINA; KUBO, 2002). Em 2005, Hajime Yamashina, juntamente com a Fiat Automóveis e empresas parceiras desenvolveram o “Programa WCM”, fundamentado em pilares técnicos e gerenciais para aprimoramento de processos e aprendizado com as melhores práticas do mercado (CHIARINI; VAGNONI, 2015).

Dentre os dez pilares técnicos do Programa WCM, a segurança é o primeiro pilar técnico e o custo o segundo. A segurança vem primeiro devido uma série de filosofias e princípios de gestão de engenharia industrial voltadas aos fatores humanos (VUKADINOVIC *et al.*, 2019). Isto é, dentro de instalações industriais diversas estratégias de segurança são implementadas, sobretudo nas manufaturas de classe mundial (WCM) (ANSARI; MODARRESS, 1997), permitindo que índices de desempenho chave (KPIs) possam ser considerados em abordagens de tomada ou análise de decisão multicritério (MCDM/A). Por outro lado, o pilar de custo, chamado também de *cost deployment* (CD), visa estabelecer uma

política de redução de custo admissível e realista, pois tem potencial para mapear perdas e quantificar benefícios (GIOVANDO; CROVINI; VENTURINI, 2017; YAMASHINA; KUBO, 2002). De tal modo, o CD é um pilar que visa apoiar a função produção objetivando a redução de custos através do foco na eliminação de perdas de oportunidades e desperdícios.

De modo geral, ainda que, para qualquer manufatura, seja importante alcançar o status de classe mundial pela excelência em processos, poucos trabalhos abordam o tema WCM em seus estudos e os mesmos não têm apoiado a WCM com soluções estruturadas ou com aplicações reais que sirvam como base ou suporte à tomada de decisão, conforme será demonstrado na revisão da literatura realizada. Para tal, a revisão da literatura realizada teve também como objetivo demonstrar os principais avanços, aspectos, pontos centrais e métodos abordados nos últimos vinte anos em relação a WCM e ao Programa WCM.

Desta forma, embora existam estudos relacionados ao MCDM/A e FMECA (LIU; YOU; DUAN, 2019), poucas pesquisas foram realizadas conectando MCDM/A e WCM. Por outro lado, ao levar em consideração o pilar de segurança do Programa WCM e MCDM/A, com base na revisão da literatura realizada, não foram encontrados estudos integrando os princípios do FMECA com Programa WCM e MCDM/A no contexto de um gerenciamento industrial. Do mesmo modo, não foram encontrados estudos integrando o pilar de custo do Programa WCM com MCDM/A e estratégias de manufatura.

Deste modo, este estudo propõe uma estrutura de decisão sistemática e ordenada por meio da integração do Programa WCM com MCDM/A, *delay time* e princípios do FMECA. Assim, visa apoiar tomadores de decisão em problemáticas relacionadas a plantas industriais onde o Programa WCM é praticado ou venha ser implementado, ao mesmo tempo em que responde à pergunta de pesquisa: Como melhorar a estruturação do processo de priorização de melhorias nos pilares de custo e segurança no Programa WCM?

Neste sentido, este trabalho visou utilizar o método FTOPSIS-Class para classificação de projetos ou áreas industriais no âmbito do critério custo considerando os impactos à estratégia de manufatura. O *delay time* foi utilizado como proposta em projetos de melhorias visando a eliminação de falhas e por consequência, redução de custos. Ao mesmo tempo, no pilar de segurança, áreas industriais foram categorizadas através do FTOPSIS- Class integrado aos princípios FMECA de acordo com a prioridade de risco e dando a importância à gravidade, frequência de ocorrência e detectabilidade de uma falha com foco na segurança. Para tanto, este trabalho foi orientado por meio de um caso, utilizando dados reais, de uma das unidades de uma multinacional britânica-neerlandesa de bens de consumo localizada no Brasil.

1.1 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO

Decidir é uma incumbência complexa que pode envolver uma série de restrições, perspectivas e variáveis. Por isso, métodos MCDM/A tem sido utilizados há décadas para auxiliar tomadores de decisão e *stakeholders* por meio de etapas ordenadas, visando a estruturação de um problema de decisão, identificação de preferências e/ou na formação de uma recomendação de decisão robusta (CINELLI *et al.*, 2020). Isto é, a decisão está intrinsecamente relacionada a uma pluralidade de pontos de vista, que podem ser vistos como critérios, muitas vezes conflitantes. Assim, abordagens, métodos e técnicas MCDM/A podem apoiar decisores principalmente em termos de escolha, classificação ou ordenação de ações (alternativas), que designam os objetos da decisão (FIGUEIRA; GRECO; EHROGOTT, 2005).

No modelo tradicional do Programa WCM, no pilar de custos, projetos e ações são priorizados com base no total de ocorrências de perdas e desperdícios convertidos em custos de toda fábrica, dos maiores custos para os menores. Assim, as priorizações são realizadas considerando somente o total de perdas e desperdícios convertidos em custos. Essas priorizações não consideram os impactos nas estratégias de manufatura da empresa.

Nesse sentido, considerando uma planta industrial que tenha perdas relacionadas a refugo, troca de ferramentas, quebra de máquinas, defeito de qualidade, perdas ambientais, desbalanceamento de linhas e perdas de energia, por exemplo, a atenção para novos projetos para solução de problemas ou melhoria pode ser dada para perdas relacionadas a troca de ferramentas porque no período ou ciclo analisado o custo foi maior. No entanto, pode ser que perdas provenientes da troca de ferramentas na planta industrial não tenham um impacto alto ou direto nas estratégias de manufatura da empresa no prazo demandado. Além disso, outras perdas se não tratadas no momento adequado podem se acumular e gerar um custo acumulado maior a médio ou a longo prazo, originando uma série de outras perdas. Além disso, em projetos visando melhorias é importante que outros aspectos além do custo também sejam considerados para que o retorno do projeto possa ser ainda maior.

Portanto, em termos de custos, antes de realizar uma priorização num processo ad hoc, propõe-se a criação de uma estrutura de apoio à decisão para que primeiro projetos sejam classificados, com suporte do método FTOPSIS-Class, considerando além do custo, outros objetivos de desempenho e o impacto de cada projeto nas estratégias de manufatura da empresa em nível corporativo, de negócios e funcional, para que depois a priorização seja realizada nos projetos ou áreas industriais que desempenham um impacto maior no processo

de fabricação.

Além disso, a motivação de estruturar categoricamente objetivos de *cost deployment* (pilar de custo) em WCM, deve-se ao fato de que o rateio e tratativas envolvendo o custo têm sido uma das principais estratégias e desafios de qualquer indústria, especialmente a de bens de consumo. Além disso, decisões envolvendo custo têm sido um fator de destaque que impacta direta e/ou indiretamente às estratégias de manufatura.

No pilar de segurança, a priorização de segurança é realizada considerando somente o total de eventos (número de acidentes, incidentes, condições inseguranças e atos inseguros juntamente com outros indicadores de desempenho) em determinadas áreas industriais. Porém, o risco das áreas não é considerado na decisão de priorização.

Portanto, propõe-se, em termos de segurança, uma estrutura de apoio à decisão multicritério envolvendo a problemática de classificação. Isto é, propõe-se primeiro classificar as áreas industriais de acordo com o número de prioridade de risco com auxílio do método FTOPSIS-Class, para que depois as ações sejam priorizadas.

Desta forma, as áreas industriais que oferecem maiores riscos, considerando a gravidade, frequência de ocorrência e detectabilidade de uma falha com foco na segurança, foram classificadas antes de serem priorizadas aleatoriamente, como ocorre no modo tradicional. Assim, o FTOPSIS-Class foi o método de classificação utilizado e o FMECA servirá como parâmetro de entrada do modelo. Assim, o processo de decisão pode ser estruturado considerando os objetivos no âmbito de um Programa WCM.

Por isso, classificar projetos, linhas de produção ou áreas industriais de modo estruturado tanto em termos de custo quanto de segurança do trabalho, deve-se ao fato de que os pilares de custo e segurança serem os principais aspectos estratégicos de uma WCM.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo geral

Propor frameworks para apoio à decisão multicritério em processos de priorização de melhorias nos pilares de custo e segurança do Programa WCM, permitindo um processo estruturado de decisão por meio da integração do apoio à decisão multicritério com o Programa WCM.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Integrar os principais conceitos relacionados as estratégias de manufatura, a WCM, ao método multicritério FTOPSIS-Class e FMECA;

- b) Demonstrar a integração das etapas que fundamentam os pilares de custo e segurança do Programa WCM para um processo de priorização estruturado;
- c) Propor um framework de decisão integrando a estratégia de manufatura para priorização de projetos ou áreas industriais em WCM no âmbito do pilar de *cost deployment*, enriquecendo a seleção destes projetos em plantas industriais com classes de prioridade;
- d) Propor um framework de decisão integrando WCM, MCDM/A e FMECA em termos de segurança para melhorar o processo de priorização de tratativas com estabelecimento de classes de prioridade;
- e) Realizar uma aplicação numérica, utilizando dados reais dos pilares de custo e segurança do Programa WCM de uma planta industrial, visando demonstrar a aplicabilidade da proposta da tese.

1.3 METODOLOGIA

Estudos envolvendo a pesquisa operacional são compostos fundamentalmente pela definição do problema e coleta de dados com objetivos apropriados, formulação de um modelo representativo do problema, desenvolvimento de procedimentos visando derivar soluções a partir do modelo proposto, testes e aprimoramento do modelo de acordo com a necessidade, preparação para aplicação numérica do modelo com base em algum contexto prático e implementação. Nesse sentido, a análise de decisão fornece uma estrutura e metodologia para tomada de decisão racional quando os resultados são incertos (HILLIER; LIEBERMAN, 2015).

De tal modo, o uso de modelos multicritério para solucionar problemas de decisão no contexto das organizações está entreposto na área de Ciência da Gestão e Pesquisa Operacional, onde se originou o ramo que envolve métodos multicritério de apoio à decisão (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Em relação aos procedimentos metodológicos adotados, esta pesquisa configura-se como uma *Design Science Research* (DSR), pois cria e avalia artefatos destinados a resolver problemas organizacionais observados. Esses artefatos podem incluir construtos, modelos, métodos e instanciações. A abordagem da DSR, voltada principalmente para a descoberta e solução de problemas práticos, pode ser configurada como um conjunto de passos lógicos necessários para efetivação de uma determinada atividade, como por exemplo, a tomada de decisão e priorização de ações (HOLMSTRÖM; KETOKIVI; HAMERI, 2009; LACERDA *et al.*, 2013; SIMON, 1996).

Os passos lógicos de uma DSR são compostos por: identificação e motivação do problema; definição dos objetivos; criação dos artefatos; demonstração do uso do artefato para resolver um ou mais instâncias do problema, podendo envolver aplicações, experimentos, estudo de caso ou outra atividade apropriada; avaliação (comparação dos objetivos com os resultados reais observados); comunicação do problema e sua importância, a utilidade do artefato e dos resultados encontrados (HEVNER *et al.*, 2004; PEFFERS *et al.*, 2007).

De tal modo, primeiramente foram definidos o objetivo geral e os específicos. Para fundamentar os objetivos do trabalho, uma revisão da literatura com foco em artigos científicos foi realizada visando demonstrar principais temas abordados relacionados a WCM e Programa WCM. Posteriormente, dois frameworks foram propostos visando apoiar à decisão multicritério em processos de priorização de melhorias nos pilares de custo e segurança do Programa WCM, permitindo um processo estruturado de decisão por meio da integração do MCDM/A com o Programa WCM. Uma aplicação numérica foi realizada com dados reais de uma planta industrial de grande porte, multinacional de bens de consumo, localizada no Nordeste do Brasil e que adota o Programa WCM.

A aplicação numérica foi planejada por meio da escolha da empresa e do especialista no tema abordado. Em seguida, foram definidos os meios e procedimentos para coleta e análise de dados. A coleta de dados documental foi constituída de dados técnicos, históricos e manuais utilizados pela empresa em relação ao Programa WCM. Além disso, paralelamente, para a aplicação, foram coletados dados reais objetivos, bem como inúmeras entrevistas foram realizadas com o especialista, para que informações complementares também pudessem ser coletadas. Com os dados estruturados, foi realizada uma aplicação numérica. A etapa de avaliação foi realizada com base nos resultados comparados com os objetivos do trabalho. Análises de sensibilidade também foram efetivadas. Por fim, recomendações foram geradas por meio da aplicação e comunicados foram executados com base nos resultados obtidos.

A escolha de um método multicritério de apoio a decisão trata-se de uma etapa básica no processo de construção de modelos de decisão. Isto é, qualquer decisor tem um conjunto de estratégias que utilizam ao se depararem com um problema de decisão e o mesmo tempo avalia uma alternativa em virtude das implicações que sua escolha irá ocasionar. Logo, a escolha do método toma como base a estrutura de preferências do decisor, o cenário da organização e o tipo de problema (ALMEIDA *et al.*, 2015).

De tal modo, o principal método que foi utilizado neste trabalho para estabelecer classes consiste em um método de apoio à decisão multicritério, o FTOPSIS-Class. Outros

métodos complementares foram o FMECA, para compor os perfis do modelo de classificação do pilar de segurança, e o *delay time modelling* (DTM), como proposta para o desenvolvimento de projetos de melhorias no âmbito do pilar de custo.

O FTOPSIS-Class (FERREIRA *et al.*, 2018), derivado da Técnica para a Preferência de Ordem por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) (CHEN, 2000; HWANG; YOON, 1981), foi utilizado neste trabalho devido sua praticidade de uso e pela capacidade de avaliar um número ilimitado de alternativas e critérios. Além disso, o uso do *Fuzzy* TOPSIS se mostra adequado para lidar com informações imprecisas e julgamentos subjetivos com critérios quantitativos em situações de incerteza, como também busca resolver problemas de tomada de decisão em ambientes *fuzzy*, onde variáveis linguísticas são utilizadas para o estabelecimento de classes e priorização, de modo que os pesos são demonstrados em termos linguísticos e depois traduzidos em números *fuzzy* (FERREIRA *et al.*, 2018; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015).

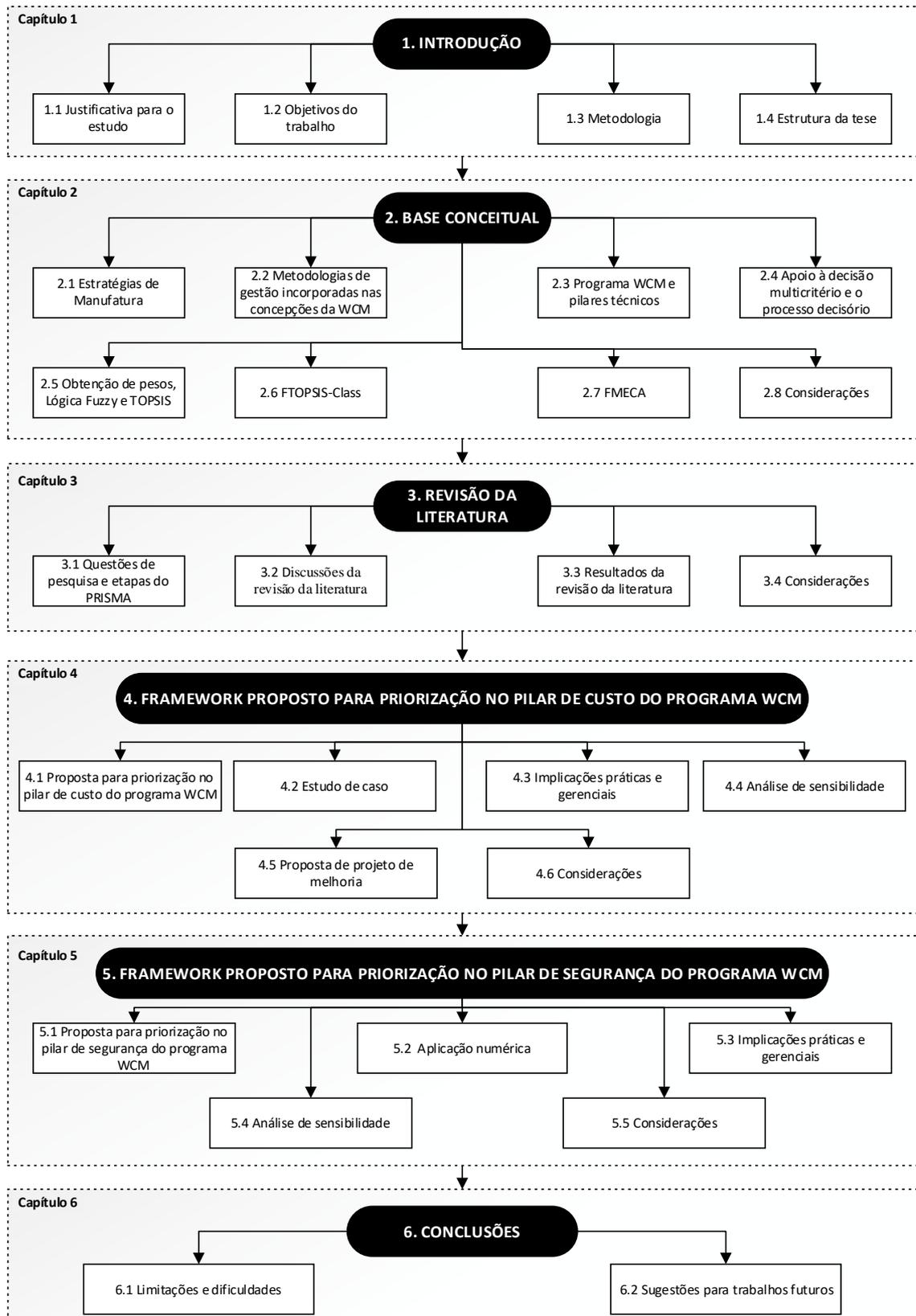
Já o FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), tem como intuito principal a elevação do conhecimento do risco para evitar falhas. A avaliação do FMECA tem como base a gravidade, frequência de ocorrência e detectabilidade de uma falha (BOWLES; PELÁEZ, 1995) e seus princípios são utilizados como parâmetro para os perfis do modelo FTOPSIS-Class no âmbito do pilar de segurança por meio do número de prioridade de risco (RPN).

O modelo *delay time* é utilizado no âmbito do pilar de custo. O DTM é uma ferramenta desenvolvida para modelagem do processo de falha e tem se mostrado útil para desenvolver planos ligados a inspeção e manutenção de baixo custo, como também para o gerenciamento de manutenção preventiva através da determinação de um tempo ótimo de inspeção (SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020).

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Este estudo está dividido em seis capítulos e referências bibliográficas, conforme ilustrado na Figura 1:

Figura 1: Estrutura da tese



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Primeiramente, no capítulo 1, são apresentadas a introdução e justificativa da tese, juntamente com os objetivos, metodologia e estrutura. Depois, no capítulo 2, é apresentado uma base conceitual dos principais assuntos abordados neste estudo.

No capítulo 3, é demonstrado uma revisão da literatura visando demonstrar os principais avanços dos últimos vinte anos, desde 1999 até setembro de 2020, incluindo trabalhos com acessos antecipados envolvendo WCM e temas ou métodos relacionados.

No capítulo 4 é apresentado o framework e aplicação numérica do pilar de custo, bem como as implicações práticas e gerenciais, análise de sensibilidade e as principais considerações do capítulo.

No capítulo 5, é apresentado o framework e aplicação numérica relacionada ao pilar de segurança do Programa WCM juntamente com os resultados, principais implicações práticas e gerenciais, análise de sensibilidade e considerações a respeito do capítulo.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e apêndices.

2 BASE CONCEITUAL

Esta seção tem como objetivo apresentar os conceitos básicos relacionados aos principais temas abordados nesse estudo. Na seção 2.1 foram apresentados conceitos relacionados a estratégias de manufatura. Na seção 2.2 foram exibidos diferentes tipos de metodologias que foram sendo incorporados ao conceito de WCM. Na seção 2.3 foram apresentados os pilares técnicos, com foco no pilar de custo e segurança, foco desse trabalho. Na seção 2.4 foram apresentados conceitos basais de métodos de apoio a decisão multicritério e o processo decisório. Na seção 2.5 foram demonstrados embasamentos relacionados a obtenção de pesos, lógica *fuzzy* e TOPSIS. Na seção 2.6 foram apresentados os fundamentos do FTOPSIS-Class, bem como na seção 2.7 foram apresentados conceitos fundamentais do FMECA.

2.1 ESTRATÉGIAS DE MANUFATURA

Estratégia de manufatura ou produção é uma estratégia a nível funcional que, em geral, está vinculada a hierarquia corporativa e de negócios, isto é, a estratégia de manufatura visa contribuir para que a empresa obtenha vantagens competitivas através da utilização eficaz das forças da manufatura para alcançar objetivos comerciais e corporativos (PLATTS; GREGORY, 1990).

A estratégia de manufatura também pode ser definida como um modelo projetado para melhorar a performance nos objetivos de desempenho e para apoiar as estratégias do negócio (MILLER; ROTH, 1994). Além disso, tem como objetivo básico estabelecer vantagens competitivas sólidas, ou seja, uma estratégia de manufatura eficaz é aquela capaz de apoiar às necessidades do negócio (HAYES; WHEELWRIGHT, 1984).

No entanto, por muitos anos a estratégia de manufatura não foi vista como uma contribuição para a estratégia de negócios, sendo formalmente gerenciada de modo *bottom-up*. Em 1969, a abordagem *top-down* na manufatura foi proposta por Skinner (1969), assim o projeto e a engenharia só deveriam ser realizados após políticas corporativas serem definidas. Skinner (1969) acreditava que a função da manufatura deveria ser capaz de contribuir para os objetivos estratégicos do negócio e da corporação de modo duradouro e sustentável, ou seja, a manufatura deveria ser vista com tanta importância quanto algumas outras funções de negócios para obtenção de vantagens competitivas, como marketing, contabilidade e vendas.

A partir dessas premissas, de acordo com Platts e Gregory (1990), a base de pensamento desenvolvida em relação a estratégia de manufatura foi formada, dividindo a estratégia de manufatura em uma série de aspectos de decisão, tais como processo, capacidade, plantas, integração vertical, infraestrutura etc., tornando evidente que a manufatura busca atender a diversos objetivos de desempenho, tais como: custo, qualidade, confiabilidade ou credibilidade, velocidade ou rapidez e flexibilidade (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Para Slack (1993), obter vantagens competitivas em manufatura quer dizer fazer melhor, isto é, fazer certo (não cometer erros), fazer rápido (o espaço de tempo entre a fabricação e a entrega deve ser menor do que a concorrência), fazer pontualmente (entregar no prazo conforme prometido), mudar o que está sendo feito (estar apto a alterar ou adaptar a operação) e fazer barato (fabricar com custos mais baixos do que a concorrência). Portanto, a obtenção de vantagens competitivas pode ser por meio da obtenção de vantagens em qualidade, rapidez, confiabilidade, flexibilidade e/ou custo.

Embora possam existir algumas variações em relação as definições para cada objetivo de desempenho, na visão de Slack e Lewis (2017), o objetivo de desempenho custo tem como finalidade minimizar o preço do produto acabado como uma forma de obter vantagem competitiva. O baixo custo pode ser alcançado, por exemplo, por meio da redução da variedade dentro dos processos produtivos, por meio de economias de escala, redução de despesas operacionais etc. Já o objetivo qualidade pode ser definido como especificação adequada, isto é, produtos ou serviços são adequados de acordo com a sua finalidade. Para Garvin (2002), o conceito de qualidade pode ser definido de acordo com a abordagem transcendente (qualidade como sinônimo de excelência inata), baseada no produto (qualidade como uma variável precisa e mensurável), usuário (atendimento aos anseios do consumidor), na produção (consonância com as especificações) e baseada no valor (produto ou serviço com preço ou custo cabível).

Já o objetivo velocidade ou rapidez visa maximização de tempo de entrega e/ou de compras de matérias-primas e minimização de tempo de produção, podendo ser definido como o tempo decorrido para produzir um produto ou fornecer um serviço, isto é, indica o tempo decorrido entre o início de um processo e seu final. O objetivo de desempenho confiabilidade/credibilidade significa honrar o tempo de entrega dado ao cliente atendendo as expectativas de uso do produto/serviço. Já, o objetivo de desempenho flexibilidade pode ser definido sob a ótica da flexibilidade de produto ou serviço (capacidade de introduzir e produzir novos produtos ou serviços ou para modificar os existentes), flexibilidade do mix

(capacidade de modificar a multiplicidade de produtos ou serviços em um determinado período de tempo), flexibilidade de volume e flexibilidade de entrega (capacidade de alterar datas de entrega planejadas ou presumidas) (SLACK; LEWIS, 2017).

Os objetivos de desempenho podem ser classificados em critérios ganhadores de pedidos, qualificadores de pedidos e critérios menos importantes. Os ganhadores de pedidos são critérios que contribuem diretamente para a realização de um negócio, ou seja, são as razões-chaves para que consumidores comprem produtos ou utilizem um determinado serviço. Logo, qualquer ampliação no desempenho de um critério ganhador de pedido resulta em um aumento da probabilidade de ganhar mais pedidos. Nos ganhadores, as empresas precisam ser melhores que seus concorrentes. Já os critérios qualificadores podem não ser fatores decisivos de vantagem competitiva ou sucesso, mas têm sua importância porque envolvem fatores competitivos, uma vez que a empresa precisa ser pelo menos tão boa quanto o mercado exige de seus concorrentes para que seja considerada. Isto é, se espera que a atuação da produção esteja acima de um determinado nível para que o produto ou serviço venha a ser uma escolha de um cliente. Por outro lado, os critérios menos importantes são classificados como os que não são ganhadores ou qualificadores de pedidos, isto é, aqueles que não influenciam a escolha do cliente de modo expressivo (HILL, 1993, 1995; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Hill (1995) destacou que ao desenvolver critérios ganhadores e qualificadores, as empresas precisam discernir o grau de importância dos critérios individuais para cada mercado. Isto é, em geral, existem diferenças entre os critérios imprescindíveis para reter clientes fiéis e os imprescindíveis para elevar a participação no mercado ou conquistar compradores em potencial. Todas estas diferenças deverão se refletir nos critérios ganhadores e qualificadores relevantes e em suas respectivas importâncias.

Neste sentido, para que metas e objetivos sejam alcançados, medidas de desempenho são utilizadas para avaliar, controlar e melhorar os processos de produção. Esses indicadores de desempenho também são utilizados para comparar o desempenho de diferentes indústrias, departamentos, equipes e indivíduos (GHALAYINI; NOBLE, 1996).

Além disso, de acordo com Digalwar, Jindal e Sangwan (2015), medidas de desempenho são de suma importância para a implementação das práticas do WCM nas organizações, isto é, conhecer as principais medidas de desempenho e o relacionamento entre elas pode ajudar gerentes, tomadores de decisão e líderes do WCM a compreender de uma forma mais clara os objetivos de desempenho adequados a cada realidade ao implementar o Programa WCM.

Desta forma, uma estratégia da produção pode ser vista também como um padrão de decisões estratégicas e ações para determinar a função da produção e quais métodos serão utilizados para produzir de maneira eficaz, bem como objetivos e atividades que serão desempenhadas (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Para Baines *et al.* (1998), a concepção e implementação de uma estratégia de manufatura pode ser compreendida como atividades de gestão para alcançar conexão entre a capacidade de fabricação, que é medida por uma série de variáveis, bem como pelas necessidades do mercado e ambiente financeiro com base no mix de produção escolhido. Ou seja, o papel estratégico da manufatura refere-se ao nível de participação da manufatura para apoiar a estratégia geral da empresa. Consequentemente, cada organização tende a direcionar suas estratégias de manufatura considerando critérios que as ofereça vantagens competitivas.

2.2 METODOLOGIAS DE GESTÃO INCORPORADAS NAS CONCEPÇÕES DA WORLD-CLASS MANUFACTURING

A recuperação e crescimento industrial do Japão após a Segunda Guerra Mundial mexeu com o panorama das indústrias. O milagre japonês de ser capaz de reduzir custos, elevar o grau de confiabilidade de seus equipamentos e ao mesmo tempo aumentar a qualidade fez com que uma série de metodologias de gestão e estratégias de manufatura surgissem ao longo da história (GIOVANDO; CROVINI; VENTURINI, 2017; SCHONBERGER, 1986).

Ao longo da história e nos mercados altamente competitivos da atualidade, algumas empresas de manufatura se destacam por superarem seus rivais ou serem referências por vários anos, como é o caso do alto desempenho da *Toyota Motor Corporation*, fundada em 1930, conhecida de modo amplo a partir de 1950 devido ao *Toyota Production System* (TPS) e reconhecida, em 1980, como uma das maiores montadoras do mundo (TAKAHIRO FUJIMOTO, 1999). O TPS, consolidado por Ohno (1988), ficou conhecido formalmente como Lean Manufacturing (PHILLIP, 2012) e pela qualidade de fabricação e produtividade que pode proporcionar quando implementado corretamente.

Outros conceitos ou ferramentas de destaque atribuídas ao TPS são *Standardization* (padronização), *Just-in-time* (JIT), Jidoka e Kaizen. A padronização é a ferramenta inicial para qualquer organização que almeje minimizar o uso de recursos, por meio da estabilização de processos, criação de padrões ou metodologias de trabalho. O JIT, refere-se ao modo de produzir e transportar apenas o necessário e/ou no tempo certo, nem muito cedo e nem muito tarde, apenas no ‘tempo certo’ (OHNO, 1988; SUGIMORI *et al.*, 1977).

O Kaizen, conhecido como melhoria contínua ou melhoria operacional, refere-se a uma série de melhorias fundamentadas no processo de mudança gradativa, podendo originar inúmeras melhorias para todas as áreas englobando uma série de aspectos (WITTENBERG, 1994). Para Ohno (1988), Kaizen significa melhoria operacional e consiste na criação de melhores métodos por meio de equipamentos existentes, ou seja, para o autor é importante pensar em novos métodos de trabalho, não somente em fazer novas ferramentas ou equipamentos. O Jidoka, refere-se a automação, isto é, refere-se a capacidade de identificação de anomalias em linhas de modo automático sem necessidade de um operador e desta forma, permitindo que aspectos de qualidade sejam incorporados ao processo produtivo (MONDEN, 2012; SUKARMA; AZMI; ABDULLAH, 2014).

A *Total Productive Maintenance* (TPM) foi desenvolvida no Japão com a finalidade de reduzir paradas de dispositivos e equipamentos, eliminar perdas produtivas e reduzir custos com processos integrados e contínuos. O sistema TPM reconhece, por exemplo, que se o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) aumentar, mas se os padrões de qualidade reduzirem, uma potencial vantagem competitiva será perdida ou, se o conhecimento obtido sobre um processo não produz taxas melhores de retorno sobre o investimento, a empresa não estará fazendo o melhor uso possível de suas capacidades, etc. se a capacidade é aumentada, mas isso não é alcançado pela geração de novos negócios, perde-se a oportunidade de reduzir custos unitários. Os pilares do TPM são melhoria contínua em OEE, melhoria focada, atendimento de ativos de operações (manutenção autônoma mais planejada), manutenção da qualidade, TPM em administração, desenvolvimento contínuo de habilidades, implantação de segurança e gerenciamento inicial (SUKARMA; AZMI; ABDULLAH, 2014; WILLMOTT; MCCARTHY, 2001).

O *Total Quality Management* (TQM) consiste em uma abordagem de gestão integrada visando esforços de desenvolvimento, manutenção da qualidade e melhorias em organizações a fim de manter continuamente processos de produção e de serviços, envolvendo a gerência, trabalhadores, fornecedores e membros da organização em geral, objetivando atender as demandas e satisfações dos clientes (CUA; MCKONE; SCHROEDER, 2001; FEIGENBAUM, 1961). Vale destacar que, há décadas o *Quality Management* (QM) tem sido integrado ao movimento das WCM para obter qualidade de serviço ou produto a nível de classe mundial.

Em geral, todas estas metodologias, a saber TQM, JIT, Kaizen e TPM, desenvolvem um papel importante nos princípios da WCM, pois contribuem para que os objetivos de melhoria contínua e redução de resíduos ou desperdícios sejam alcançados (CUA; MCKONE;

SCHROEDER, 2001; TAIICHI OHNO, 1988). Todos estes modelos e ferramentas de gestão foram incorporados pelas WCM.

O termo WCM foi inicialmente apresentado, em 1985, por Hayes e Wheelwright (1984), que classificaram como WCM aquelas empresas que tenham alcançado o estágio 4 de maturidade na manufatura ou o chamado “suporte externo”, isto é, empresas que buscam uma vantagem competitiva baseada na manufatura. Ou seja, uma WCM concentra seus esforços para se antecipar em relação a novas práticas e tecnologias de produção, fazendo com que a manufatura esteja inserida em decisões importantes, como de engenharia e marketing, por exemplo. Além disso, a prática de desenvolver programas pensando a longo prazo para que a manufatura se antecipe e adquira capacidade de controle antes das necessidades é recorrente.

Em seguida, Schonberger (1986) demonstrou sua visão sobre uma WCM revelando que a excelência da fabricação japonesa poderia ser utilizada da mesma forma nas indústrias dos Estados Unidos da América (USA) através de técnicas e métodos eficazes, como é o caso *General Electric*, primeira experiência de WCM nos USA. Ou seja, obtenção de excelência por meio das melhores práticas em todo ciclo produtivo e logístico. Assim, a WCM tem como finalidade trabalhar com o gerenciamento combinado e para conquistar o status de classe mundial, organizações necessitam modificar procedimentos e conceitos, reformulando a junção entre fornecedores, compradores, produtores e clientes.

Uma WCM também pode ser definida como o reconhecimento ou importância de uma organização como uma referência no setor onde atua e, devido alguns atributos, por outros setores industriais também. Além disso, a metodologia WCM tem como objetivo fundamental a melhoria contínua em todas as áreas de produção, com intuito de garantir a qualidade do produto e atender às expectativas do cliente (DUBEY; GUNASEKARAN; CHAKRABARTY, 2015).

2.3 PROGRAMA WCM E PILARES TÉCNICOS

Em 2005, após um período de recessão, a Fiat superou a crise, houve então a chamada “*Turnaround at Fiat*”, e foi estabelecido que o Programa WCM se tornaria seu modelo industrial. No mesmo período, juntamente com o professor emérito Hajime Yamashima da Universidade de Kyoto, começou a ser estabelecido um novo estilo de WCM, sendo formulado como um programa e com etapas para implementação (CHIARINI; VAGNONI, 2015; EDE, 2015). Este novo modelo de WCM enxerga que WCM é um modo de trabalhar que requer métodos, instrumentos, padrões, premissas em ferramentas, liderança e foco nas perdas.

Em 2006, foi fundada por gerentes e professores universitários, após o workshop *Achieving Performance Excellence*, a *World Class Manufacturing Association* (WCMA), uma organização sem fins lucrativos de indústrias de manufatura. A finalidade da WCMA é agenciar o desenvolvimento e a execução das melhores práticas de produção, cooperando para que haja um sistema de produção com vantagens competitivas. Também é nomeado um Auditor oficial para apoiar o programa e conferir “*WCM Awards*” as principais fábricas (CHIARINI; VAGNONI, 2015; GIOVANDO; CROVINI; VENTURINI, 2017; GROUP, 2019).

Em 2007, o modo de trabalhar WCM foi ampliado a todas as plantas da *Fiat Group Automobiles* (FGA), *Fiat Powertrain Technologies* (FPT), *Magneti Marelli*, CNH Industrial e Iveco. Em 2008, foi constituída a academia WCM. Em 2009, a Chrysler adota a WCM e, em 2010, o Programa WCM foi ampliado aos fornecedores e a outras empresas do grupo Fiat, como *Comau* e *Teksid* (GROUP, 2019).

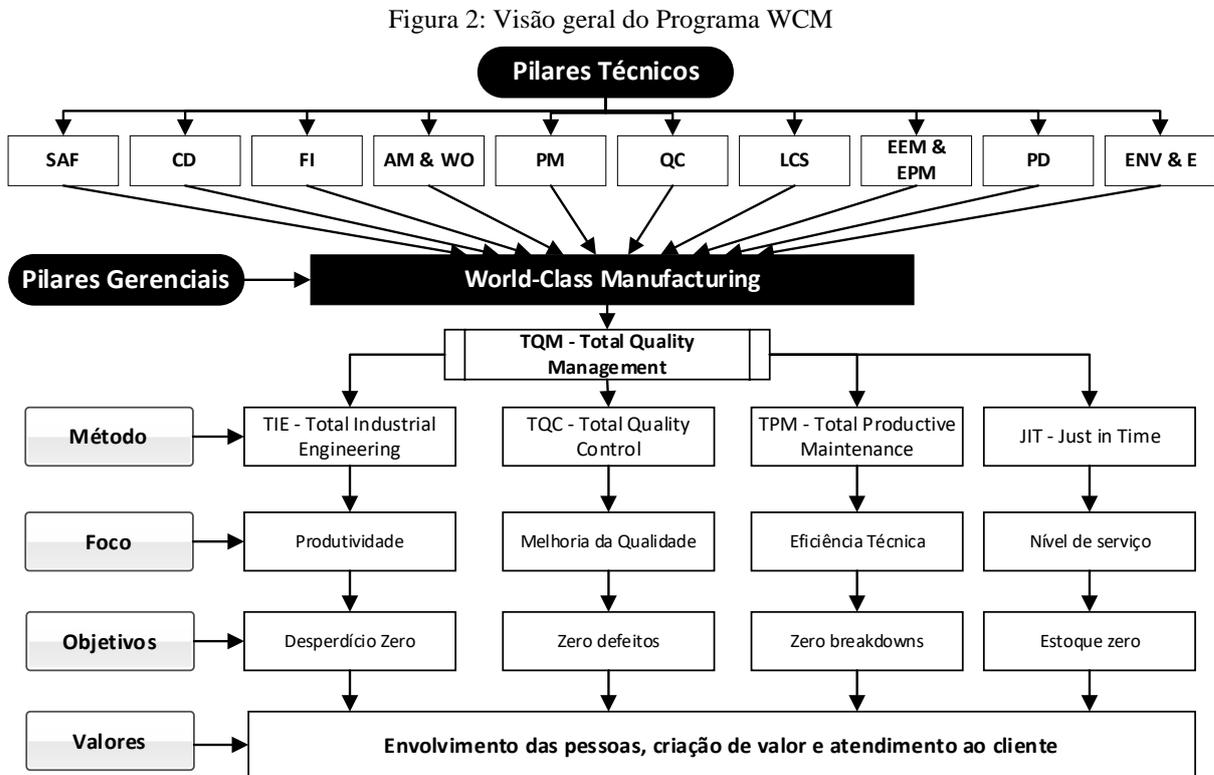
Desde sua criação, o Programa WCM através da WCMA compartilha conhecimento e aprendizados com empresas membros, fundamentado em pilares gerenciais e técnicos, como por exemplo FCA, Unilever, B³, *Royal Mail*, *Ariston Thermo Group*, *ArcelorMittal*, Embraco e outras (GROUP, 2019). Assim, de modo geral, o Programa WCM visa por meio de princípios, pilares técnicos, métodos e ferramentas aumentar o nível dos serviços, do OEE de equipamentos e máquinas, da produtividade com a melhor qualidade possível (FELICE; PETRILLO; MONFRE, 2013).

Os dez pilares gerenciais são compromisso de gerenciamento, clareza de objetivos, mapa de rotas para o WCM, alocação de pessoas altamente qualificadas, comprometimento da organização, competência da organização, tempo e orçamento, nível de detalhes, nível de expansão e motivação dos operadores (FELICE; PETRILLO; MONFRE, 2013).

Já os pilares técnicos utilizados na metodologia WCM embora apresentem pequenas variações em termos de quantidade, no geral são: *Safety* (SAF), *Cost Deployment* (CD), *Focused Improvement* (FI), *Autonomous Maintenance* (AM), *Workplace Organization* (WO), *Professional Maintenance* (PM), *Quality Control* (QC), *Logistics & Customer Service* (LCS), *Early Equipment Management* (EEM), *Early Product Management* (EPM), *People Development* (PD), *Environment* (ENV) e *Energy* (E). Ao mesmo tempo que algumas empresas e/ou estudos desmembram pilares seguindo a metodologia criada por Yamashina e implementada pela *Fiat Chrysler Automobiles* (FCA) (GIOVANDO; CROVINI; VENTURINI, 2017), ocorre que a maior parte dos autores optam por unir os pilares AM ao WO, EEM ao EPM e ENV ao E, configurando assim dez pilares de sustentação do WCM. Isto

é, os dez pilares técnicos são SAF, CD, FI, AM, PM, QC, LCS, EEM, EPM, PD e ENV (D'ORAZIO; MESSINA; SCHIRALDI, 2020; MRÓZ, 2018).

Uma visão geral do Programa WCM pode ser observada na Figura 2:



Fonte: Adaptado de Felice, Petrillo e Monfre (2013).

De maneira sucinta, cada pilar tem um objetivo diferente, mas o foco é o mesmo, melhoria contínua. De acordo com Felice, Petrillo e Monfre (2013), o foco do Programa WCM com a adoção destes métodos e ferramentas é obter maior produtividade, melhorias de qualidade, maior eficiência técnica de máquinas, equipamentos e dispositivos, bem como aumentar o nível dos serviços. Em outras palavras, as WCM têm como finalidade alcançar o zero desperdício e perda, zero defeito, zero *breakdown* e zero estoque. Os valores do modo WCM de trabalho são envolvimento das pessoas, criação de valor e clientes satisfeitos.

O pilar de segurança visa eliminar acidentes; o de CD busca identificar onde estão os problemas do ponto de vista do custo; FI criar um know-how importante e reduzir custos, especialmente usando o método adequado; AM e WO visam aumentar a competência dos funcionários pela organização do local de trabalho em áreas intensivas em mão-de-obra e pela manutenção autônoma em áreas intensivas em capital; PM almeja obter zero avarias com a equipe de manutenção; QC busca atingir zero defeito do ponto de vista do TQC; LCS tem como finalidade satisfazer totalmente os clientes do ponto de vista da TQC; EEM e EPM visa

o lançamento de novos equipamentos ou produtos sem problemas na produção; PD objetiva educar, treinar e nutrir pessoas para materializar o WCM, uma vez que o sucesso de alcançar o WCM depende das pessoas; ENV e E visam criar uma existência respeitável para a comunidade do ponto de vista ambiental (YAMASHINA, 2010).

O TQM (*Total Quality Management*) – Gestão da Qualidade Total é uma das principais abordagens que complementam as estratégias do WCM, juntamente com o TIE (*Total Industrial Engineering*) – Engenharia Industrial Total, TQC (*Total Quality Control*) – Controle da Qualidade Total, TPM (*Total Productive Maintenance*) – Manutenção Produtiva Total e JIT (*Just-in-time*) – Na hora certa. A TIE é descrita como componente fundamental do Sistema Toyota de Produção e como uma série de métodos em que a performance do trabalho é maximizada por meio da redução da sobrecarga de trabalho (Muri), da inconstância ou falta de padronização na operação (Mura) e do desperdício ou operações sem valor agregado (Muda) (GOING, 1911; YAMASHINA, 2010).

O TQC refere-se ao controle de qualidade e é uma base para o WCM também. O TQC deve ser uma responsabilidade de todos, em todos os níveis e departamentos, incluindo marketing, design, produção, inspeção e logística (FEIGENBAUM, 1961; MONDEN, 2012).

Já o TQM, quando aplicado no campo de fabricação, é considerado sinônimo do WCM. No Japão, por exemplo, é dito que para que uma empresa seja forte o suficiente na manufatura, é necessário ter cérebros adequados e alta capacidade de fabricação ou “músculos fortes”. Para Yamashina (1995), o cérebro corresponde ao TQM e os músculos ao TPM, uma vez que o cérebro carece estar integrado aos músculos por um bom sistema nervoso, em alusão aos princípios do JIT.

O Programa WCM tem alguns princípios básicos (FELICE; PETRILLO, 2015; PETRILLO; FELICE; ZOMPARELLI, 2019):

- Envolvimento das pessoas (chave para a mudança);
- Não é apenas um projeto, mas uma nova maneira de trabalhar;
- Prevenir acidentes é um valor que não se abre mão;
- A necessidade e exigência do cliente deve alcançar todos os departamentos;
- Líderes devem respeitar e prezar pelos padrões estabelecidos;
- As metodologias devem ser aplicadas com consistência e rigor;
- Todas as formas de resíduos (*non-value added operation*) são intoleráveis;
- As falhas, em geral, devem ter visibilidade;
- Deve-se eliminar a causa e não tratar o efeito dela.

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).

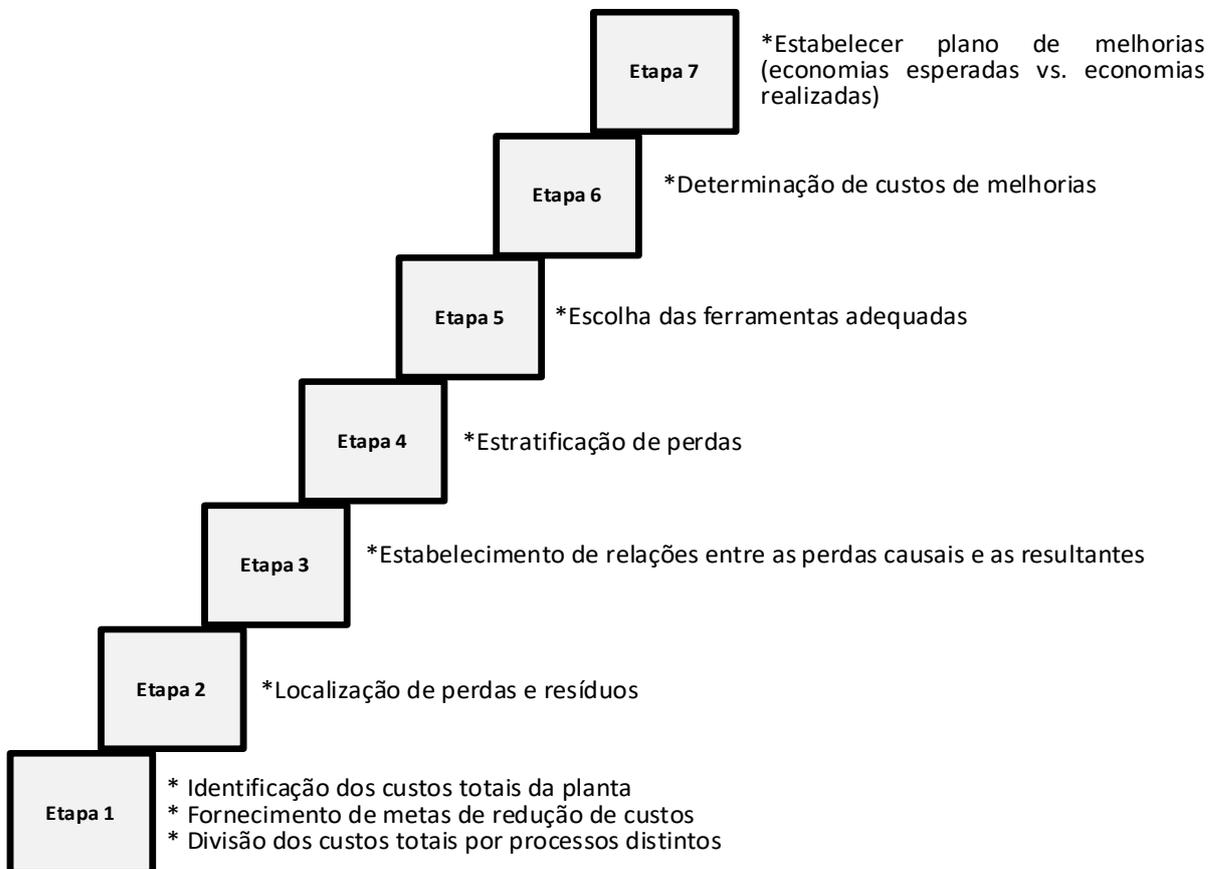
Além disso, o Programa WCM baseia-se em um sistema com auditorias periódicas que fornece uma pontuação e o nível mais alto representa o “nível de classe mundial” (GROUP, 2019).

2.3.1 Pilar de custo

O pilar técnico de *cost deployment* (CD) ou custo, consiste em um procedimento que constitui um programa de redução de custo, científica e sistematicamente, com a cooperação entre finanças e a manufatura. Este pilar (CD) visa quantificar e priorizar os desperdícios e perdas das plantas industriais (YAMASHINA; KUBO, 2002).

O pilar de CD é fundamentado em uma técnica dividida em sete etapas, conforme ilustra a Figura 3:

Figura 3: Visão geral das etapas do pilar de custo



Fonte: Adaptado de Yamashina (2010) e D’Orazio, Messina e Schiraldi (2020).

A primeira etapa versa em identificar os custos totais de transformação da fábrica por departamento financeiro, estabelecendo metas de redução de custo por período (geralmente a cada 6 meses), bem como separar os custos diretos e indiretos por cada tipo de processo. Ou seja, nesta primeira etapa, ocorre um detalhamento do custo de transformação e custos dos diferentes processos. É importante ressaltar que as metas de redução de custos são definidas de acordo com a estratégias da empresa. A segunda etapa consiste em identificar perdas e desperdícios de modo qualitativo e quantitativo, com base no histórico operacional, se houver. Assim, dados provenientes de chão de fábrica (dados de produção, coleta de resíduos, recursos humanos, logística, manutenção, entre outros) são transferidos para a Matriz A. A terceira etapa é apoiada pela Matriz B e consiste em identificar e separar as perdas causais (perda que gera uma ou mais perdas) das resultantes (perdas de material, mão-de-obra, energia etc.) com intuito de eliminar as causas causais. Em outros termos, para eliminar uma perda resultante é necessário que as perdas causais sejam atacadas. A quarta etapa trata-se da tradução das perdas e desperdícios em termos de custos, este processo é apoiado por meio da Matriz C, assim para cada perda é atribuído um valor monetário em termos de custo. A quinta etapa aborda a identificação das ferramentas e métodos que serão utilizados para reduzir os defeitos e recuperar as perdas. Consequentemente, com auxílio da Matriz D é possível observar a categoria das perdas (se foi em um equipamento, na parte de energia etc.), as perdas ocorridas (*breakdowns*, perda devido tempo com manutenção, limpeza, entre outras), a área onde essas perdas ocorreram, a linha industrial e/ou máquina pertencente, a quantidade de perdas e o valor total perdido no período analisado. A partir disso, as prioridades de ações são definidas de acordo com o impacto financeiro, ou melhor, pelos maiores custos do período, do maior para o menor. A sexta etapa visa estipular os custos de melhorias e o quanto será possível reduzir de custo por processo ou área, em outras palavras, é estabelecido uma relação de custo por benefício gerado com auxílio da Matriz E. Por fim, na sétima etapa é o momento de estabelecer um plano de melhoria a ser implementado e por meio de auxílio da Matriz F e G se pode monitorar e acompanhar os projetos de melhoria. A Matriz F fornece informações de planos de ações e a G da economia prevista e realizada com base no orçamento (D'ORAZIO; MESSINA; SCHIRALDI, 2020; EDE, 2015; PETRILLO; FELICE; ZOMPARELLI, 2019).

É importante salientar que as empresas nem sempre conseguirão descobrir ou compilar uma análise de todas as perdas ou desperdícios de fabricação. Segundo Yamashina e Kubo (2002), caso uma empresa consiga atuar em cerca de 40% das perdas, esse valor já seria uma porcentagem satisfatória da contabilização de perdas ou resíduos convertidos em valor

monetário, podendo ser ampliada a redução de perdas de forma sistemática através do processo de melhoria contínua. Além disso, é importante ressaltar que o cumprimento efetivo de cada etapa vai depender do nível de cada empresa em relação ao Programa WCM (EDE, 2015; YAMASHINA; KUBO, 2002), isto é, a implementação das sete etapas requer tempo, investimento e foco por parte das organizações.

Em geral, os sistemas produtivos apresentam vários desperdícios e perdas, como por exemplo, defeitos, atividades sem valor agregado (*non-value-added activities* - NVA), baixos níveis de equilíbrio, manuseio de perdas, atraso na aquisição de material, solução de problemas de máquinas, instalação e *breakdown* (TAIICHI OHNO, 1988).

Para melhorar o fluxo de caixa, segundo Yamashina (2010), o desempenho da produção é fundamental, porém este desempenho pode variar de país para país, empresa, da cultura corporativa, da fábrica e dos funcionários, mesmo que seja usado o mesmo equipamento. Assim dizendo, em uma fábrica, normalmente existem enormes quantidades de desperdícios e perdas, como *breakdown* de máquinas ou equipamentos, problemas com instalações mecânicas ou elétricas, defeitos de qualidade, paradas ou falhas por problema com manutenção, atrasos na entrega de peças de fornecedores, ausência de operadores etc., perdas as quais tem potencial para aumentar o custo de produção.

Assim, a perda pode ser definida como qualquer recurso que após ser inserido no sistema produtivo acaba por não gerar valor para o cliente. As perdas (trabalho que acrescenta um custo sem adicionar valor) podem ser elimináveis ou não elimináveis podem ser ajustadas em unidade física (quantidade de peças, kwh perdido, horas gastas sem necessidade etc.), assim como podem ser transformadas em custo. Já o desperdício configura-se como uma utilização excessiva dos recursos. Assim, o custo, valor monetário pago pelos recursos inseridos num sistema produtivo, são medidos em dinheiro. Portanto, as perdas e desperdícios podem ser compreendidas como um fragmento do custo que agrava um resultado financeiro por não adicionar valor ao produto (PETRILLO; FELICE; ZOMPARELLI, 2019; YAMASHINA, 2000; YAMASHINA; KUBO, 2002).

2.3.1.1 *Delay time modelling* como alternativa de redução de custos de perdas

De acordo com Yamashina e Kubo (2002), as perdas e desperdícios podem ser traduzidas como uma fração do custo, levando a um agravamento financeiro por não adicionar valor ao produto. Dentre uma série de perdas que levam ao agravamento do custo estão os problemas com ausência de inspeções e/ou política de manutenção (preventiva ou preditiva) adequada dos equipamentos para melhor gestão dos ativos da empresa. Isto é, defeitos podem

fazer com que haja uma redução de eficiência equipamentos e máquinas, bem como as falhas podem ocasionar perda total de lotes de produção, um equipamento específico, máquina ou todo o sistema, levando a custos desnecessários de paradas não programadas, dentre outros fatores.

No pilar de custo em WCM, os custos com manutenções ou ausência delas, que ocasiona quebras ou paradas do sistema, são um dos maiores custos provenientes de perdas e desperdícios, podendo comprometer de maneira direta o orçamento estimado para o período (YAMASHINA, 2010).

O DTM trata-se de um modelo muito utilizado para gerenciamento da manutenção através da determinação do tempo ideal de inspeção antes da ocorrência de falhas, que foi utilizado inicialmente para solucionar problemas de manutenção no setor da construção civil (CHRISTER, 1976) e depois se expandiu para a conjunção de manutenção industrial (CHRISTER; WALLER, 1984a).

Desta forma, o DTM configura-se como uma técnica de modelagem desenvolvida para acolher problemas de manutenção relacionados a inspeção e planejamento de intervenções. Assim, de acordo com as premissas do DTM um equipamento, máquina, ferramenta ou sistema pode se deparar em três estados, operacional, defeituoso ou falho. De maneira que, a falha advém em duas fases. A primeira incide no intervalo entre o estado operacional até o ponto em que um defeito que esteja oculto seja identificado. A segunda fase advém do ponto em que existe uma identificação de defeitos até que de fato a falha ocorra (SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020).

Assim, a partir do momento que o DTM foi utilizado no contexto industrial, uma série de aplicações envolvendo inspeções em ativos industriais e organizacionais foram sendo realizadas visando melhorias através do gerenciamento da manutenção e modelagem de falhas (CAVALCANTE; LOPES; SCARF, 2018; CHRISTER; REDMOND, 1992; SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020; WANG, 2000; WANG, 2011; WANG; WANG, 2015; ZAHEDI-HOSSEINI; SYNTETOS; SCARF, 2018), centralizando-se na frequência das inspeções em que o estágio inicial das falhas, chamado de defeitos, pode ser notado.

Assim dizendo, o DTM compreende que ações corretivas sobre um defeito são menos custosas do que em relação a uma falha (WANG, 2012). Portanto, o modelo *delay time* pode ser utilizado visando a redução de custos (SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020) e outros aspectos de perda provenientes de ativos (CHRISTER; REDMOND, 1992; SOUZA; WANG, W., 2000; WANG, 2011; WANG; WANG, 2015; ZAHEDI-HOSSEINI; SYNTETOS; SCARF, 2018).

O DTM apresentado por Souza e Almeida-Filho (2020) considera a redução de custos através da determinação do tempo ideal de inspeção para detecção de defeitos em seu estágio inicial. Uma vez identificado um componente ou sistema crítico através do pilar de custo do WCM, os conceitos do DTM podem ser aplicados como um projeto WCM de melhoria neste equipamento visando a redução de custos por meio da eliminação de defeitos ou mitigação de falhas através de uma política de manutenção que contemple o intervalo ideal de inspeção neste equipamento. É importante ressaltar que falhas originam uma série de consequências em termos de valor monetário para as empresas (JONES; JENKINSON; WANG, 2009).

2.3.2 Pilar de segurança

Especialistas em segurança advogam que um ambiente de trabalho livre lesões gera não somente atitudes positivas dos colaboradores como também um senso de comprometimento e responsabilidade com a segurança própria e do próximo. Por consequência, um ambiente seguro resulta em uma qualidade maior e menores custos totais de produção devido à redução de retrabalhos, perda de tempo e de dias úteis (ANSARI; MODARRESS, 1997; SMITH, 1995).

Acidentes e incidentes de trabalho repercutem expressamente na integridade física e psíquica de um trabalhador, além de consequências à imagem da empresa, qualidade do produto, no tempo de ciclo produtivo e no custo anual devido a potenciais processos trabalhistas. Por isso, estratégias voltadas à segurança devem ser valorizadas assim como são quando atreladas à melhoria da qualidade ou à redução de custos e *lead time* para obter status de WCM (ANSARI; MODARRESS, 1997).

Programas de segurança devem incluir a identificação de riscos, implementação de programas voltados a segurança e a eficácia do programa deve ser medida por meio da avaliação de mudanças comportamentais de segurança, taxas de incidentes e acidentes, número de mortes ou feridos etc. Portanto, avaliações preliminares incluem o monitoramento de ruídos e vibrações, particulados, classificação de zonas de perigo e identificação de agentes físicos, químicos e biológicos (STEWART, 2002).

No Programa WCM, a segurança está acima de tudo e a metodologia não pode ser implementada sem tal conquista, ou seja, o “zero acidente” deve ser buscado continuamente por meio do cumprimento de etapas. Além disso, o pilar de segurança tem como propósito desenvolver uma cultura de prevenção de acidentes e melhorar a ergonomia do local de trabalho (CHIARINI; VAGNONI, 2015).

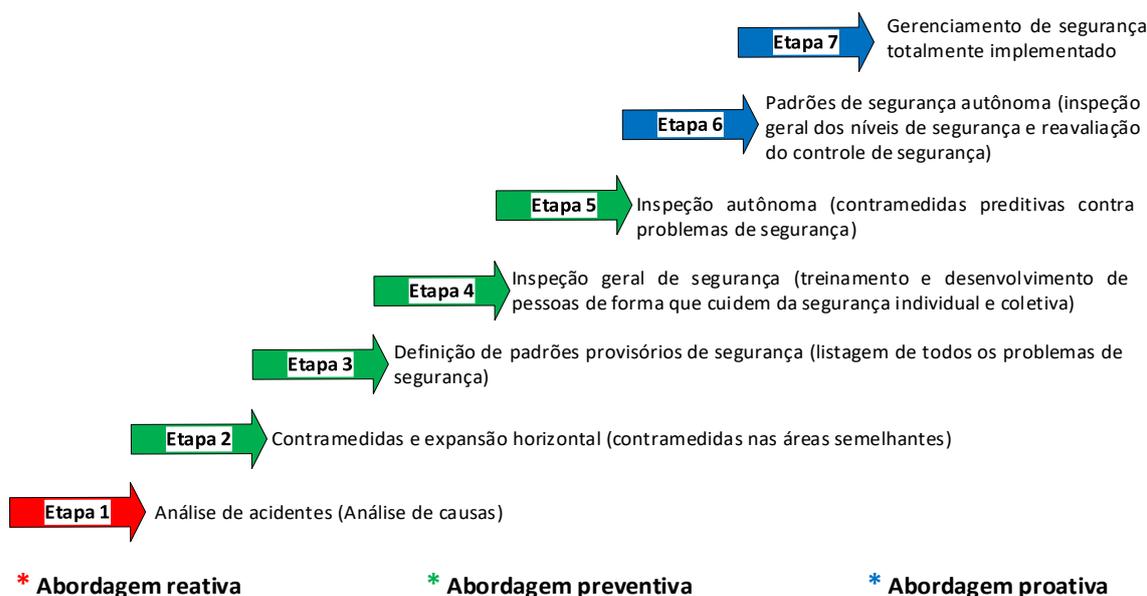
De tal forma, existem vários *Key Performance Indicator* (KPI) que servem como métricas dentro do pilar de segurança, além dos *Key Activity Indicators* (KAI), que estão ligadas as atividades que devem ser realizadas conforme a definição de cada KPI. Segundo Felice, Petrillo e Monfre (2013), os atributos ou KPIs principais do pilar de SAF são: *fatality* (FA), *lost time accident* (LTA), *restricted work case* (RWC), *medical treatment case* (MTC), *first aid case ou incident* (FAC/FAI), *near miss* (NM), *unsafe condition* (UC) e *insecure act* (UA).

Fatalidade pode ser definido como um acidente, desastre ou doença ocupacional que resulta em morte. Já o LTA refere-se ao acidente sofrido por um funcionário no trabalho resultando em absenteísmo ou atraso na carga de trabalho normal realizada por esse trabalhador. RWC configura-se na restrição de as suas funções normais de um funcionário devido alguma lesão ou doença ocupacional, culminando na transferência temporária de função. MTC significa o caso de uma 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, ou seja, não ocorreram danos ou ferimentos pessoais devido a uma pequena mudança circunstancial. 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; SHIN *et al.*, 2014; 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; SALVENDY, 2010; SHIN *et al.*, 2014; STEWART, 2002).

Na Figura 4, é apresentado as sete etapas de segurança e as respectivas abordagens (reativa, preventiva e proativa):

Figura 4: Visão geral dos passos para implementação do pilar de segurança



Fonte: Adaptado de Yamashina (2010) e D'Orazio, Messina e Schiraldi (2020).

Na primeira etapa, as ocorrências de um acidente ou incidente de trabalho devem ser esclarecidos através de análises das causas, verificando a origem e frequência dos eventos. Na segunda etapa, deve ser identificado quais medidas podem ser tomadas para remoção ou diminuição do perigo. Na terceira etapa, causas ocultas de incidentes e acidentes devem exibidas por meio de análises e investigações. Na quarta etapa, a segurança deve ser vista como importante para todos e não somente pela equipe de segurança da planta. A quinta etapa reflete os treinamentos realizados na quarta, uma vez que nesta etapa as pessoas devem ser orientadas a olharem o próprio ambiente de modo crítico, buscando oportunidades de melhorias. Na sexta etapa, espera-se que normas de segurança sejam respeitadas e cumpridas por toda equipe, assim como padrões próprios de um ambiente de trabalho seguro e protegido podem e/ou devem encorajados. Por fim, na sétima etapa consiste na implementação total de um sistema de gerenciamento de SAF proativa, de modo que haja projetos inerentes a equipamentos, processos, linhas produtivas e áreas industriais, voltados para que pessoas não comentam erros, que considere a saúde física e mental do trabalhador, dentre outros fatores (MUDA; HENDRY, 2002; NOVICKÁ; PAPCUN; ZOLOTOVÁ, 2016; SUKARMA; AZMI; ABDULLAH, 2014; YAMASHINA, 2010).

Abordagens reativas dizem respeito a ações emergenciais tomadas para analisar somente as causas dos acidentes. Esta é uma ação esperada básica. Abordagens preventivas correspondem a ações que visam prevenir a ocorrência de acidentes por meio de padronização, treinamento de pessoas para identificação de possíveis riscos e uma educação

disciplinar voltada a segurança pessoal e dos demais indivíduos da empresa. Abordagens proativas significam que a gestão da segurança foi efetivamente implementada na empresa, de modo que a identificação de riscos e a inspeção diária de segurança ocorre em todos os níveis da organização e que aspectos comportamentais voltados a segurança estão controlados (CEPIN; BRIS, 2017; FELICE; PETRILLO; MONFRE, 2013; MICHAUD, 1995; YAMASHINA, 2010).

2.4 APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO E O PROCESSO DECISÓRIO

Situações em que se tem no mínimo duas alternativas para escolher e se quer atender a mais de um objetivo (critério) configuram-se como um problema de decisão multicritério. Logo, a construção de modelos de decisão e a seleção do método a ser utilizado no contexto das organizações estão espontaneamente ligados aos atores do processo decisório (ALMEIDA, 2013).

De tal forma, o processo decisório pode abranger somente um decisor ou um grupo de decisores, bem como outros atores podem ser considerados num processo decisório, como o analista (fornece suporte metodológico), o especialista (fornece informações baseada em fatos sobre o problema em análise), os *stakeholders* (partes interessadas e influentes na decisão), terceira parte (quem é afetado pela decisão, funcionários etc.) e o assessor (decisor intermediário). É importante ressaltar que em algumas situações o especialista pode assumir o posto de decisor intermediário também (ALMEIDA, *et al.*, 2015; ROY, 1996).

Ao modelar um processo de decisão, as problemáticas podem ser de seleção (ALMEIDA-FILHO; ALMEIDA; COSTA, 2017; ALMEIDA *et al.*, 2016; IJADI MAGHSOODI *et al.*, 2018), classificação (ALMEIDA-FILHO; LIMA SILVA; FERREIRA, 2020; FERREIRA. *et al.*, 2018; LIMA SILVA; ALMEIDA FILHO, 2020; LIMA SILVA; FERREIRA; ALMEIDA-FILHO, 2020), ordenação (HSU, 2004; PENG; WANG; WU, 2016), portfólio (GUPTA; MEHLAWAT; SAXENA, 2008) ou descrição das alternativas com base em informações mensuráveis em diferentes campos em relação aos múltiplos atributos (LIU, *et al.*, 2019; ROY, 1996).

Sendo que, quando esses problemas de apresentarem um número finito de alternativas de decisão os mesmos são classificados como problemas discretos e, ao apresentar um número imensamente elevado de alternativas, deve ser classificado como contínuo (ROY, 1996).

Desta forma, a tomada de decisão consiste em esforços despendidos para resolver problemáticas com objetivos conflitantes, cujo esses conflitos impedem a possibilidade de

obtenção de soluções ótimas e conduz à busca por melhores soluções de compromissos (ZELENY, 1982).

Todo problema com mais de uma alternativa para chegar a uma solução depende de uma decisão, seja ela complexa ou não, estratégica ou particular e irracional ou racional. Entretanto, toda decisão tem uma consequência favorável ou não, com diferentes horizontes de tempos (ALMEIDA, 2013).

Por isso, decisões são consideradas importantes ferramentas para enfrentar desafios, criar ou lidar com oportunidades e incertezas. Assim, saber decidir é competência fundamental para que manufaturas, organizações e pessoas se sustentem de maneira contínua. E para que tais decisões possam ser consideradas eficazes, o mínimo esperado é que decisores, indivíduos que estabelecem suas preferências sobre um problema e que tem a responsabilidade das consequências envolvidas em tal decisão, saibam trabalhar com o problema adequado e com objetivos bem definidos, desenvolvendo opções de solução através do pensamento, buscando compreender as consequências e incertezas, bem como analisando rigorosamente os riscos toleráveis e as possíveis conexões entre decisões (KEENEY; RAIFFA, 1976).

2.4.1 Métodos MCDM/A

Os métodos (ou modelos) de tomada ou análise de decisão multicritério (MCDM/A), a partir da pesquisa operacional, consistem em ferramentas matemáticas e computacionais projetadas para apoiar a avaliação subjetiva de um número finito de decisão sob um número finito de critérios de desempenho por um tomador ou um grupo de decisão juntamente com outros atores do processo (LOOTSMA, 1999).

Os métodos MCDM/A podem ser aplicados para diversas situações, apresentando-se com o objetivo de oferecer suporte e direcionamento a um tomador de decisão no desenvolvimento de um problema que tenha no mínimo duas alternativas de ação para escolher. Também, podem ser classificados de diferentes modos, tais como pelo espaço de ações, podendo ser discreto ou contínuo (ALMEIDA, *et al.*, 2015).

Por isso, com intuito de solucionar problemas de decisão, há diversos métodos MCDM/A que são compreendidos como os mais corriqueiros na literatura. Métodos como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), criado em 1960 por Thomas L. Saaty. No AHP os problemas são analisados por meio de níveis hierárquicos, além disso, o método agrega diferentes pontos de vista em uma única função que posteriormente será otimizada (critério único de síntese) (SAATY, 1990).

Roy (1968) propôs o ELECTRE, que depois outros autores o ampliaram em diversas versões, tais como *Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*, ELECTRE I, II, III, IV, IS e TRI. A família de métodos ELECTRE distinguem entre si por causa da problemática que cada método visa resolver. O ELECTRE é um método de sobreclassificação e sucedido da escola francesa.

O *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) foi proposto por Edwards e Von Newmann em 1980 e, foi um dos primeiros métodos MCDM/A a ganhar destaque na literatura pelos diversos campos de aplicação. O MAUT, advindo da escola americana, é caracterizado por ser um método de critério único de síntese e derivou da teoria da utilidade e o modelo de agregação utilizado é o aditivo (ALMEIDA *et al.*, 2015).

A família de métodos PROMETHEE são métodos de sobreclassificação e que também se difundiram na literatura por meio de diversos tipos de aplicação, tendo como finalidade básica auxiliar decisores a escolher a alternativa que melhor se adapte à sua estratégia. No PROMETHEE é fornecido um conjunto global e racional para a estruturação de um problema de decisão, sendo possível identificar e quantificar conflitos por meio de um conjunto de alternativas (BEHZADIAN *et al.*, 2010; BRANS; VINCKE, 1985).

Uma série de outros métodos MCDM/A são baseados na Técnica para a Preferência de Ordem por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS). O TOPSIS, desenvolvido por Hwang e Yoon (1981), baseia-se na apreciação de que a ação escolhida deve ter a menor distância geométrica da solução ideal positiva e a maior distância geométrica da solução ideal negativa.

De acordo com Almeida *et al.* (2015), também existem outros métodos que merecem destaque, por exemplo, os métodos interativos por associarem com problemas discretos ou contínuos, como é o caso da programação linear multiobjetivo.

Além destes, uma série de outros métodos foram criados e derivados integralmente objetivando apoiar decisores na análise ou tomada de decisão multicritério.

2.5 OBTENÇÃO DE PESOS, LÓGICA FUZZY E TOPSIS

Quando problemas de decisão envolvem mais do que um critério, a obtenção de pesos é utilizada por muitos métodos, pois explana a importância relativa de cada critério (ALMEIDA, *et al.*, 2015).

De acordo com Liu *et al.* (2019), obter pesos dos atributos é uma tarefa importante em MCDM/A e essa obtenção pode ser dividida três abordagens, subjetiva (FERNANDEZ *et al.*, 2013), objetiva (CHEN, 2015; SAMADI; NAZARI-SHIRKOUHI; KERAMATI, 2014) e integrada (FERREIRA *et al.*, 2019).

Em problemas de *fuzzy multiple criteria decision making* (FMCDM) ou tomada de decisão difusa com múltiplos critérios as classificações e os pesos são geralmente expressos em termos linguísticos e depois traduzidos em números *fuzzy* (VAHDANI; ZANDIEH, 2010).

É importante destacar que a lógica clássica foi desenvolvida por Aristóteles e através desses conceitos os primeiros elementos relacionados a lógica *fuzzy* foram desenvolvidos por Jan Lukasiewicz que adotou 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, um tipo de método ao qual palavras são utilizadas para traduzir números para computação e raciocínio (ZADEH, 1996).

De tal modo, o TOPSIS (Técnica para a Preferência de Ordem por Similaridade à Solução Ideal) incorporou elementos da CW e é um método que situa as alternativas em relação aos pontos de referência, ou seja, se baseou na avaliação da solução ideal (positiva) e não ideal (solução negativa ou Nadir). Isto é, a solução ideal consiste em todos os melhores valores atingíveis de critério, enquanto a solução ideal negativa é composta de todos os piores valores atingíveis de critério (ALMEIDA, 2013; VAHDANI; ZANDIEH, 2010).

De tal modo, em meio aos vários métodos MCDM/A desenvolvidos para resolver problemas de decisão do mundo real, a Técnica para a Preferência de Ordem por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) continua a funcionar satisfatoriamente em diferentes áreas de aplicação (BEHZADIAN *et al.*, 2012), especialmente em decisões relacionadas a avaliação de riscos (MAHMOUDI *et al.*, 2019).

O TOPSIS tradicional foi apresentado por Hwang e Yoon (1981), expandido por Chen (2000) para resolver problemas em ambientes nebulosos e aplicados (BALI; GUMUS; KAYA, 2015; CHEN; PHAM, 2000; ERKAYMAN; GUNDOGAR; YILMAZ, 2012; SABOKBAR *et al.*, 2006; SAMADI; NAZARI-SHIRKOUHI; KERAMATI, 2014) ou expandido para TOPSIS-Sort-B/C (DE LIMA SILVA; ALMEIDA FILHO, 2020) ou PDTOPSIS-Sort (DE LIMA SILVA; FERREIRA; ALMEIDA-FILHO, 2020) ou utilizado em revisões da literatura (AIRES; FERREIRA, 2019).

Da mesma forma, o *Fuzzy* TOPSIS tem se expandido ou aplicado em diversos ambientes, como para seleção de projetos (PERÇIN; KAHRAMAN, 2010), classificação de fatores de resiliência organizacional (TADIĆ *et al.*, 2014), solução de problemas de controle de fluxo (RUDNIK; KACPRZAK, 2017) e/ou avaliação de efeitos da qualidade do produto, valor do produto, redução de lead time e custos (AIKHUELE; OLUWADARE, 2019).

É importante ressaltar que, em geral, embora sejam métodos TOPSIS novos, apenas o FTOPSIS-Class considera variáveis linguísticas para classificação. Além disso, trabalhos envolvendo a Técnica *Fuzzy* para a Preferência de Ordem por Similaridade à Solução Ideal (FTOPSIS) integrado a WCM ou Programa WCM não foram encontrados.

2.6 FTOPSIS-Class

O método FTOPSIS-Class foi desenvolvido inicialmente com o intuito de fornecer uma estrutura híbrida, para otimização de portfólio em bancos privados, que integrasse características pessoais de investidores e propriedades adicionais impostas por regulamentos para as quais avaliações linguísticas são usadas em relação à exposição a riscos. A abordagem que propuseram considerou exterioridades legais e preferências do investidor como uma entrada do modelo, para classificar os problemas propostos (FERREIRA. *et al.*, 2018).

De acordo com Ferreira *et al.* (2018), o FTOPSIS-Class derivou do TOPSIS tradicional e foi adaptado para a problemática de classificação utilizando variáveis linguísticas. Isto é, o método se adequa a diversos contextos de aplicações. Assim, 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 (solução positiva) do perfil p ($A_i^* = [\tilde{v}_{pi}^*]_m$) e à solução não ideal (solução negativa) do perfil p ($A_i^- = [\tilde{v}_{qi}^-]_m$).

Aliás, tais 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} necessitam ser definidas por um conhecedor da área (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. Os passos subsequentes do FTOPSIS-Class conforme apresentado 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 1 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:

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

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

Passo 4.1: Deve ser definido a solução ideal positiva em relação ao perfil p como $\tilde{A}_p^* = \{\tilde{v}_{p1}^*, \tilde{v}_{p2}^*, \tilde{v}_{p3}^*, \dots, \tilde{v}_{pn}^*\}$, onde $\tilde{v}_{pj}^* = \tilde{q}_{pj}$, uma vez 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 4.2: 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 4.3: Avalie 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 4.4: Necessita ser avaliado o coeficiente de proximidade de cada alternativa i em relação ao perfil p , conforme pode ser observado 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 5: Para cada alternativa i é possível encontrar a classe $\tilde{p}_i^* = \text{argmax}_{p \in P} \{CC_i^p\}$. Logo, \tilde{p}_i^* é a classe com maior valor de i .

2.6.1 Fuzzy Trapezoidal

É importante destacar que a lógica *fuzzy* desempenhada no FTOPSIS-Class é o *Fuzzy Trapezoidal* e tem sido aplicada comumente em problemas de classificação (CHEN; PHAM, 2000; CHEN; WANG, 2006).

O *Fuzzy Trapezoidal* origina do fato de existir pontos cujo grau de aderência é no máximo 1 ($\alpha = 1$), 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; GUPTA, M., 1986).

Um \tilde{A} é dito trapezoidal também pela sua função de pertinência, que tem a forma de um trapézio e é esboçado por quatro parâmetros $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)_{LR}$, onde L é esquerda e R direita, ou seja (FERREIRA *et al.*, 2018; GOETSCHER JR.; VOXMAN, 1986; İÇEN; CATTANEO, 2017; LEE, 2005):

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ L\left(\frac{x-a_1}{a_2-a_1}\right), & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ R\left(\frac{a_4-x}{a_4-a_3}\right), & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases} \quad (6)$$

$L(x): [a_1, a_2] \rightarrow [0,1]$ é uma função crescente e $R(x): [a_3, a_4] \rightarrow [0,1]$ é decrescente.

2.6.2 Termos Linguísticos

Para ponderar o grau de importância de cada critério e para categorizar as alternativas de acordo com o perfil do modelo, pode ser utilizado um conjunto de termos linguísticos conforme o Quadro 1:

Quadro 1 - Termos linguísticos

Escala verbal de avaliação	Peso dos Critérios (W)
<i>Muito baixo (VL)</i>	<i>Sem importância (U)</i>
<i>Baixo (L)</i>	<i>Moderadamente importante (MI)</i>
<i>Médio (M)</i>	<i>Médio (M)</i>
<i>Alto (H)</i>	<i>Muito importante (VI)</i>
<i>Muito alto (VH)</i>	<i>Extremamente importante (EI)</i>

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2018).

Termos linguísticos são expressões de valores de variáveis linguísticas. Ou seja, uma variável linguística X qualquer no universo U é uma variável cujos valores assumidos por ela são subconjuntos *fuzzy* de U . De modo intuitivo, uma variável linguística assume valores que são representados por conjuntos *fuzzy* e sua finalidade é fornecer um modo sistemático de

aproximação de fenômenos complexos ou mal definidos (ZIMMERMANN, 1978). Conforme Quadro 1 acima, por exemplo, os valores de muito baixo (VL) poderiam ser 0, 0, 0,1 e 0,2.

2.7 FMECA

O FMECA derivou-se do FMEA (*Failure Mode And Effect Analysis*), que foi desenvolvido na década de 40 para solucionar problemas que poderiam surgir a partir de falhas em sistemas militares, objetivando identificar possíveis falhas, suas causas e efeitos. Diferentemente do FMEA, o FMECA indica que uma análise de criticidade também é realizada. A parte de criticidade da análise prioriza as falhas para ações corretivas com base na severidade (gravidade), detectabilidade e ocorrência do modo de falha (STAMATIS, 2003).

O desenvolvimento do FMECA foi atribuído, em 1960, a indústria aeroespacial devido a necessidade de confiabilidade e segurança (BOWLES; PELÁEZ, 1995), e em 1980, ao uso militar por meio de padrões, como o MIL - STD - 1629A (WASHINGTON, 1980).

Desde então, o FMECA vem sendo utilizado em uma série de contextos, seja para priorizar falhas (BRAGLIA; FROSOLINI; MONTANARI, 2003; GUGALIYA; BORAL; NAIKAN, 2019), resolver o problema de avaliação ou gestão de riscos (CHANG, 2015; KARA SLIMANE; ALLAL, 2020), análises de confiabilidade conectado a métodos de decisão (CARPITELLA *et al.*, 2018) ou combinado com análise de árvore de falhas (MZOUGUI; ELFELSOUFI, 2019) e/ou para identificar equipamentos críticos (MAHMOUDI *et al.*, 2019).

Dentro de um sistema ou processo de fabricação existem vários componentes que são 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 ou severidade (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 ($S \times O \times D$) obtido podem variar de 1 a 1000.

Desta forma, o FMECA cria ligações entre gravidade, frequência de ocorrência e nível de detectabilidade ou medição de controle. Ou seja, busca-se gerar um RPN para cada modo de falha, para que recursos possam ser fornecidos com base na priorização dos resultados (BOWLES; PELÁEZ, 1995; CHANG; LIU; WEI, 2001).

Xu *et al.* (2002) compreenderam que diante da dificuldade de utilizar valores numéricos para medir a ocorrência, severidade e detectabilidade do modo de falha, existem argumentos suficientes sobre a vantagem de utilizar outras abordagens para apoiar a avaliação dos modos de falha com variáveis linguísticas, tal como é proposto neste trabalho.

2.8 CONSIDERAÇÕES

A base conceitual deste trabalho permitiu observar que por muitos anos a manufatura foi gerenciada de modo *bottom-up* e a partir da abordagem *top-down* proposta por Skinner (1969), a manufatura começou ser vista como uma contribuição direta aos objetivos estratégicos corporativos e de negócios. Desde então, a estratégia de manufatura passou a ser configurada como uma estratégia a nível funcional que visa atender requisitos da estratégia corporativa e de negócios, contribuindo para que a empresa alcance vantagens competitivas por meio das forças manufatura. Deste modo, a estratégia de manufatura foi formada por diversos aspectos de decisão, demonstrando que a manufatura busca atender a diversos objetivos de desempenho para obter vantagens competitivas.

Em relação a WCM, foi possível observar que ao longo dos anos empresas foram entendendo que a excelência da fabricação de um país poderia ser utilizada da mesma forma em outros países por meio de técnicas e procedimentos eficazes. Ou seja, as melhores práticas poderiam ser replicadas. De tal forma, uma série de princípios foram sendo incorporados e combinados as concepções do WCM, tais como TQM, TIE, TPM, LM, SS, SM, TPS e outros. Da mesma forma, após a concepção do Programa WCM em 2005 pela Fiat, professor Yamashina e empresas parceiras, as técnicas e princípios do Programa WCM foram se expandindo por diferentes setores, isto é, o Programa WCM ofereceu a oportunidade para que diferentes seguimentos, não somente o setor automotivo, pudessem o utilizar.

Nesse sentido, após a criação do Programa WCM, as concepções dos dez pilares técnicos do Programa WCM se difundiu. O pilar de custo é o segundo do Programa WCM, uma vez que o mapeamento de perdas e desperdício convertidos em custos tem sido um dos principais desafios de manufaturas de classe mundial. Além disso, as quebras e problemas de

manutenção tem configurado como alguns dos custos mais elevados em WCM. Por isso, o conhecimento de ferramentas que possam minimizar custos por meio de inspeções no tempo ideal, é cada vez mais válido. De tal modo, o *delay time modelling* tem sido uma ferramenta consolidada na literatura para essa finalidade. Por outro lado, no Programa WCM o pilar de segurança é o primeiro a ser considerado, isto porque a segurança do trabalho é vista não somente como algo prioritário, mas sobretudo como valor para qualquer manufatura que almeje se destacar a nível global. Por isso, constantemente, uma série de políticas e ações visando mitigar riscos à segurança do trabalho são observadas em WCM.

Foi possível observar também que problemas envolvendo decisão multicritério consistem em situações em que tenha pelo menos duas ações a serem resolvidas com intuito de atender a pelo menos dois objetivos, sejam estes conflitantes entre si ou não. Assim, a escolha de um método depende do tipo de problemática e do contexto da organização, bem como esta escolha está diretamente ligada aos atores do processo decisório. Assim sendo, conclui-se que os métodos MCDM/A podem ser aplicados em diversas situações, com a finalidade de oferecer suporte e direcionamento a um ou mais tomadores de decisão.

Em relação ao FTOPSIS-Class, método multicritério utilizado neste trabalho, foi possível concluir que o método foi derivado do TOPSIS tradicional e adaptado para problemas relacionados a classificação. O método utiliza variáveis linguísticas por meio da lógica *fuzzy* trapezoidal, que tem sido aplicada rotineiramente em problemas de classificação porque através da lógica *fuzzy* é possível quantificar a imprecisão da escala verbal e representar a incerteza. Assim, os termos linguísticos utilizados no método visam avaliar o grau de importância de cada critério e servem para categorizar as alternativas de acordo com cada perfil do modelo do FTOPSIS-Class.

Por fim, o FMECA, diferentemente do FMEA, indica que uma análise de criticidade também é realizada. O seu uso foi atribuído a indústria aeroespacial e ao uso militar devido uma demanda de segurança e confiabilidade. A parte de criticidade da análise prioriza as falhas para ações corretivas com base na gravidade, ocorrência e detectabilidade do modo de falha. Sendo assim, a análise de criticidade pode ser realizada por meio do RPN, que tradicionalmente utiliza termos linguísticos para classificar a gravidade (S), a probabilidade de ocorrência (O) do modo de falha e a probabilidade de falha ser detectada (D).

3 REVISÃO DA LITERATURA

Com intuito de demonstrar e discutir os avanços nos últimos vinte anos em relação as metodologias e referências direcionadas a World-Class Manufacturing e Programa WCM, foi desenvolvido uma revisão da literatura (RL).

3.1 QUESTÕES DE PESQUISA E ETAPAS DO PRISMA

Com a RL busca-se responder algumas questões de pesquisa, tais como: #Quais avanços da WCM e Programa WCM nos últimos vinte anos? #Quais são os principais aspectos abordados em relação a WCM? #Quais pilares técnicos do Programa WCM já foram abordados na literatura? #Quais métodos MCDM/A foram utilizados?

É importante ressaltar que revisões da literatura têm se consolidado como uma ferramenta de atualizações importante e são regularmente utilizadas como ponto inicial direcionados sobre as principais pesquisas ou práticas realizadas (MOHER *et al.*, 2010). De certa forma, uma RL pode garantir ou demonstrar que em determinadas áreas existem lacunas e oportunidades/necessidades de pesquisas suplementares (ALMEIDA-FILHO; SILVA; FERREIRA, 2020; ALMEIDA; ALENCAR, *et al.*, 2016).

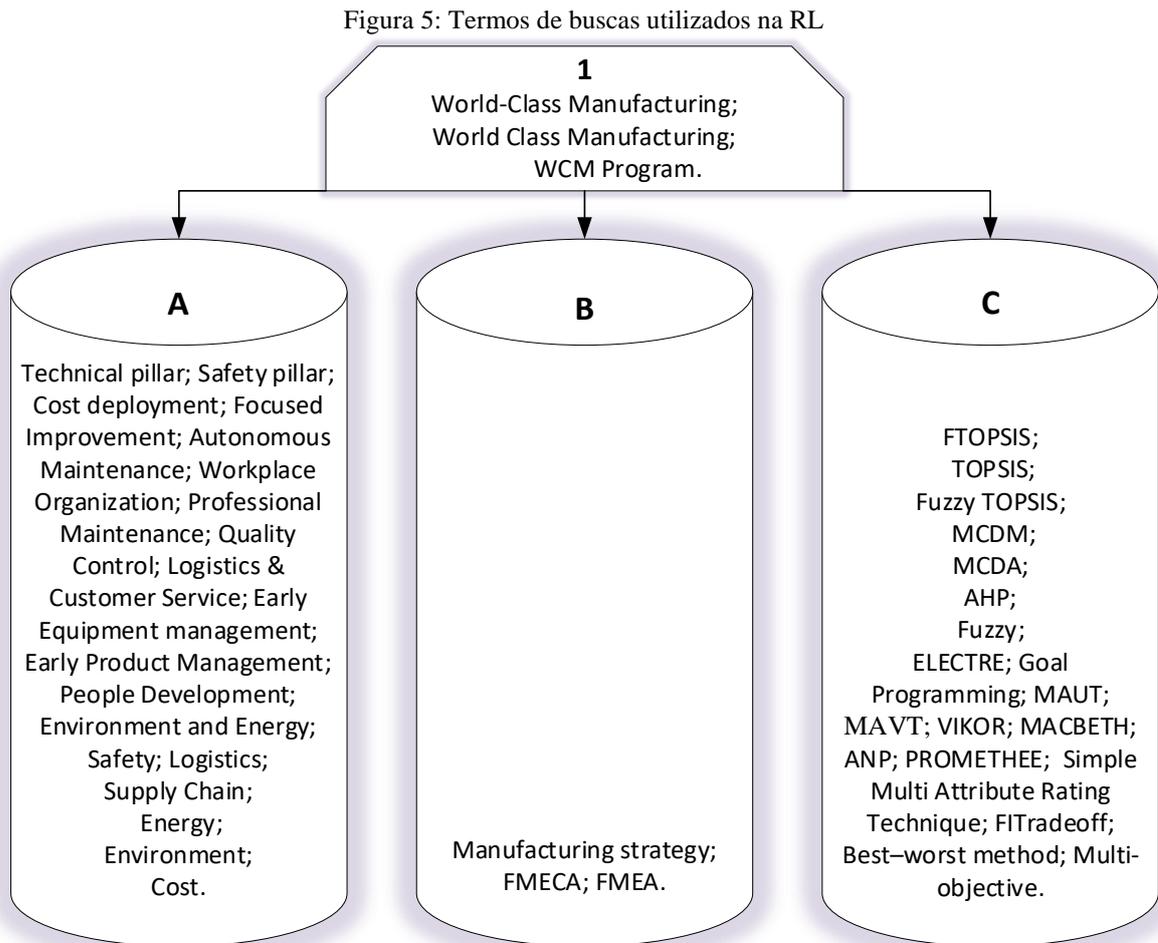
Assim, essa RL foi desenvolvida por fases. Primeiro, foi realizada a fase de avaliação quantitativa onde os artigos foram filtrados e agrupados para análise e construção de indicadores. Depois análise qualitativa. Posteriormente, o software VOSviewer foi utilizado para ilustrar alguns resultados. Por último, os resultados obtidos foram discutidos.

Neste sentido, as etapas da RL consistem em identificação, seleção, elegibilidade e inclusão. Essas quatro etapas foram baseadas na metodologia de *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA) – principais itens de relatório para revisões sistemáticas e meta-análise (ARAÚJO; PEREIRA CARNEIRO; PALHA, 2020; FREITAS NETTO *et al.*, 2020; MOHER *et al.*, 2010), com a finalidade de classificar artigos que se enquadram no contexto deste estudo.

A etapa de identificação consiste na fase de coleta de dados. Para desempenhar essa etapa foi realizada buscas com quatro grupos distintos de termos de busca através do operador booleano ‘and’, de modo que o conjunto 1 (World-Class Manufacturing, World Class Manufacturing e WCM Program) foi combinado com o grupo A (Pilares técnicos do Programa WCM), grupo B (termos distintos relacionados a abordagem da tese) e grupo C (termos de buscas relacionados a métodos e termos comuns da decisão multicritério),

formando o grupo 1A, 1B e 1C. Os dados foram extraídos da base do Web of Science e Scopus. Os artigos analisados compreenderam o período de 1999 a 2019, bem como artigos publicados até setembro de 2020 e acessos antecipados do ano de 2020, incluindo acessos antecipados.

Os grupos de termos de buscas estão apresentados na Figura 5:

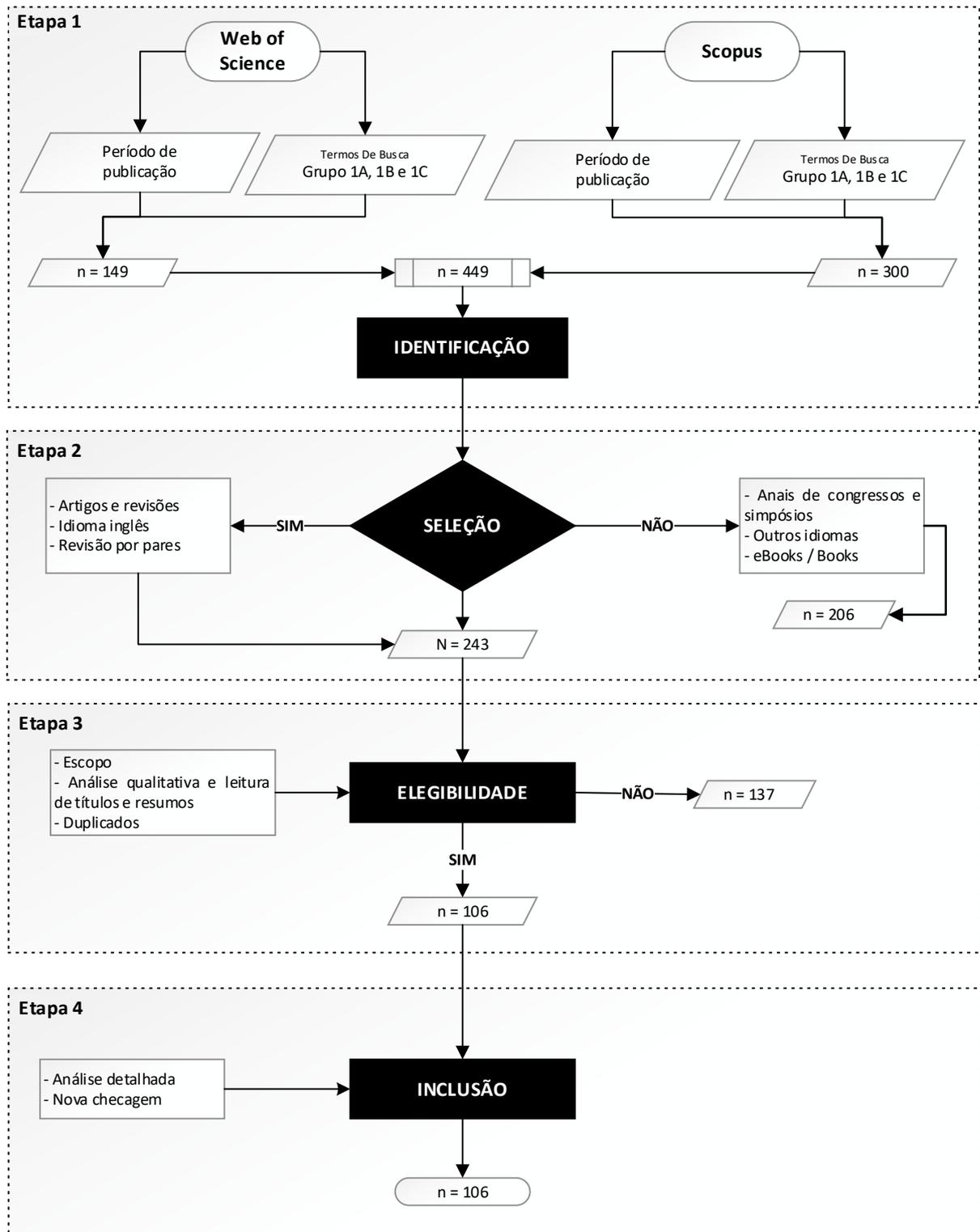


Fonte: Esta pesquisa (2020).

Todas os três termos de busca do elemento 1 foram combinados com os 19 termos de busca do grupo A, 3 do grupo B e 19 do grupo C, totalizando 123 combinações (1A, 1B e 1C) de palavras-chave. Nesta etapa inicial, um total de 149 artigos foram encontrados no Web of Science e 300 no Scopus, totalizando 449 artigos agrupados.

Esta primeira etapa, juntamente com as outras da RL pode ser observada através da Figura 6.

Figura 6: Etapas da RL



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Após a etapa de identificação, foi realizada uma triagem e os artigos foram selecionados considerando três processos de filtragem. Inicialmente, no primeiro filtro foram considerados apenas artigos e revisões (“review”), excluindo, por exemplo, artigos

publicados em anais de congressos ou simpósios. O segundo filtro considerou somente artigos escritos no idioma inglês devido a relevância do idioma na literatura global. No terceiro filtro foram considerados somente artigos revisados arbitrariamente (revisão por partes). Nesta etapa, 243 artigos passaram pelos três filtros realizados.

Na terceira etapa, de elegibilidade, os artigos foram selecionados com base no contexto dos conceitos associados a WCM ou Programa WCM, isto é, uma análise e seleção qualitativa foi realizada a partir da leitura de títulos e resumos. Artigos duplicados, que eram comuns as duas bases de dados, foram excluídos. Da mesma forma, também foram excluídos artigos sem conexão com o tema ou repetidos, presentes em mais de uma combinação. Nesta etapa, 106 artigos foram elegíveis.

Na quarta etapa, de inclusão, são apresentados a quantidade de artigos incluídos em síntese quantitativa. Nesta etapa, 106 artigos foram incluídos, sendo 78 do grupo 1A, 18 do 1B e 10 do 1C.

3.2 DISCUSSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA

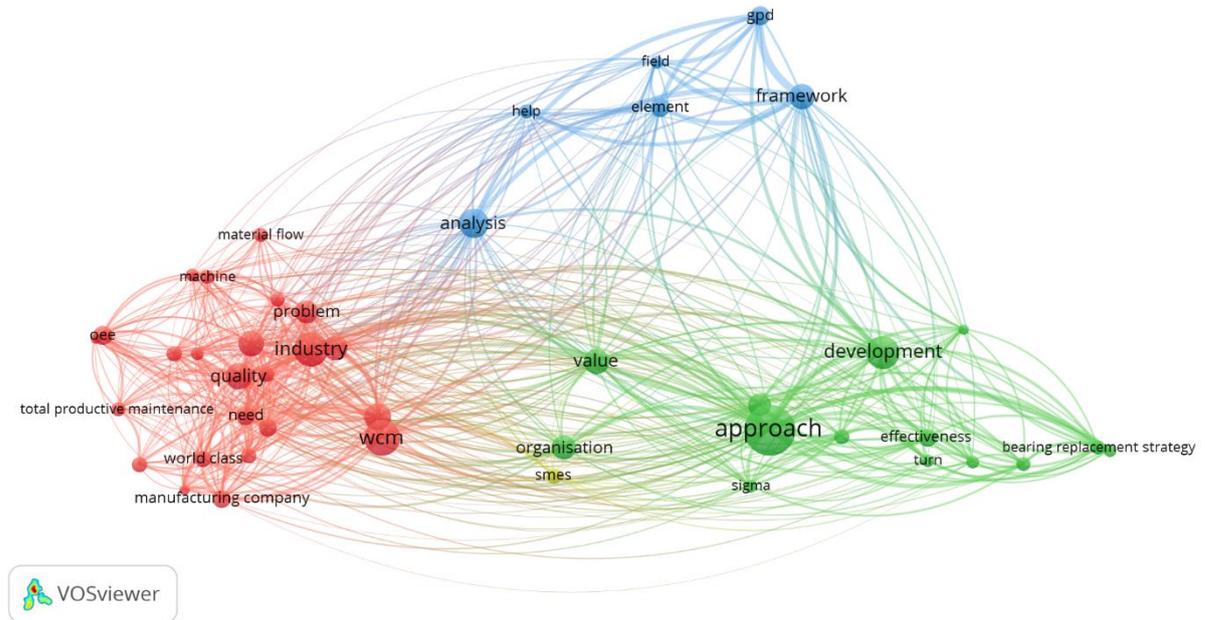
A quarta etapa do PRISMA foi baseada nos artigos incluídos. Os 106 artigos foram distribuídos em três grupos, conforme expresso na Figura 5. Estes artigos foram analisados através do software VOSviewer, uma ferramenta para constituição e visualização de redes bibliométricas (CWTS, 2020), para a concepção de representações nas quais palavras mais utilizadas ou os estudos mais relevantes foram representados por círculos e seus links por linhas.

Assim, algumas representações (mapas) foram construídas com intuito de identificar e visualizar os principais focos dos 106 trabalhos e ligações entre tais. Com base em dados do texto dos artigos, pode-se visualizar as principais redes entre os estudos e principais tópicos abordados. Além disso, na análise foi considerado somente termos com incidência mínima de 10, ou seja, o termo preciso ter aparecido em pelo menos dez artigos para que fosse considerado. As palavras “*article*” e “*study*” não foram consideradas na análise por ser considerado palavras comuns, presentes na maioria dos artigos. Assim, através do padrão do VOSviewer, 60% dos termos mais relevantes foram considerados. Na Figura 7 é apresentado a visualização de rede dos 106 trabalhos.

É importante ressaltar que o tamanho do círculo de um item determina a constância do item, ou seja, quanto maior a ocorrência/relevância maior será o rótulo e o círculo do item. A cor de um item é verificada pelo cluster (grupo) ao qual tal pertence. Além disso, a distância entre dois artigos na visualização, por exemplo, indica aproximadamente o parentesco dos

artigos em termos de links de cocitação. Isto é, quanto mais próximos dois artigos estão localizados um do outro, mais próximo sugere-se sua relação (CWTS, 2020).

Figura 7: Visualização de rede

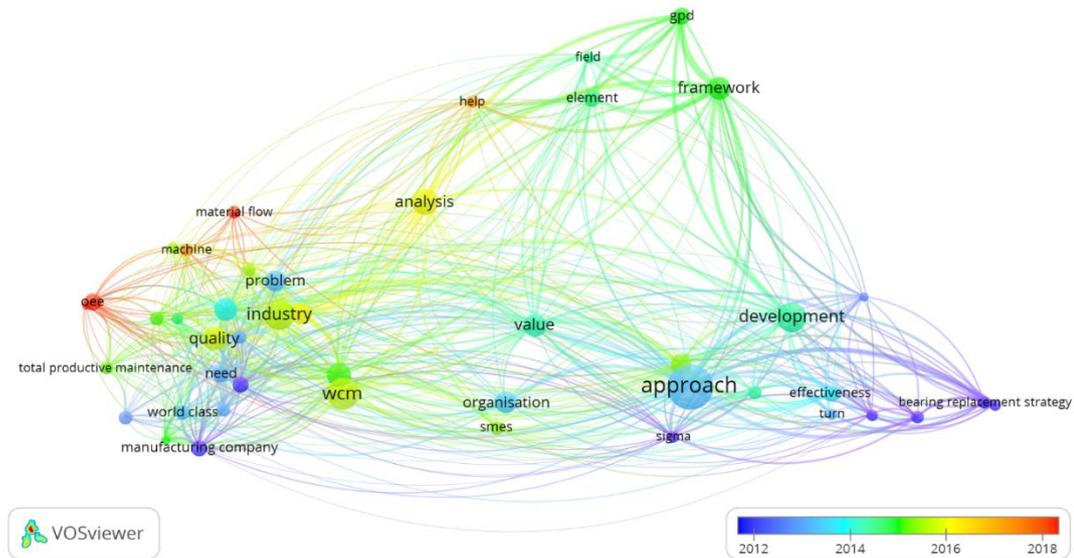


Fonte: Esta pesquisa (2020).

Desta forma, pode-se observar que existem pelo menos três grandes clusters. O primeiro deles (em vermelho) tiveram como principais assuntos abordados o WCM, indústria, qualidade, manufatura, OEE, entre outros. No segundo cluster, de cor predominante verde, as principais palavras utilizadas foram abordagem, desenvolvimento, eficácia e sigma, por exemplo. No terceiro cluster, em azul, as duas principais abordagens foram estruturas propostas ou consolidadas, bem como análises.

Da mesma forma, a sobreposição pode ser visualizada de acordo com a Figura 8, mas agora podendo ser visualizado a temporalidade de uso de cada termo, de acordo com a data dos documentos de onde foram extraídos.

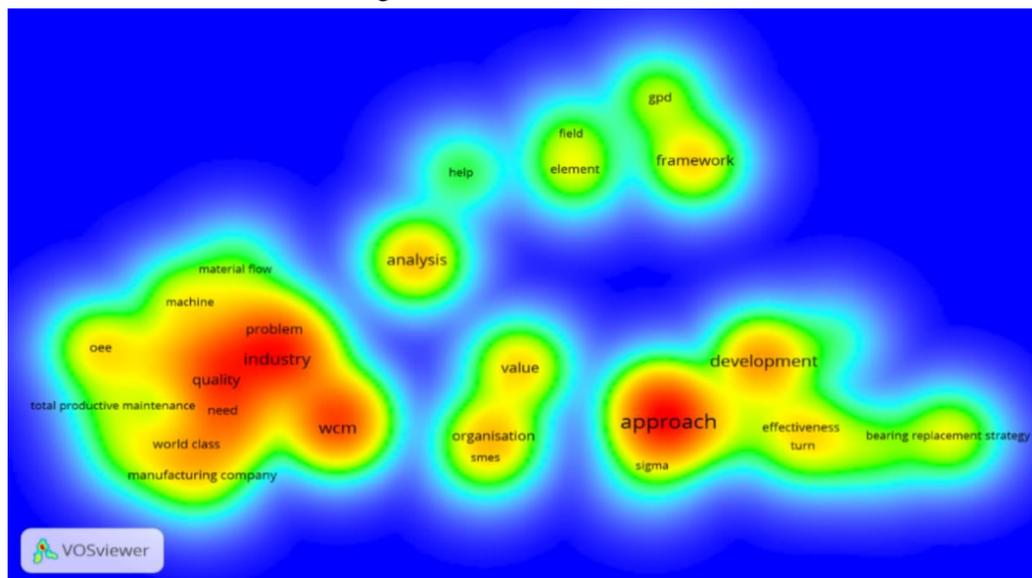
Figura 8: Termos mais abordados por ano



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Assim, os termos mais recentes consistem em OEE, fluxo de material e máquina. Para complementar essas informações, uma visualização de densidade é apresentada na Figura 9, isto é, dos termos que mais aparecem. Os termos com maior incidência estão centralizados e com a cor mais quente, primeiro vermelho, depois laranja e amarelo. Os termos com menor incidência estão representados com cores frias, tais como verde e azul.

Figura 9: Incidência dos termos



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Assim, por meio da Figura 9, pode ser visualizado que os termos como custo, segurança, Programa WCM ou qualquer outro pilar técnico não são as principais abordagens dos trabalhos analisados, de 1999 a 2020. Ou seja, foi possível observar que a literatura ainda abrange de modo mais direto aspectos tradicionais das WCM e/ou métodos e ferramentas básicas. Isto é, trabalhos relacionados a WCM com foco específico ou integrando o WCM com outra ferramenta ou método de decisão, por exemplo, começaram a surgir a menos de uma década.

De tal modo, para evidenciar a evolução do WCM e Programa WCM, MCDM/A integrado a WCM e pilares técnicos, a partir das análises realizadas, são apresentados alguns trabalhos desenvolvidos.

3.2.1 WCM e Programa WCM

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos encontrados do grupo 1A, isto é, são apresentados os trabalhos relacionados ao conceito WCM e as práticas adotadas por empresas para atingir níveis de classe mundial. Já na subseção 3.2.1.1 são apresentados trabalhos ligados diretamente com pilares técnicos do Programa WCM. Do total de 106 artigos elegíveis, 78 artigos pertencem ao grupo 1A, conforme apresentado na Figura 5. Porém, destes 78 artigos, cerca de 12% dos artigos tratam de pilares técnicos do Programa WCM de modo específico, conforme será apresentado na subseção 3.2.1.1.

De tal modo, para uma manufatura alcançar o status de classe mundial é necessário garantir a excelência adquirida por meio da melhoria de processos, estratégias ligadas a fabricação, entre outros fatores. Por isso, alguns autores têm abordado em diferentes contextos o termo WCM e o Programa WCM de modo genérico, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Abordagens gerais do termo WCM e Programa WCM

Abordagem	Autores	Termo utilizado
Tempo de entrega de fornecedores como fator competitivo	Jayaram, Vickery e Droge (1999)	WCM
Tecnologia como fator competitivo	Pretorius e Wet (2000)	WCM
Benchmarking como fator de sucesso e obtenção de vantagens competitivas	Kumar (2001) e Talebi <i>et al.</i> (2014)	WCM
Modelo para fazer sob encomenda para determinar pontes fortes e áreas passíveis de melhoria.	Muda e Hendry (2002)	WCM
Estratégias direcionadas identificação de	Yamashina e Kubo (2002)	WCM

perdas de produção para reduzir custos.		
Necessidade de desenvolver, praticar e implementar práticas de manutenção	Sharma, Kumar e Kumar (2006)	WCM
Acompanhamento e integração de ferramentas e técnicas de WCM	Salaheldin e Eid (2007); Okhovat <i>et al.</i> (2012); Haleem <i>et al.</i> (2012); Mohamed e Youssef (2018)	WCM
Razões de fracasso de manufaturas que visaram se tornar WCM	Hicks e Matthews (2010)	WCM
Manufatura sustentável	Dubey <i>et al.</i> (2015)	WCM
Mensuração de ações baseadas em medidas de desempenho	Digalwar, Jindal, e Sangwan (2015)	WCM
Desenvolvimento de um modelo de certificação de empresas	Oliveira <i>et al.</i> (2016)	WCM
Revisão da literatura (2000 a 2016) envolvendo a gestão do conhecimento e WCM	Mendes e Mattos (2017)	WCM
Melhoria da qualidade e redução de custos no setor automotivo	Campus <i>et al.</i> (2017)	Programa WCM
Perspectivas sobre a engenharia de manufatura	Mróz (2018)	Programa WCM
Aplicabilidade do Programa WCM em pequenas e médias empresa no setor automotivo	Petrillo, Felice e Zomparelli (2019)	Programa WCM
Avaliação de maturidade de manufaturas	Vivares, Sarache e Hurtado (2018)	Programa WCM
Ferramentas e técnicas que estão relacionadas com pilares técnicos	Satolo <i>et al.</i> (2018)	Programa WCM

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Desta forma, pode se observar que de 1999 a 2017 o termo WCM foi predominante e abordado genericamente na literatura em diferentes contextos. Também de modo genérico, sem focar em algum pilar técnico ou gerencial, o termo Programa WCM foi abordado a partir de 2017 no contexto de algumas manufaturas, do setor automotivo e de pequenas e médias empresas com intuito de demonstrar melhorias, ferramentas ou técnicas relacionadas.

3.2.1.1 Pilares técnicos do Programa WCM

A quantidade de trabalhos relacionados com o Programa WCM com foco em algum pilar técnico ou aspecto específico ainda é limitada. 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 e técnicos.

Em relação ao pilar de custo especialmente, denominado como pilar técnico de *cost deployment* no Programa WCM, apenas um artigo, considerando os filtros realizados na RL, direcionado ao custo e seus desdobramentos foi encontrado na literatura até o momento. Este trabalho encontrado trata-se do trabalho pioneiro de Yamashina e Kubo (2002), antes mesmo do surgimento do Programa WCM, onde os autores apresentaram um método categorizado de redução de custos, intitulado como “*cost deployment*”, o que depois parece ter sido redesenhado e evoluído para o pilar técnico de CD do Programa WCM, conforme apresentado na seção 3.2.1.

Se for levado em consideração anais de congresso (“*conference proceedings*”), apenas mais um trabalho direcionado ao pilar técnica de CD foi encontrado, foi o trabalho de Giovando, Crovini e Venturini (2017), apresentado uma década e meia depois do trabalho de Yamashina e Kubo (2002). Giovando, Crovini e Venturini (2017), apresentaram uma revisão da literatura sobre tópicos de WCM e custos gerenciais e, depois se concentraram em apresentar um estudo de um sistema de CD em uma empresa de manufatura da Itália, com base na metodologia do Programa WCM desenvolvida pela *Fiat Chrysler Automobiles*.

Os trabalhos com foco específico em pilares técnicos do Programa WCM podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3: Abordagens referentes aos pilares técnicos do Programa WCM

Abordagem	Autores	Foco
Novo modelo de segurança seguindo princípios do Programa WCM, Lean Manufacturing e da TPM	Vukadinovic <i>et al.</i> (2019)	Pilar de segurança
Redução de água em linhas de produção	Kiljan (2015)	Pilar de Early Equipment and Product Management (EPPM)
Mantenabilidade básica dos equipamentos e redução de falhas para melhorar a eficiência da produção.	Gajdzik (2014)	Pilar de Autonomous Maintenance (AM) e Professional Maintenance (PM)
Modelo para cálculo do custo de compras de dispositivos de minério de ferro	Dudek (2014)	Pilar de Logistics & Customer Service (LCS)
Melhorias de padrão de trabalho	(FELICE, F.; PETRILLO, A., 2015) Felice e Petrillo (2015)	Pilar de Logistics & Customer Service (LCS)

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Recentemente, todos os pilares técnicos do Programa WCM foram apresentados de modo sucinto e genérico por D’Orazio, Messina e Schiraldi (2020), em um estudo visando analisar as principais sinergias entre o mundo tecnológico da Indústria 4.0 e o domínio puramente organizacional e gerencial da WCM, a qual foi destacada pelos autores como um modelo de excelência operacional. Assim, os autores relacionaram as dimensões que movem as WCM às macros categorias tecnológicas da Indústria 4.0, ou seja, desta forma poderia ser possível identificar em qual solução tecnológica uma WCM deve se alavancar.

3.2.2 Estratégia de manufatura e WCM

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos do grupo 1B encontrados. Destaca-se que não foram encontrados trabalhos conectando a WCM com FMECA ou FMEA diretamente. Dos 18 trabalhos encontrados no grupo 1B, todos os artigos apresentam como palavra-chave principal a estratégia de manufatura ligada a WCM. Alguns deles são apresentados no Quadro 4.

Destes, alguns trabalhos são destacados no Quadro 4.

Quadro 4: Abordagens envolvendo a estratégia de manufatura conectada a WCM

Abordagem	Autores	Termo utilizado
O papel da manufatura, da WCM e da estratégia de manufatura dentro das organizações	Gilgeous e Gilgeous (1999); Gilgeous e Gilgeous (2001)	WCM
A importância da tecnologia e sistemas de informações eficientes em estratégias de manufatura	Flynn e Flynn (1999)	WCM
A função da manufatura e prioridades competitivas	Dangayach e Deshmukh (2000); Toni e Tonchia (2002)	WCM
Estratégia de manufatura e a capacidade de pequenas e médias empresas manter-se confiáveis, competitivas e em melhoria contínua	Lagacé e Bourgault (2003); Khan e Wickramasinghe (2007)	WCM
Como a implementação da termografia infravermelha poderia contribuir para estratégias de manutenção e de manufatura	Todorovic <i>et al.</i> (2013)	WCM

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Desta forma, foi possível constatar que os trabalhos visaram demonstrar as diferentes formas de estratégias de manufaturas em WCM ou para obter status de WCM.

3.2.3 MCDM/A e WCM

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos de destaque do grupo 1C, ao qual 10 artigos foram considerados elegíveis. É importante destacar que não foram encontrados métodos utilizando TOPSIS ou FTOPSIS-Class em WCM. A maior parte dos trabalhos elegíveis utilizaram em suas aplicações de MCDM/A o método AHP somente ou AHP conectado a lógica *fuzzy* e discretamente outros métodos, como o PROMETHEE e interpretação da modelagem estrutural (ISM). Nesse sentido, no Quadro 5 são apresentados alguns destes trabalhos.

Os métodos MCDM/A consistem em ferramentas matemáticas e computacionais para auxiliar decisões em diversas áreas (ALMEIDA, *et al.*, 2015) e, as aplicações destes métodos

podem ser consideradas incipientes no que diz respeito ao vínculo entre MCDM/A e WCM ou Programa WCM.

Quadro 5: Junção do MCDM/A e WCM

Abordagem	Autores	Relação
Modelo para avaliar um sistema produtivo em termos de capacidade e qualidade	Lekurwale, Akarte e Raut (2015); Sharma, Grover e Sharma (2020)	Analytic Hierarchy Process (AHP) e WCM
Relação entre medidas de desempenho	Digalwar, Jindal e Sangwan (2015); Digalwar e Date (2016)	ISM e WCM; PROMETHEE e WCM
Categorização de ferramentas da metodologia Lean seguindo princípios de WCM	Baskaran e Lakshmanan (2019); Petrillo, Felice e Zomparelli (2019)	AHP, Lógica Fuzzy e WCM
Dimensões necessárias para alcançar status de WCM sustentável	Pourvaziry <i>et al.</i> (2020)	Fuzzy Dematel e WCM

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Dessa forma, observa-se que nenhum trabalho utilizou o TOPSIS ou FTOPSIS-Class relacionado a WCM ou ao Programa WCM. A maior parte dos trabalhos utilizou o método AHP relacionado a WCM. Além disso, nenhum dos trabalhos envolvendo métodos MCDM/A focou no Programa WCM ou pilar técnico específico.

3.3 RESULTADOS DA REVISÃO DA LITERATURA

Com a revisão da literatura realizada, em resposta as questões da RL, foi possível constatar que nos últimos vinte anos, a maior parte dos trabalhos abordaram o termo WCM de modo genérico. De 1999 a 2006, uma série de trabalhos buscaram apresentar soluções ou práticas para que empresas possam alcançar o status de WCM. Além disso, nesse período, muitos trabalhos também buscaram relacionar as estratégias de manufatura e consequentemente objetivos de desempenho com WCM.

A partir de 2007, os trabalhos começaram a mencionar de modo mais detalhado algumas ferramentas que pudessem ajudar empresas a melhorar seus processos. A partir disso, o termo WCM começou a ser vinculado ao Programa WCM, contudo ainda de modo genérico até 2013.

Após o ano de 2014, trabalhos direcionados aos pilares do Programa WCM começaram a surgir. No entanto, até onde se pode constatar com base nesta RL, ainda não foram publicados artigos ou revisões em periódicos, com o idioma inglês e revisão realizada por pares voltados a todos os pilares técnicos do WCM de modo específico. Por exemplo, considerando os filtros realizados na etapa 2 do PRISMA (seção 3), é possível destacar que não foram encontrados trabalhos que tratam especificamente do pilar de custo após a implementação do Programa WCM, bem como do pilar de segurança. O único trabalho que considerou o pilar de segurança, também o considerou juntamente com Lean Manufacturing e o TPM, ou seja, não houve um foco somente.

Além de custo e segurança, outros pilares do Programa WCM também não foram tratados na literatura de modo específico, como por exemplo os pilares de *Focused Improvement* (FI), *Workplace Organization* (WO), *People Development* (PD) e *Energy* (E), demonstrando que ainda existem lacunas a serem exploradas. Os pilares remanescentes, embora tenham sido tratados, a ocorrência ainda é incipiente.

Em analogia ao termo FMECA conexo ao Programa WCM e/ou algum pilar técnico, não foram encontrados artigos publicados. Em relação ao MCDM/A conectado ao WCM ou Programa WCM, os primeiros trabalhos começaram a surgir nos últimos 5 anos. Além disso, a maior parte dos trabalhos utilizou o método AHP. Nenhum trabalho conectando WCM e Programa WCM com MCDM/A utilizou o método TOPSIS, *Fuzzy TOPSIS* e/ou o FTOPSIS-Class, como propõe este trabalho, para o estabelecimento de prioridades por meio da classificação. A partir desse direcionamento emerge uma lacuna na literatura para desenvolver abordagens relacionando o Programa WCM no âmbito do pilar de custo e de segurança com MCDM/A.

3.4 CONSIDERAÇÕES

Por meio da revisão da literatura foi possível constatar que os termos WCM e Programa WCM foram até 2014 abordados de modo genérico, sendo relacionados com princípios e ferramentas de excelência operacional para obtenção de vantagem competitiva ou para alcance de status de classe mundial.

Embora tenha sido lançado em 2005, somente a partir de 2014 começaram a surgir os primeiros trabalhos focados nos pilares técnicos do Programa WCM. No entanto, nenhum trabalho tratou de modo específico o pilar de custo e de segurança, foco deste trabalho.

A junção do Programa WCM com MCDM/A começou a surgir na literatura a partir de 2015, contudo, nenhum trabalho uniu o Programa WCM com FTOPSIS-Class, método utilizado neste trabalho. A maior parte dos trabalhos unindo o Programa WCM com MCDM/A utilizou o método AHP individualmente ou conectados a outros métodos. Trabalhos considerando o Programa WCM conectado ao MCDM/A e estratégias e/ou FMECA também não foram encontrados na literatura.

Desta forma, este trabalho inova e pode contribuir com a literatura e no contexto de organizações que utilizam o Programa WCM ao integrar o Programa WCM com MCDM/A por meio do método FTOPSIS-Class, especialmente ao levar em consideração os impactos das estratégias de manufatura no âmbito do pilar de custo e o nível de risco no âmbito do pilar de segurança.

4 FRAMEWORK PROPOSTO PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE CUSTO DO PROGRAMA WCM

Este capítulo tem como finalidade apresentar a proposta de um framework para priorização no pilar de custo do Programa WCM, integrando aspectos de estratégia de manufatura aos indicadores de desempenho deste pilar através de um modelo de apoio à decisão multicritério. Para demonstrar a viabilidade do framework proposto, foi realizada uma aplicação numérica por meio de dados reais do pilar de custo coletados em uma planta industrial localizada no Nordeste do Brasil, pertencente a uma multinacional britânica-neerlandesa de bens de consumo.

Desta forma, na seção 4.1 foi apresentada a proposta para priorização do pilar de custo. Na seção 4.2, o caso foi apresentado com a aplicação do framework proposto nesse capítulo. Na seção 4.3 foram apresentadas as principais implicações práticas e gerenciais em relação a aplicação e aos resultados obtidos. Na seção 4.4 foi apresentada uma análise de sensibilidade do método FTOPSIS-Class com a finalidade de testar a robustez dele. Além disso, foram apresentadas na seção 4.5 as propostas de projetos de melhoria visando redução de desperdícios considerando os objetivos de desempenho e com base nos resultados obtidos na aplicação numérica. Por fim, na seção 4.5 foram apresentadas as principais considerações deste capítulo.

4.1 PROPOSTA PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE CUSTO DO PROGRAMA WCM

O framework proposto visa contribuir com a literatura e com os processos de tomada de decisão dentro das manufaturas de classe mundial que tenham o Programa WCM implementado ou que venha implementar por meio do fornecimento de uma estrutura sistematizada para o processo de decisão baseada nos princípios do apoio à decisão multicritério, integrado ao pilar técnico de custo (*cost deployment*) do Programa de WCM.

O pilar de custo é estratégico dentro de qualquer organização, pois tem o potencial para contabilizar e converter perdas e desperdícios em valores financeiros. Desta forma, este pilar visa estabelecer um programa de redução de custos, assim, uma das contribuições deste framework proposto é a integração com a análise da estratégia de manufatura para vislumbrar oportunidades de redução de custo mais alinhadas com a estratégia de manufatura vigente

para que a função produção possa atuar como impulsionadora desta estratégia (SLACK, 2015; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007).

No Programa WCM, o pilar de custo se fundamenta de acordo com sete etapas, conforme foram apresentadas na seção 2.3.1. Assim, de modo sucinto, tais etapas consistem em uma fase de coleta de dados, depois os desperdícios e perdas da planta são rastreados. Desta forma, é estabelecido uma relação entre as perdas causais e resultantes, estabelecendo um plano de melhoria para as perdas prioritárias (maiores custos), de modo que os benefícios reais possam ser avaliados depois. Por fim, é realizado um monitoramento do andamento das melhorias planejadas e ações/metapas para o ano ou ciclo (6 meses, por exemplo) seguinte.

Diferentemente da abordagem tradicional do Programa WCM, este estudo visa categorizar as perdas identificadas no pilar de custo usando FTOPSIS-Class para realizar a integração com os aspectos de estratégia de manufatura, bem como os impactos, que não são fáceis de mensurar numa escala monetária de valor. Ou seja, após o procedimento estabelecido pelo Programa WCM de estratificação de perdas e desperdícios, faz parte da proposta deste capítulo a classificação dos projetos com potencial de melhorias considerando além do custo, outros objetivos de desempenho, como qualidade, confiabilidade/credibilidade, rapidez/velocidade e flexibilidade. Portanto, o framework proposto pode ser compreendido por meio de etapas, como ilustra a Figura 10.

A estratégia de manufatura pode ser explicitada através de um ou mais procedimentos específicos. Embora existam diversos na literatura (FINE; HAX, 1985; HAYES; WHEELWRIGHT, 1984; HILL, 1993; MINTZBERG; WATERS, 1990; PLATTS; GREGORY, 1990; SWAMIDASS; NEWELL, 1987), dois desses procedimentos são tem sido utilizados de modo mais frequente (SLACK; LEWIS, 2017). O primeiro deles é o modelo proposto por Hill (1993) e o segundo o modelo de Platts e Gregory (1990).

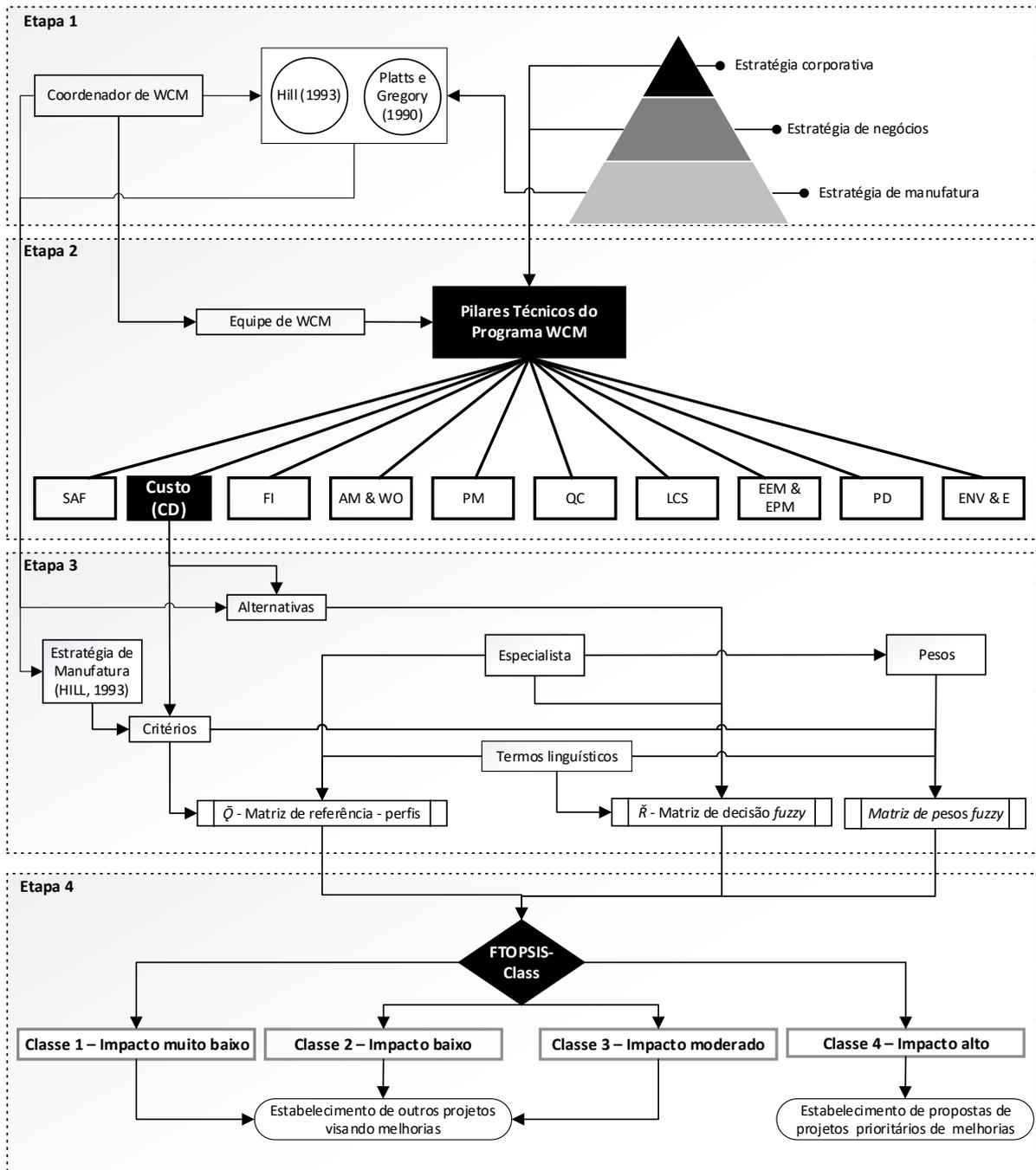
O primeiro modelo (HILL, 1993) considera o desdobramento da estratégia corporativa, enquanto o segundo (PLATTS; GREGORY, 1990) considera uma abordagem de auditoria de manufatura em termos dos gaps da função produção segundo um viés de oportunidades e ameaças. A escolha do procedimento para explicitar a estratégia de manufatura depende de vários fatores, inclusive da cultura da empresa.

Neste trabalho foi adotado o procedimento do Hill (1993), uma vez que a estratégia de manufatura da planta industrial onde o framework proposto foi aplicado considera o desdobramento da estratégia corporativa. Porém, é importante ressaltar que em outras aplicações envolvendo outras empresas, dependendo dos fatores emaranhados, o

procedimento para explicitar a estratégia de manufatura poderá ser o de Platts e Gregory (1990).

A fim de demonstrar a integração entre o Programa WCM, MCDM/A e estratégias de manufatura, na Figura 10 é apresentado o framework proposto para o pilar de custo.

Figura 10: Framework proposto para o pilar de custo



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Ressalta-se que, a primeira e a segunda etapas foram construídas com base integral em premissas da literatura. A partir da terceira a etapa, é apresentada uma das inovações e contribuições deste trabalho, a integração do Programa WCM com MCDM/A e estratégias de manufatura.

Por conseguinte, na primeira etapa, são observadas e analisadas as estratégias e diretrizes corporativas, de negócios e de manufatura. Após a estratégia de manufatura ser estabelecida, é apresentada uma hierarquia comum em plantas onde os princípios do Programa WCM são praticados. Ou seja, o coordenador de WCM responde ao gerente de fábrica ou geral, bem como segue as diretrizes da estratégia de manufatura, e o time WCM é complementado com os líderes dos pilares técnicos, que geralmente são divididos por área. Por exemplo, o líder do pilar de custo pode ser um engenheiro de processos ou supervisor de produção. Depois de definir a equipe do WCM, na segunda etapa, é mostrado que o pilar de CD é um dos focos deste trabalho (EDE, 2015; GIOVANDO; CROVINI; VENTURINI, 2017; YAMASHINA; KUBO, 2002).

Na terceira etapa, as alternativas derivaram dos dados coletados do pilar de custo, posteriormente serviram de entrada na matriz de decisão *fuzzy*. Os critérios foram definidos de acordo com os princípios de Hill (1993) e conforme os princípios do pilar de custo. Os critérios serviram de entrada para a matriz de referência dos perfis, matriz de decisão *fuzzy* e matriz de pesos *fuzzy*. O especialista além de analisar os critérios, definiu os pesos dos critérios e sua avaliação também serviu de entrada para as matrizes (matriz de referência dos perfis, matriz de decisão *fuzzy* e matriz de pesos *fuzzy*). Os termos linguísticos, conforme será apresentado na Tabela 2, foram inseridos na matriz de referência dos perfis, matriz de decisão *fuzzy* e matriz de pesos *fuzzy* com linguagem que traduz as avaliações realizadas.

Na quarta etapa, os perfis e pesos dos critérios foram definidos, bem como a matriz de decisão formada, serviram como fonte de informações para alimentar o modelo de decisão. Assim, o FTOPSIS-Class irar gerar a classificação das alternativas, considerando também o impacto na estratégia de manufatura. Em outros termos, alternativas (projetos) alocadas na Classe 4 representam impacto alto na estratégia de manufatura e deverão ser tratadas prioritariamente. Planos/projetos visando melhorias deverão ser desenvolvidos prioritariamente. Posteriormente, projetos visando melhorias deverão ser desenvolvidos com foco na Classe 3, depois na Classe 2 e Classe 1.

É importante ressaltar que as classes 1, 2, 3 e 4 do pilar de custos foram definidas de acordo com quatro perfis baseados no impacto de cada projeto na estratégia de manufatura da

empresa. Assim, o impacto de cada estratégia está atrelado a um tipo de perfil, que pode ser: impacto muito baixo (P1), impacto baixo (P2), impacto moderado (P3) e impacto alto (P4). A proposta deste framework assume como premissa que os níveis de performance da manufatura já atendem os níveis qualificadores de pedido. No entanto, para uma situação em que algum dos objetivos possui desempenho abaixo do nível qualificador de pedido, uma análise a parte precisa ser feita de modo a garantir a priorização de projetos de melhoria que permitam recuperar a performance neste patamar de desempenho qualificador.

O método de decisão multicritério que foi utilizado para apoiar esse framework, FTOPSIS-Class, considera avaliações linguísticas no processo de classificação. Para aplicação do modelo FTOPSIS-Class, no pilar de custo, um conjunto de termos linguísticos foi definido de acordo com as premissas da Seção 2.6.2 e é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Termos linguísticos para aplicação numérica

Classificações	Números <i>Fuzzy</i>				Peso dos Critérios (W)	Números <i>Fuzzy</i>			
<i>Muito baixo (VL)</i>	0	0	0,1	0,2	<i>Sem importância (U)</i>	0	0	0,1	0,2
<i>Baixo (L)</i>	0,1	0,2	0,3	0,4	<i>Moderadamente importante (MI)</i>	0,1	0,2	0,3	0,4
<i>Médio (M)</i>	0,3	0,4	0,5	0,6	<i>Médio (M)</i>	0,3	0,4	0,5	0,6
<i>Alto (H)</i>	0,5	0,6	0,7	0,8	<i>Muito importante (VI)</i>	0,5	0,6	0,7	0,8
<i>Muito alto (VH)</i>	0,7	0,8	0,9	1	<i>Extremamente importante (EI)</i>	0,7	0,8	0,9	1

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Desta forma, estes termos linguísticos serão utilizados tanto na abordagem e aplicação numérica do pilar de custo quanto na do pilar de segurança.

4.2 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Com intuito de demonstrar como o framework proposto pode ser aplicado para priorização no pilar de custo em indústrias que tenham o Programa WCM implementado, uma aplicação numérica baseada no pilar de custo é realizada para fundamentar este trabalho.

Os dados utilizados na aplicação numérica são reais e referem-se a uma instalação industrial de bens de consumo, incorporada a uma multinacional que adota o Programa WCM. A planta industrial onde os dados foram coletados está localizada no Nordeste do Brasil. Esta

planta fabrica três tipos de produtos, faturando no ano de 2019 mais de 16 milhões de euros em receita.

Desta forma, primeiro foram coletados dados objetivos e subjetivos, com suporte de especialistas em WCM. Os dados referentes ao pilar de custo correspondem a manuais técnicos e normas do Programa WCM, além de dados financeiros históricos da planta industrial. Com os documentos coletados, foi possível chegar a uma compreensão melhor do Programa WCM e de quais parâmetros fundamentam o pilar de custo. A coleta de dados objetivos foi realizada principalmente em matrizes financeiras padronizadas de acordo princípios do Programa WCM. Por meio dessas matrizes, mais de 2000 projetos e ações de melhoria puderam ser observados, consolidadas e sintetizadas.

Em seguida, para complementar os dados objetivos e documentos coletados, foram realizadas várias reuniões com o líder de WCM e especialistas para esclarecimento de dúvidas, bem como para coleta de informações complementares. No total, foram mais de 20 meses de coleta de dados e reuniões.

Com as principais informações de entrada do modelo FTOPSIS-Class estabelecidas/coletadas, tais como alternativas, critérios, perfis e termos linguísticos para avaliar o nível de importância de cada critério e as classificações das alternativas, restava apenas a matriz de decisão ou avaliação das alternativas. Os termos linguísticos foram definidos para esta aplicação conforme a Tabela 1.

O impacto das alternativas foi mensurado conforme a vinculação em um perfil de classe, conforme ilustrado na Figura 10, que pode ser impacto muito baixo (P1), impacto baixo (P2), moderado (P3) e impacto alto (P4). Após a classificação das alternativas uma análise mais detalhada pode ser realizada a fim de escolher e alocar recursos para as ações de melhoria, de modo a lidar com perdas ou desperdícios no contexto do pilar de custo.

Cada alternativa, conforme os dados coletados no caso estudado, pode ser entendida como um potencial projeto (ou conjunto de projetos) de melhoria com intuito de redução ou eliminação de perdas ou desperdícios. Assim, ao longo desta aplicação, essas alternativas podem ser descritas como Projeto 1 (A1), Projeto 2 (A2), ..., n. As alternativas foram expressas na Tabela 2 conforme o agrupamento (setor ou área da manufatura) adotado pela empresa em análise.

Tabela 2: Relação de alternativas do pilar de custo

Alternativas	A_m	Projeto
<i>Adjustment</i>	A1	Projeto 1
<i>Breakdowns</i>	A2	Projeto 2
<i>Changeover Time</i>	A3	Projeto 3
<i>Cleaning</i>	A4	Projeto 4
<i>Cleaning and Sanitation Time</i>	A5	Projeto 5
<i>Cutting Blade change</i>	A6	Projeto 6
<i>Equipment/Process trial and scheduled modification time</i>	A7	Projeto 7
<i>Idle Time</i>	A8	Projeto 8
<i>Lubrication, Inspection & Re-fastening</i>	A9	Projeto 9
<i>Maintenance time</i>	A10	Projeto 10
<i>Material availability at line-side Loss</i>	A11	Projeto 11
<i>Meal/Tea Break</i>	A12	Projeto 12
<i>Measurement and Adjustment</i>	A13	Projeto 13
<i>Minor stoppages</i>	A14	Projeto 14
<i>Not-Value Added Activity</i>	A15	Projeto 15
<i>Physical consumption of spare parts</i>	A16	Projeto 16
<i>Planned Stoppage time</i>	A17	Projeto 17
<i>Preparatory and Close Out time loss</i>	A18	Projeto 18
<i>Process Failure Time</i>	A19	Projeto 19
<i>Quality defect time loss</i>	A20	Projeto 20
<i>Rework Loss</i>	A21	Projeto 21
<i>Shortage of operators</i>	A22	Projeto 22
<i>Shortage of Utility (Force Majure)</i>	A23	Projeto 23
<i>Speed Loss</i>	A24	Projeto 24

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Neste framework proposto foram considerados todos os objetivos estratégicos de desempenho como critérios do modelo de decisão. Os critérios considerados são custo, credibilidade, qualidade, rapidez e flexibilidade. Os critérios do modelo proposto estão apresentados na Tabela 3, considerando os objetivos de desempenho definidos por Hill (1993) para a estratégia de manufatura, complementando e ampliando a visão do pilar de custos do Programa WCM de acordo com a visão proposta por Hill (1993) e consolidada na literatura (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007, 2009; SLACK; LEWIS, 2017).

Tabela 3: Relação de critérios do pilar de custo

Critérios	C_n
Custo	$C1$
Credibilidade	$C2$
Qualidade	$C3$
Rapidez	$C4$
Flexibilidade	$C5$

Fonte: Esta pesquisa (2020).

O objetivo custo está associado ao total (por ciclo analisado) de perdas e desperdícios convertidos em custos em relação a cada alternativa, conforme procedimento padrão do Programa WCM. Nesse framework proposto, o critério custo é avaliado considerando o impacto de redução de custo que cada projeto de melhoria pode gerar em termos de estratégias da manufatura. Assim, o custo será mensurado pelo percentual (%) de redução que cada projeto/alternativa pode gerar. No critério credibilidade, que diz respeito a competência da função produção em cumprir com os prazos pré-definidos, a avaliação será qualitativa por meio de escala verbal para avaliar o impacto da implantação de um projeto em termos de credibilidade. No critério qualidade, considerando o ponto de vista da estratégia de manufatura, as alternativas serão avaliadas considerando uma projeção para redução de não conformidades, uma vez que o objetivo qualidade remete ao termo “fazer certo” ou capacidade da produção em produzir conforme as especificações. Ou seja, quanto menor o número de não conformidades, melhor. O critério rapidez será medido por uma escala em termos do tempo decorrido, quanto menor o tempo decorrido de um *lead time* de produção, melhor. Por fim, o objetivo flexibilidade que pode ser analisado por diversos enfoques e que busca proporcionar maiores opções em termos de produto, volume e entrega/atendimento etc., será analisado no enfoque de flexibilidade da manufatura e o critério mensurado por meio de uma escala verbal. Assim, quanto maior a flexibilidade, melhor.

A matriz de decisão foi obtida através de um protocolo de avaliação com os especialistas, o líder de WCM em conjunto com coordenadores de WCM da planta, que avaliaram o impacto de cada alternativa naqueles critérios que incluem os objetivos estratégicos de desempenho para a manufatura. Os termos linguísticos utilizados na matriz de decisão apresentada na Tabela 4 estão de acordo com os valores apresentados para cada termo linguístico na Tabela 1.

Tabela 4: Matriz de decisão (Ř)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	L	M	VH	L	M
A2	VH	VH	H	VH	H
A3	L	M	H	M	H
A4	L	L	M	M	M
A5	L	M	M	M	M
A6	M	L	H	L	H
A7	L	M	M	M	H
A8	M	VL	L	VL	L
A9	M	L	L	L	L
A10	VH	H	M	H	H

A11	M	VH	M	H	M
A12	L	VL	VL	VL	VL
A13	M	H	L	H	H
A14	M	M	M	M	M
A15	L	L	M	VL	VL
A16	VH	VL	L	VL	VL
A17	VH	M	L	H	M
A18	M	H	M	H	H
A19	L	M	M	H	L
A20	H	VH	H	VH	H
A21	M	L	VH	M	VL
A22	VL	M	VL	M	M
A23	H	VH	M	VH	VH
A24	M	H	M	H	M

Fonte: Esta pesquisa (2020).

A definição dos pesos dos critérios e dos perfis das classes foram estabelecidos, segundo o especialista, de acordo com a estratégia de manufatura da planta industrial estudada. A Tabela 5 fornece os perfis obtidos para definição das classes de prioridade, conforme os termos linguísticos apresentados na Tabela 1.

Tabela 5: Matriz de referência (\tilde{Q}) para cada perfil

	C1	C2	C3	C4	C5
P1	L	VL	VL	VL	VL
P2	M	VL	M	VL	VL
P3	VH	H	VH	L	VH
P4	VH	VH	VH	L	H

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Após a definição de todos os parâmetros exigidos, foi utilizado o algoritmo de classificação FTOPSIS-Class para obter a adequação de cada projeto/alternativa ao perfil de cada impacto na estratégia de manufatura, calculado como o coeficiente de proximidade CC_i^p .

A Tabela 6 apresenta os pesos de todos os critérios e os respectivos valores dos termos linguísticos utilizados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 6: Pesos (W) para o pilar de custo

	C1	C2	C3	C4	C5
W	EI	VI	EI	MI	VI

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Todos os critérios foram ponderados pelo especialista em relação à sua importância. Os valores de CC_i^p são apresentados na Tabela 7 e foram calculados seguindo os passos 4 e 5

da seção 2.6. Quanto maior o valor do coeficiente de proximidade CC_i^p para um projeto de melhoria i sobre o perfil de impacto na estratégia de manufatura p , o mais adequado será o perfil P (P1, P2, P3 ou P4).

Tabela 7: Coeficiente de proximidade

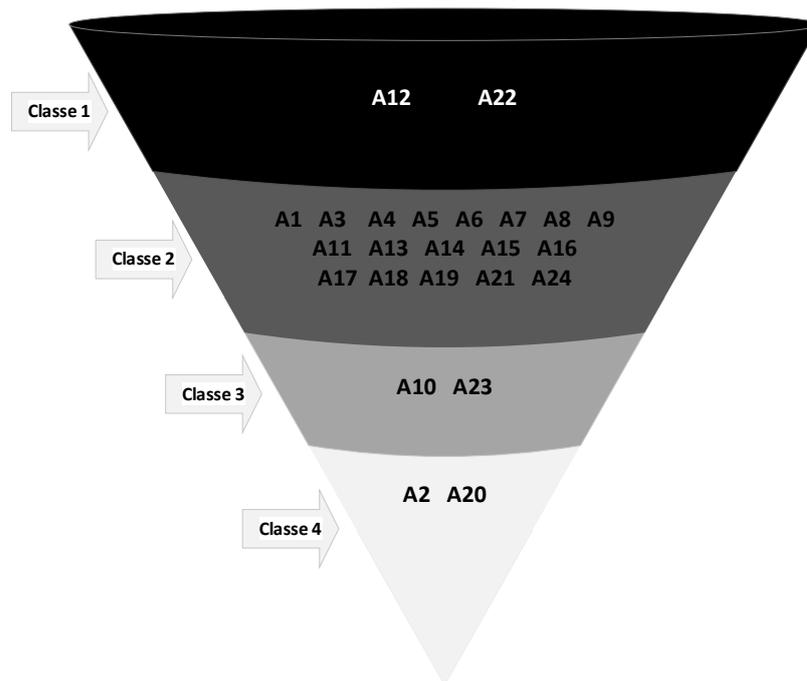
	P1	P2	P3	P4
A1	0,62989321	0,66645744	0,39446349	0,39446349
A2	0,36688917	0,44633812	0,67299170	0,67530984
A3	0,62924117	0,66550960	0,39554306	0,39537944
A4	0,76445820	0,78064405	0,25133901	0,25133485
A5	0,72339102	0,73870278	0,29514979	0,29514979
A6	0,63799970	0,74468383	0,38636687	0,38619956
A7	0,68231357	0,69674248	0,33896003	0,33881957
A8	0,84655531	0,85071651	0,16332959	0,16336022
A9	0,82776489	0,83200683	0,18386776	0,18386776
A10	0,47609790	0,55674081	0,55902544	0,55902544
A11	0,58133400	0,65340587	0,44539230	0,44713526
A12	0,95460210	0,81666974	0,04823986	0,04823986
A13	0,63501880	0,63829892	0,38966972	0,38966972
A14	0,68077595	0,76536549	0,34097749	0,34097749
A15	0,83393643	0,85071651	0,17662439	0,17659181
A16	0,77124016	0,80174006	0,24319139	0,24319139
A17	0,61224981	0,63809786	0,41397865	0,41397865
A18	0,58098009	0,65308592	0,44735398	0,44735398
A19	0,74829374	0,76415029	0,26859755	0,26860200
A20	0,41707885	0,50734790	0,61988967	0,62203943
A21	0,68673606	0,80156094	0,33416412	0,33409944
A22	0,79607121	0,68391533	0,21632006	0,21632006
A23	0,42960787	0,50172325	0,60655770	0,60655770
A24	0,62259974	0,69995107	0,40294513	0,40311510

Fonte: Esta pesquisa (2020).

O coeficiente destacado corresponde à classe a que cada projeto pertence, de acordo com o perfil de cada estratégia de manufatura. O impacto de cada estratégia está atrelado a um tipo de perfil. Assim, as alternativas pertencentes à coluna P1 (perfil 1) devem ser alocadas à Classe 1 – impacto muito baixo, P2 (perfil 2) à Classe 2 – impacto baixo, P3 (perfil 3) à Classe 3 – impacto moderado e P4 (perfil 4) à Classe 4 – impacto alto.

Assim, com intuito de tornar mais claro a visualização das alternativas nas respectivas classes determinadas pelo FTOPSIS-Class, na Figura 11 é apresentado uma ilustração:

Figura 11: Categorizações



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Portanto, as primeiras ações corretivas e/ou projetos de melhoria para redução de custos devem ser direcionados prioritariamente a A2 e A20 por pertencerem a classe 4, isto é, tem um impacto alto na estratégia de manufatura. Depois, os direcionamentos devem ser voltados as alternativas (A10 e A23) pertencentes a classe 3, posteriormente classe 2 e classe 1.

É importante destacar que as perdas e resíduos convertidos em custos devem ser reduzidos, dentro de uma planta em que o Programa WCM foi implementado, de 6 a 10% ao ano ou por ciclo, que pode ser de 6 meses ou 1 ano (CHIARINI; VAGNONI, 2015; SUKARMA; AZMI; ABDULLAH, 2014; YAMASHINA; KUBO, 2002). E ao incorporar outros objetivos/critérios de desempenho para classificar potenciais projetos de melhoria, pode contribuir de modo significativo para que a redução de desperdícios e perdas seja ainda melhor do que o esperado ou que pelo menos atenda ao esperado. Assim, por exemplo, desenvolver um projeto de melhoria para reduzir perdas de tempo por defeito de qualidade pode ser mais estratégico e urgente para a empresa do que focar em absenteísmo, somente porque o custo foi alto por um único período.

4.3 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS

Com todas as alternativas alocadas a uma classe de prioridade, observou-se que as alternativas (A2 e A20) alocadas a classe 4, classe com perfil de maior impacto na estratégia de manufatura, referem-se a problemas relacionados a manutenção e perdas de tempo no processo. Ou seja, A2 diz respeito aos custos relacionados a *breakdown* de máquinas ou equipamentos; e A20 está relacionada a perdas de tempo por defeito de qualidade.

De acordo com informações coletadas junto ao especialista, desde que a planta industrial implementou o Programa WCM e as perdas e/ou desperdícios começaram a ser estratificados e convertidos em custos para contabilização, problemas relacionados a manutenção, sobretudo corretiva, tem sido um dos custos mais elevados da fábrica por ciclo e ao mesmo tempo uma das ações mais desafiadoras em termos de projetos de melhoria/economia.

Com esta perspectiva, foi solicitado dados e informações relacionadas a equipamentos com estado crítico e que pudessem vir a ser um potencial projeto para melhorias dentro da planta industrial. Após a apresentação dos dados e informações complementares relacionadas aos equipamentos, foi sugerido o uso de uma metodologia específica para gestão da manutenção nos equipamentos considerados mais críticos ou que representassem um gargalo.

De tal modo, a elaboração de uma política de manutenção adequada foi a partir de então considerada como uma alternativa para reduzir os custos relacionados a manutenção e o *breakdown*. Tendo em vista o aspecto da qualidade, buscou-se uma política de manutenção que permitisse antecipar a detecção de defeitos ou não conformidades a fim de que a manutenção fosse realizada antes que o equipamento atingisse o estado de falha. Assim sendo, verificou-se a adequação do uso da abordagem do DTM a fim de encontrar o valor ótimo para o intervalo de tempo de inspeção no maquinário ao menor custo possível de manutenção, evitando a manutenção corretiva (não planejada).

Consequentemente, como o *delay time* versa uma forma de gerenciar a manutenção por meio da determinação do tempo ideal de inspeção para solucionar problemas de manutenção, pode-se compreender que ações corretivas sobre um defeito são menos custosas do que em relação a uma falha. Portanto, o modelo *delay time* pode ser utilizado com a finalidade redução de custos (SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020).

Em decorrência disso, considerando a alternativa A2, que corresponde aos *breakdowns*, que contabilizaram em um único ciclo um custo aproximadamente

R\$758.647,26, foi estabelecido um projeto visando melhorias por meio da aplicação de um modelo *delay time* para determinação de uma política ótima de manutenção. Conforme apontado pelo especialista, um único *breakdown* pode gerar perdas de mais de 20 toneladas por hora de produção, com custos estimados de R\$60.000,00 por hora devido a ocorrência deste *breakdown*.

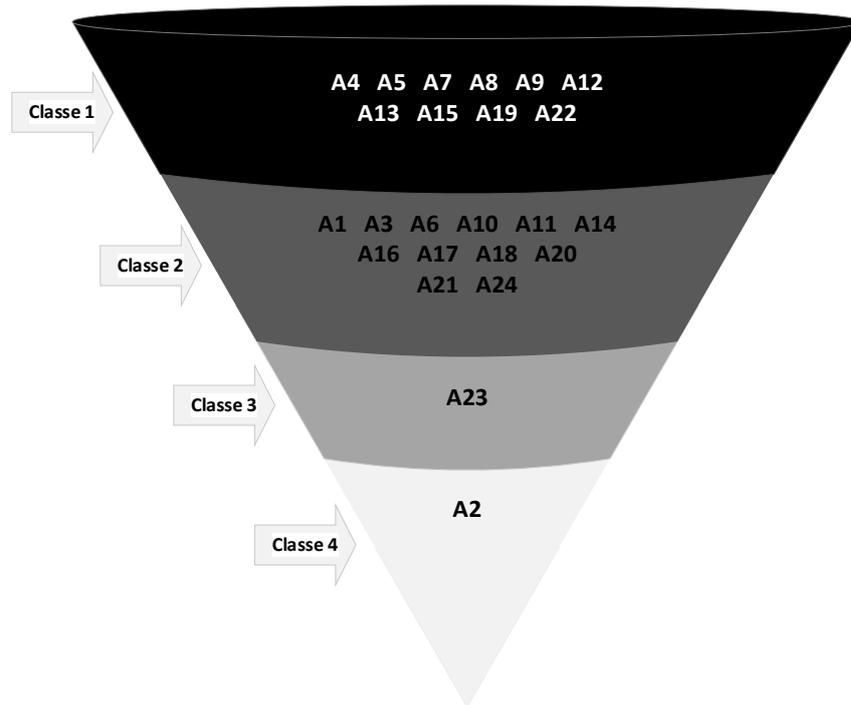
É importante destacar também que inspeções executadas fora do tempo certo ou número de inspeções elevados além de serem desnecessárias, também aumentam o custo da inspeção. Portanto, é fundamental ter o equilíbrio entre o custo da inspeção e o custo de uma possível falha do equipamento. Isto é, quando uma inspeção é executada no tempo ideal, defeitos tem um potencial maior de serem identificados antes da ocorrência de falhas de máquinas e equipamentos, evitando assim potenciais *breakdown* e perdas oriundas da qualidade por não conformidade.

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade tem como objetivo avaliar a robustez do modelo de classificação aplicado com os dados coletados. Desta forma, alguns parâmetros do FTOPSIS-Class são modificados para examinar sua sensibilidade. Em modelos de classificação, como é este caso, a análise de sensibilidade visa avaliar se a alocação das alternativas nas classes foram alteradas (ALMEIDA, *et al.*, 2015; LIMA SILVA; FERREIRA; ALMEIDA-FILHO, 2020).

Assim, juntamente com o especialista algumas modificações foram realizadas com intuito de testar a sensibilidade do modelo. A primeira delas foi relacionado aos pesos dos critérios. Os pesos foram modificados para $w_m = \{VI, VI, VI, VI, VI, VI, VI, VI\}$ e matriz de decisão foi mantida igual, sendo possível chegar à classificação exibida na Figura 12.

Figura 12: Classificações após análise de sensibilidade 1 – pilar de custo



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Logo, verificou-se que ocorreram alterações na classificação final. Por exemplo, na classe 4, que continham as alternativas A2 e A20, agora somente A2 pertence e deverá ser priorizada primeiro. Depois, com base na classe 3, A23 deverá ser priorizado. Consequentemente, depois as alternativas contidas na classe 2 e classe 1.

Na segunda análise realizada, o objetivo foi testar a robustez por meio da alteração do peso do perfil 4 para todos os critérios (C1 a C5), sendo tais alterados para VH ou mantidos em VH. A nova matriz de referência para cada perfil é apresentada na Tabela 8.

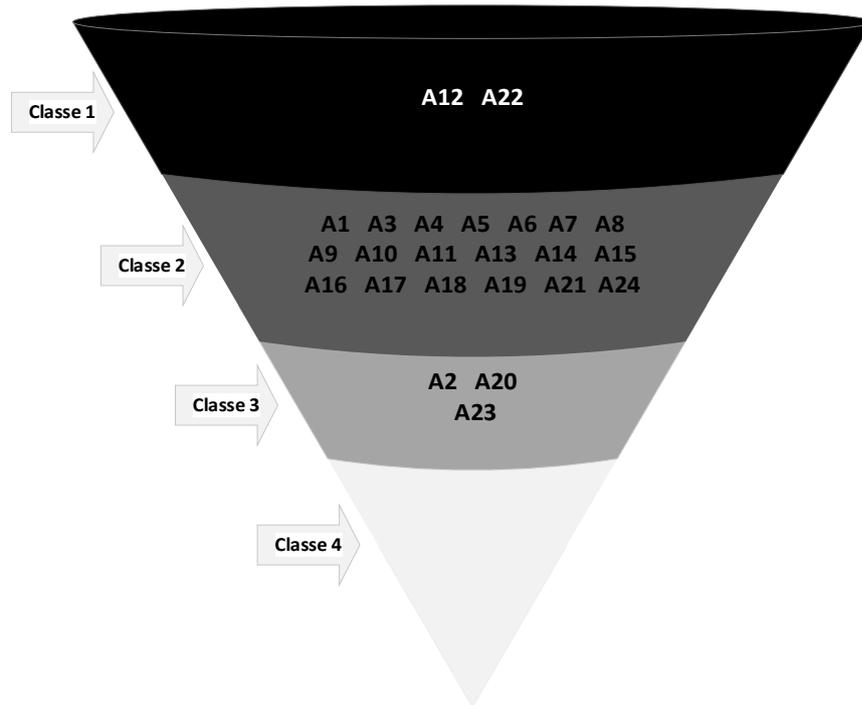
Tabela 8: Matriz de referência (\tilde{Q}) para cada perfil – análise de sensibilidade 2

	C1	C2	C3	C4	C5
P1	L	VL	VL	VL	VL
P2	M	VL	M	VL	VL
P3	VH	H	VH	L	VH
P4	VH	VH	VH	VH	H

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Observa-se que houve alteração na classe 4, onde nenhuma alternativa foi alocada, conforme é demonstrado na Figura 13.

Figura 13: Classificações após análise de sensibilidade 2 – pilar de custo



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Desta forma, foi possível testar a sensibilidade do modelo realizando alterações seja nos pesos critérios ou na matriz de referência através da modificação em um dos perfis.

4.5 PROPOSTA DE PROJETO DE MELHORIA

Com intuito de desenvolver um projeto de melhoria voltado a redução de *breakdowns* e conseqüentemente tempo de inatividade devido a necessidade de manutenção corretiva, uma vez que o *breakdown* (A2), conforme seção 4.2, foi classificado como item que exerce alto impacto na estratégia de manufatura, propõe-se utilizar o modelo *delay time*, conforme proposto por Souza e de Almeida-Filho (2020), para determinar o tempo ótimo de inspeção com base no custo.

Por meio de inspeções realizadas na periodicidade adequada ao equipamento com base no *delay time*, ações preventivas poderão ser tomadas antes da ocorrência de uma falha nos equipamentos, evitando que correções emergenciais de manutenção corretiva tenham que ocorrer. Compreende-se que, com base no DTM (SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020), que ações realizadas preventivamente sejam menos custosas do que ações corretivas.

Desta forma, o modelo DTM pode ser aplicado visando encontrar o menor custo esperado de inspeção $[C(T)]$ por unidade de tempo, considerando os parâmetros utilizados em Souza e de Almeida Filho (2020), conforme a Tabela 9:

Tabela 9: Parâmetros do modelo *delay time*

T	Unidade de tempo (horas ou dias)
$b(t)$	Probabilidade de um defeito ser conduzido a uma falha dentro de período (T)
C_i	Custo de inspeção por inspetor que realiza a inspeção
C_f	Custo médio para correção de uma falha
C_p	Custo de manutenção preventiva
d	<i>Downtime</i> de um equipamento
h	Intervalo entre o defeito e a ocorrência de uma falha
λ	Taxa de falha
K_f	Taxa de chegada de defeitos
$Cost_{ip}$	Custo por hora da equipe de manutenção que conduz a inspeção
$Cost_d$	Custo por hora do <i>downtime</i> do equipamento ou máquina
T_{insp}	Tempo de inspeção
$C_v(failure)$	Custo variável médio de uma falha
$C_v(defect)$	Custo variável médio de um defeito
F	Custo fixo
C_i	Custo por inconveniência
$C(T)$	Custo esperado por inspeção

Fonte: Adaptado de Souza e Almeida-Filho (2020).

Portanto, para determinar o custo esperado por inspeção é necessário conhecer ou estimar a taxa de defeitos, que advém a uma taxa “ λ ” contínua (1/tempo médio entre falhas – MTBF) ao longo de um período verificado. Por implicação disto, o DTM é exercido por uma função que se difunde exponencialmente e a classificação probabilística de um *downtime* é dada por $f(h)$, conforme Equação 7:

$$f(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad (7)$$

Desta forma, a probabilidade de que um defeito seja conduzido a uma falha dentro deste período – $b(T)$ é apresentado como (SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020):

$$b(T) = \int_0^T \left(\frac{T-h}{T} \right) f(h) dh \quad (8)$$

$$b(T) = \int_0^T \left(\frac{T-h}{T} \right) \lambda e^{-\lambda h} dh \quad (9)$$

Para compor o $C(T)$ são necessários variáveis de custo, apresentadas abaixo:

$$C_I = (Custo_{ip} + Custo_d) \cdot T_{insp} \quad (10)$$

$$C_f = C_v(falha) + F + C_i \quad (11)$$

$$C_p = C_v(Defeito) + F \quad (12)$$

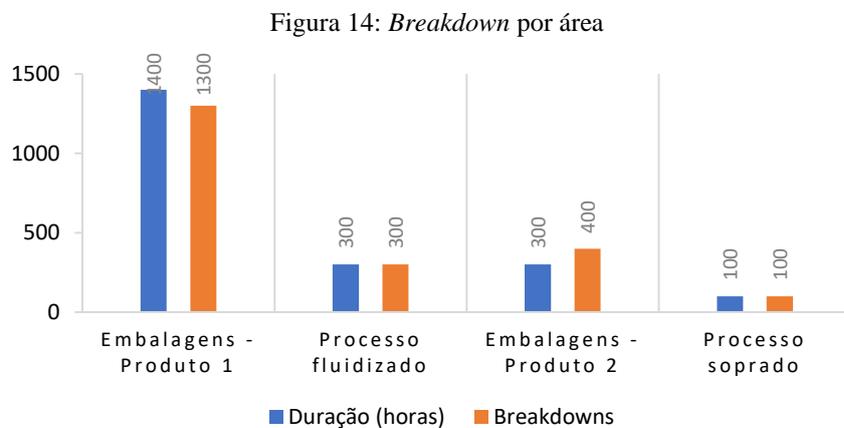
Portanto, o custo esperado por inspeção (CHRISTER; WALLER, 1984a, 1984b; JONES; JENKINSON; WANG, 2009; SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2020) ponderando uma taxa λ de caráter homogêneo é dado como:

$$C(T) = \frac{KfT\{C_f b(T) + C_p[1 - b(T)]\} + C_I}{T + d} \quad (13)$$

$$C(T) = \frac{\left[KfT \left\{ C_f \left(1 + \frac{e^{-\lambda T}}{\lambda T} - \frac{1}{\lambda T} \right) + C_p \left(\frac{1}{\lambda T} - \frac{e^{-\lambda T}}{\lambda T} \right) \right\} + C_I \right]}{T + d} \quad (14)$$

Estes parâmetros servirão com base de dados de entrada do modelo para que uma política de inspeção possa ser desenvolvida, se necessário, a fim de minimizar custos de manutenção através da determinação de um intervalo ideal de inspeção.

Para tal, uma nova etapa de coleta de dados reais foi realizada. Os dados coletados correspondem aos maiores *breakdowns* da planta industrial estudada, conforme apresentados na seção 4.3. Através dos dados coletados, na Figura 14 é apresentado o número aproximado de ocorrências de *breakdowns* em quatro das principais áreas industriais da fábrica para dar uma ideia do nível de criticidade entre os equipamentos.



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Os dados correspondem a *breakdowns* de 6 meses. Desta forma, foram coletados dados separadamente de equipamentos correspondentes a cada área apresentada.

O primeiro equipamento que houve uma série de quebras corresponde a área de processo fluidizado de um dos detergentes em pó fabricados. O equipamento é uma enchedora, da linha industrial 9, com 316,50 horas de equipamento parado devido a *breakdown* e conseqüentemente, ações corretivas, com um total de 65 quebras no período de 6 meses. A partir dos dados coletados deste equipamento, foi possível obter dados para aplicação do modelo *delay time* conforme Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros do modelo para o equipamento 1

T	Horas
C_l	5592,32007
C_f	30045,20920
C_p	4000,00
d	0,20537
λ	0,01484
K_f	0,55445
$Custo_{ip}$	100,00
$Custo_d$	5642,50876
T_{insp}	0,97385
$C_v(falha)$	7659,49492
$C_v(defeito)$	900,00
F	3100,00
C_i	19.285,71428

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Assim, a taxa de falha (λ) foi estabelecida considerando o histórico de ocorrências do equipamento em dados observados em um período de 6 meses, assim como a taxa de chegada de defeitos (K_f) que além do histórico, também foi checada por um especialista. O custo por hora da equipe de manutenção que conduz a inspeção foi baseado em uma equipe de três técnicos, sendo dois mecânicos e um eletricista. Este número pode variar de equipamento para equipamento, mas no equipamento que foi realizado a análise, as inspeções geralmente são de responsabilidade de três técnicos. O custo por inconveniência (C_i) representa o que se perde ou deixa de produzir por hora devido este equipamento estar parado. Este custo foi estimado com base no conhecimento de três especialistas, sendo um da área de manufatura e dois da área de manutenção.

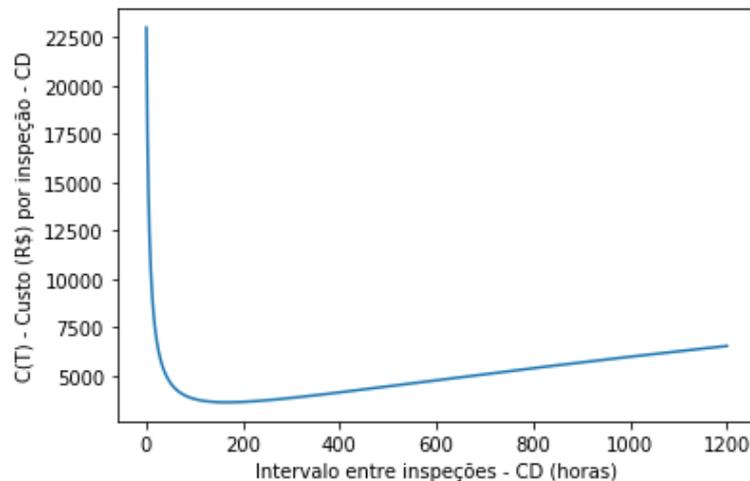
Desta forma, com todos os parâmetros do modelo, foi possível obter dados necessários para cálculo do $C(T)$ para o equipamento 1 (enchedora), conforme apresentado na Equação 15.

$$C(T) = \frac{\left[0,55445T \left\{30045,21 \left(1 + \frac{e^{-0,01484T}}{0,01484T} - \frac{1}{0,01484T}\right) + 4000 \left(\frac{1}{0,01484T} - \frac{e^{-0,01484T}}{0,01484T}\right)\right\} + 5592,32\right]}{T + 0.20537}$$

(15)

O $C(T)$ foi calculado em linguagem Python. Assim, conforme a Equação 15, foi possível chegar ao custo esperado por inspeção, conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15: Custo esperado por inspeção - Equipamento 1



Fonte: Esta pesquisa (2020).

O equipamento 1 corresponde a enchedora da linha 9 que está alocada na área de processo fluidizado de um dos detergentes em pó fabricados e teve 316,50 horas de parada, com um total de 65 quebras no período de 6 meses. Assim, no equipamento 1 as inspeções devem ser realizadas a cada 166 horas (6,92 dias) a um custo esperado de inspeção de R\$ 3.634,78.

A mesma coleta de dados foi realizada para um equipamento nomeado como robô 3 pelo especialista, da área de processo soprado do detergente em pó 2, que teve 177 horas de parada devido a *breakdown* no período.

Tabela 11: Parâmetros do modelo para o equipamento 2

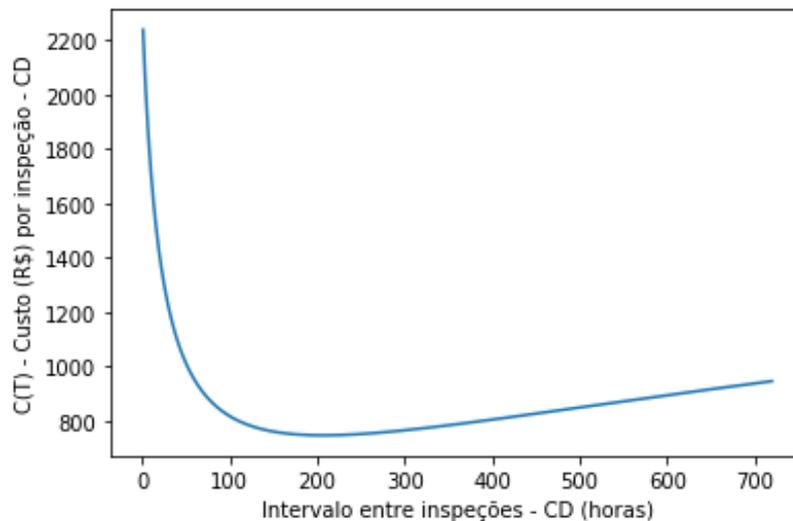
T	Horas
C_I	2087,26415
C_f	38015,00000
C_p	8970,00000
d	0,89831
λ	0,03630
K_f	0,04450
$Custo_{ip}$	70,00000
$Custo_d$	9305,00
T_{insp}	0,22264
$C_v(falha)$	8545,00000
$C_v(defeito)$	3500,00000
F	5470,00000
C_i	24000,0000

Fonte: Esta pesquisa (2020).

É importante destacar que de acordo com informações do especialista em manutenção, embora os *breakdowns* no robô 3 ocorram em uma proporção menor, o impacto de um *breakdown* neste equipamento é alto por se tratar de um equipamento que fica alocado no final da linha de fabricação, ou seja, quando o robô 3 quebra, toda linha produtiva também fica paralisada. Isto é, a quebra neste equipamento gera uma perda de 8 toneladas de detergente em pó por hora.

Na Figura 16 é apresentado o custo esperado por inspeção:

Figura 16: Custo esperado por inspeção – Equipamento 2



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Com os parâmetros do equipamento 2, foi possível obter o $C(T)$ para tal. Portanto, para que os defeitos possam ser identificados antes das falhas, as inspeções no robô 3 devem ocorrer a cada 206 horas (8,6 dias), a um custo de R\$ 746,22.

O terceiro equipamento corresponde a um ‘misturador’ (*ploughshare mixer*), da área de embalagens, com cerca de 37,3 horas de paradas, totalizando 17 quebras no período. De acordo com o especialista, embora não apresente um número alto ou horas de paradas, uma única parada gera um impacto alto, pois impacta outras etapas no setor de embalagem.

Assim, os parâmetros coletados relacionados ao misturador (equipamento 3) estão apresentados na Tabela 12.

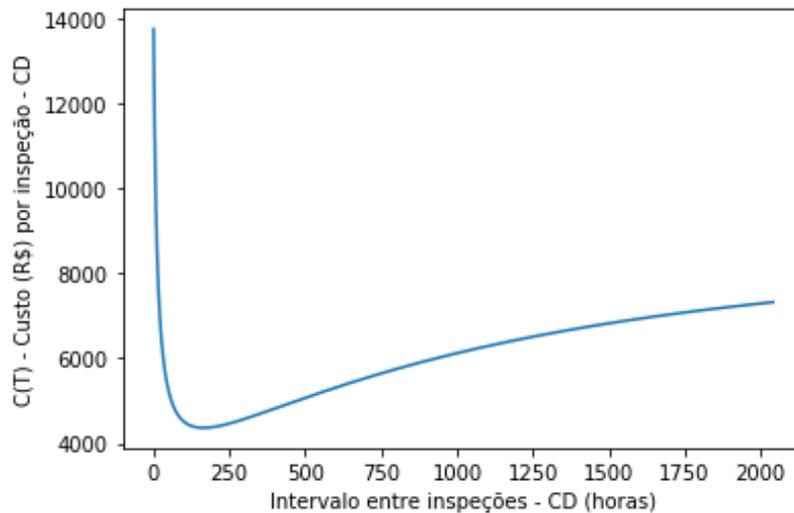
Tabela 12: Parâmetros do modelo para o equipamento 3

T	Horas
C_l	6714,00000
C_f	47200,56000
C_p	15200,45000
d	0,45576
λ	0,00388
K_f	0,19231
$Custo_{ip}$	300,00
$Custo_d$	15000,00
T_{insp}	2,19412
$C_v(falha)$	9200,56000
$C_v(defeito)$	7200,45
F	8000
C_i	30000,00

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Com os parâmetros do misturador, é possível chegar a um custo esperado por inspeção, conforme é apresentado na Figura 17. Ressalta-se que, segundo especialistas da manutenção e manufatura, quando o misturador quebra, automaticamente todas as linhas de embalagem, da linha de embalagem 4 a 14 (10 linhas), ficam paradas. Além disso, deixa-se de produzir 10 toneladas por hora nesta linha.

Figura 17: Custo esperado por inspeção – Equipamento 3



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Desta forma, para que o equipamento seja inspecionado no tempo ideal antes de falhas ocorram, no misturador as inspeções deverão ocorrer a cada 164 horas a um $C(T)$ de R\$4.362,96. Vale ressaltar que esta planta industrial opera 24 horas por dia.

Diante das análises apresentadas, observa-se que se considerarmos que esta planta industrial fabrica dois tipos de produtos em duas linhas de fabricação, o custo de inconveniência devido a uma falha chegaria a R\$60.000,00 por hora. Isto é, o custo de uma inspeção detalhada no tempo ideal como ação preventiva apresenta-se como uma alternativa menos custosa.

Com esta proposta de projeto de melhoria para redução de custos visando reduzir *breakdowns* com ações preventivas, como uma inspeção desempenhada no momento adequado e contemplando somente três equipamentos, pode-se observar que esta planta industrial tem potencial para economizar no mínimo R\$130.000,00. Considerando uma planta industrial deste porte tem centenas de equipamentos na mesma situação, acredita-se que a proposta tem um potencial sugestivo de que pode contribuir de maneira direta para redução de perdas convertidas em custos.

4.6 CONSIDERAÇÕES

Esta aplicação foi realizada com dados reais de uma planta industrial de bens de consumo, apresentado na seção 4.3. É importante ressaltar que, embora a coleta de dados juntamente com entrevistas tenha levado mais de 20 meses para a construção deste trabalho,

na prática, com o fornecimento de uma estrutura sistemática como esta, o tempo de coleta de dados pode ser reduzido de modo significativo. O tempo de coleta na prática vai depender do tipo de empresa, do tamanho da empresa e da disponibilidade da empresa em fornecer dados do modo instantâneo.

De tal modo, após as perdas e desperdícios serem identificados e convertidos em custos conforme procedimento do Programa WCM, propusemos categorizá-las por meio do FTOPSIS-Class integrado aos impactos da estratégia de manufatura considerando além do critério custo, os critérios de confiabilidade/credibilidade, qualidade, rapidez/velocidade e flexibilidade.

Nesse sentido, por meio do FTOPSIS-Class, cada uma das alternativas foi alocada a uma classe, de acordo com impacto na estratégia de manufatura. As alternativas da classe 4 deverão ser priorizadas primeiro, depois da classe 3 e assim por diante. A partir disso, projetos visando melhorias deverão/poderão ser desenvolvidos. Na aplicação realizada, por exemplo, foi proposto um projeto de melhoria voltado a redução de *breakdown* (A2), utilizando o modelo *delay time*, já que essa alternativa foi classificada como de alto impacto (classe 4).

É importante ressaltar que depois que ações de melhorias forem realizadas nas alternativas pertencentes a classe 4 (e até mesmo a classe 3), por meio do FTOPSIS-Class uma nova rodada poderá ser realizada e uma nova classificação será gerada considerando somente alternativas que restaram, passíveis de ações.

Portanto, o framework proposto pode ser aplicado em indústrias de qualquer segmento, até mesmo em empresas que desejam implantar o Programa WCM e estão num processo inicial de implantação com análise dos indicadores do pilar de custo.

5 FRAMEWORK PROPOSTO PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE SEGURANÇA DO PROGRAMA WCM

Neste capítulo é apresentada a proposta de um framework para priorização no âmbito do pilar de segurança do Programa WCM. Ressalta-se que, o pilar de segurança é o primeiro a ser considerado dentro de uma manufatura de classe mundial (D'ORAZIO; MESSINA; SCHIRALDI, 2020; EDE, 2015). Operar de maneira segura com índices de segurança reduzidos ou zerados tem sido cada vez mais requisito da cultura de empresas que buscam se destacar ou obter vantagem competitiva por meio da manufatura através da valorização de seus colaboradores, tornando-se uma característica fundamental no Programa WCM.

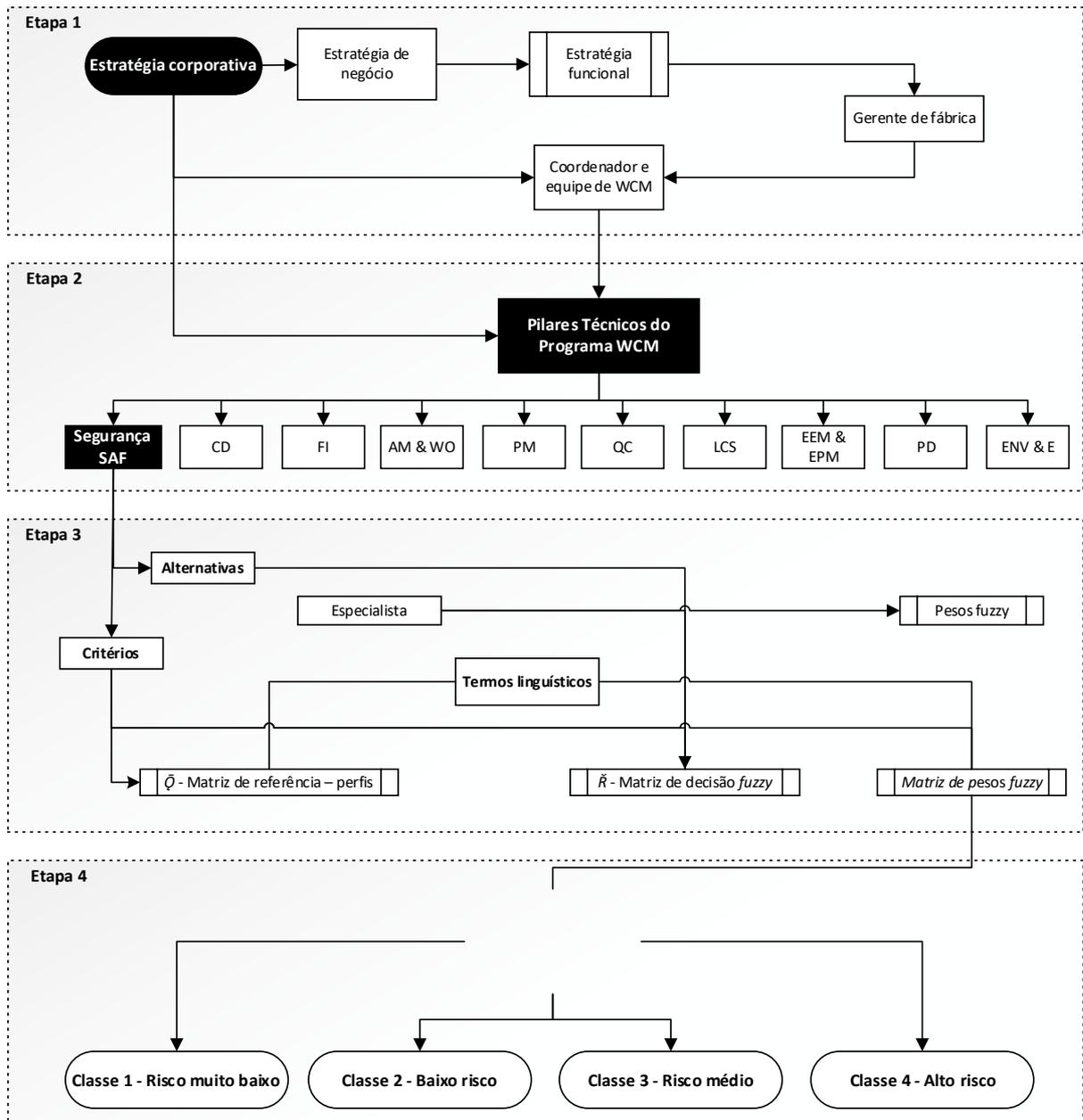
Para demonstrar a viabilidade do framework proposto, uma aplicação numérica foi realizada com dados reais inerentes ao pilar de segurança de uma planta industrial que adota o Programa WCM. É importante destacar que os dados coletados para o pilar de segurança são diferentes dos dados do pilar de custo, pois referiram-se aos indicadores gerenciais distintos, representados através de critérios e alternativas distintas. Na aplicação foi demonstrado a proposta desse framework, com a junção entre o Programa WCM, o método FTOPSIS-Class e princípios do FMECA.

Nesse sentido, na seção 5.1 foi apresentada a proposta para priorização no pilar de segurança. Na seção 5.2 foram apresentados os dados estruturados do caso estudado, a aplicação numérica e os resultados obtidos. Na seção 5.3 foi discutido as implicações práticas e gerenciais com base nos resultados obtidos em termos de segurança. Na seção 5.4 foram apresentadas análises de sensibilidade do FTOPSIS-Class com foco no pilar de segurança e na seção 5.5 foram exibidas as principais conclusões em relação a proposta deste capítulo.

5.1 PROPOSTA PARA PRIORIZAÇÃO NO PILAR DE SEGURANÇA DO PROGRAMA WCM

A abordagem proposta nesta seção envolveu a consideração de uma análise baseada nos princípios do FMECA associada a um modelo de decisão multicritério para avaliar prioridades para ações de segurança em instalações industriais no âmbito do Programa WCM. Portanto, buscou-se o enriquecimento do processo de decisão sem ao mesmo tempo torná-lo uma tarefa tão complexa que inviabilize a sua aplicação. Para tanto, foram considerados os aspectos do pilar de segurança do Programa WCM mediante o uso de variáveis linguísticas. Então, na Figura 18 é apresentado o framework proposto para o pilar de segurança, demonstrando a integração do Programa WCM com MCDM/A e FMECA.

Figura 18: Framework proposto para o pilar de segurança



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Considerando este contexto, foi considerado o uso do método FTOPSIS-Class, que pode lidar com variáveis linguísticas e classificar as alternativas de acordo com sua prioridade para o pilar de segurança do Programa WCM, considerando os critérios (KPIs) envolvidos nesse pilar. Ao usar o FTOPSIS-Class, os princípios do FMECA foram incluídos no processo de decisão através da matriz de decisão. Foram considerados todos os critérios do pilar segurança através de uma avaliação em termos de gravidade/severidade, ocorrência e detectabilidade como uma forma de integrar os princípios do FMECA às estratégias do pilar de segurança do WCM.

O primeiro passo envolveu esclarecer as estratégias e prioridades da empresa para a instalação industrial. Portanto, com base no alinhamento entre o gerenciamento da planta e a equipe do Programa WCM, aspectos adicionais puderam ser considerados para o modelo multicritério. Um coordenador de WCM é geralmente responsável por gerenciar os dados coletados pela equipe de líderes de cada pilar. Nesse caso, o papel do líder responsável pelo pilar de segurança é coletar informações relacionadas aos indicadores de desempenho de segurança da planta, realizar treinamentos e outras atividades apoiadas por outros líderes, que são supervisionados e apoiados pelo coordenador de WCM, que será responsável pelos resultados para o gerente da fábrica e, conseqüentemente, para a diretoria corporativa.

Na terceira etapa, foram consideradas alternativas, critérios e a definição dos termos linguísticos que foram utilizados na análise. Considerando cada alternativa, foi realizada uma análise considerando os princípios do FMECA pelo especialista, que avaliou, em termos linguísticos, a gravidade, ocorrência e detectabilidade em cada um dos indicadores do pilar de segurança.

Considerando a importância de cada critério para a empresa no escopo do pilar segurança, foram definidos os pesos, que posteriormente foram representados em termos linguísticos na matriz de pesos *fuzzy*. Os perfis de cada classe foram considerados de acordo com a natureza do número de prioridade de risco (RPN), para que várias classes fossem obtidas de acordo com a prioridade de risco do pilar de segurança. As variáveis linguísticas adotadas no modelo de pesos e avaliação de alternativas segundo os números *fuzzy* trapezoidais deve seguir os valores apresentados na Tabela 1. O quarto passo consistiu na aplicação do método FTOPSIS-Class.

O modelo proposto considera quatro classes. A primeira classe é de risco muito baixo, aquela que representa as alternativas com menor potencial de risco, seguida pela classe de baixo risco, em que ambas as classes contemplam alternativas de menor risco. A terceira classe, risco médio, designa as alternativas que possuem risco potencial médio. E, finalmente, a quarta classe, alto risco, representa as áreas industriais que devem ser priorizadas em relação aos projetos e ações em desenvolvimento para aumentar a segurança, tendo em vista que essas áreas apresentam o mais alto nível de risco. Dessa forma, as avaliações linguísticas e ponderações de critérios podem ser obtidas utilizando as escalas apresentadas da Tabela 1, baseado na Seção 2.6.2.

O protocolo de avaliação explica a lógica do RPN de acordo com a Tabela 13, para que os KPIs possam ser ponderados de acordo com o RPN ($S \times O \times D$). Assim, cada área

industrial foi analisada com vistas à gravidade das falhas, ocorrência e capacidade de detectar ou controlar aspectos que afetam a segurança dessa área industrial.

Tabela 13: Uso do RPN

RPN	Acrônimo	Compreensão
Severidade	<i>S</i>	Quanto menor, melhor
Ocorrência	<i>O</i>	Quanto menor, melhor
Detecção	<i>D</i>	Quanto maior, melhor

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Assim, a severidade e a detectabilidade puderam ser avaliadas para cada critério por meio de avaliações linguísticas apresentadas na Tabela 1 e de acordo com lógica apresentada na Tabela 13. E a ocorrência, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14: Avaliações de ocorrência

Avaliações	(O)
<i>Muito baixo (VL)</i>	Chance de ocorrência menor que 1%
<i>Baixo (L)</i>	Entre 1-10% de chance de ocorrência
<i>Médio (M)</i>	Chance de ocorrência entre 10-33% (1/3)
<i>Alto (H)</i>	Chance de ocorrência entre 33-67% (2/3)
<i>Muito alto (VH)</i>	> 67% (2/3) de chance de ocorrência (isso ocorrerá em algum momento)

Fonte: Adaptado de Abdelgawad e Fayek (2010).

O RPN para cada dimensão do pilar de segurança foi obtido agregando as avaliações de gravidade, ocorrência e detectabilidade. Assim, foi construída uma matriz de decisão *fuzzy* que relaciona a avaliação da RPN a cada dimensão do pilar e a cada alternativa.

Coube também ao especialista avaliar e definir os perfis das classes, considerados juntamente com os pesos dos critérios de classificação com o método FTOPSIS-Class. Assim, o desenvolvimento do pilar de segurança visa criar uma cultura de segurança que vai além do cumprimento das normas. Isso envolve a criação de planos e estratégias para que os riscos sejam minimizados preventivamente, considerando o grau de risco em cada área de plantas industriais.

5.2 APLICAÇÃO NUMÉRICA

De acordo com o framework apresentado na seção 5.1, 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), cabendo à empresa definir o nível de tolerabilidade a riscos que será considerado.

As alternativas consideradas no caso estudado foram as áreas da mesma planta industrial considerada no caso do capítulo 4. Foram considerados os indicadores que já haviam sido avaliados no Programa WCM e visam o planejamento de estratégias para melhoria e gerenciamento da segurança. Essas áreas industriais são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Relação de alternativas do pilar de segurança

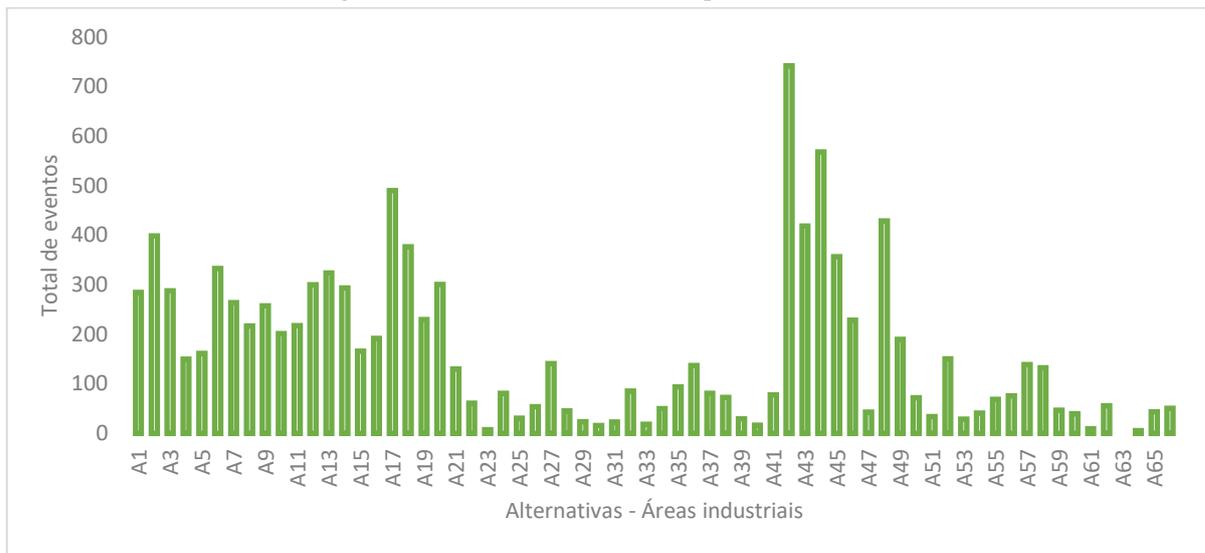
Área	Áreas Industriais	A_m
EMBALAGEM - SABÃO EM PÓ	L04 - Embalagem	A1
	L15 - (<i>candy</i>)	A2
	L16 - (<i>candy</i>)	A3
	Robô 3	A4
EMBALAGEM FLUIDIZADO	L05- Verde	A5
	L06 - Verde N	A6
	L07 - Marron	A7
	L08 - Vermelha K	A8
	L09 - Vermelha J	A9
	L10 - Amarela H/I	A10
	L11 - Amarela G	A11
	L12 - Preta E/F	A12
	L13 - Branca C/D	A13
	L14 - Azul A/B	A14
PROCESSO SOPRADO	F01 - Linha Cinza Célula 01 - Robô	A15
	F02 - Linha Cinza Célula 02 - Robô	A16
	Soprado Térreo PH	A17
	1° Piso PH	A18
	2° Piso PH	A19
	3° Piso PH	A20
	4° Piso PH	A21
	5° Piso PH	A22
	Torre de sopragem	A23
	Soprado Térreo SD	A24
	1° Piso SD	A25
	2° Piso SD	A26
	3° Piso SD	A27
	4° Piso SD	A28

	5° Piso SD	A29
	6° Piso SD	A30
	Fornalha	A31
	Cabine de Jato	A32
	Ciclones	A33
	Torre de sopragem / Topo da torre	A34
	Soprado Térreo SM	A35
	1° Piso SM	A36
	2° Piso SM	A37
	3° Piso SM	A38
	4° Piso SM	A39
	Torre de sopragem	A40
	Corte de reprocesso soprado	A41
PROCESSO FLUIDIZADO	Fluidizado - Térreo	A42
	Fluidizado - SAMP	A43
	Fluidizado - 1° Piso	A44
	Fluidizado - 2° Piso	A45
	Fluidizado - 3° Piso	A46
	Corde de reprocesso - Fluidizado	A47
ARMAZÉM	Armazém	A48
	Tancagem / Transporte pneumático	A49
	Tancagem - Fluidizado (Armazém)	A50
	Tancagem - Soprado (Armazém)	A51
ÁREAS PRODUTIVAS GERAIS	Laboratório	A52
	Entrada de Fábrica / Sala do Consumidor	A53
	Manutenção / Predial	A54
	Utilidades	A55
	Quiosque / Área de resíduos	A56
	Terceiros	A57
ADMNISTRATIVO	ADM (Escritórios, salas de reuniões, portaria e planejamento)	A58
	<i>Feel Good</i>	A59
	Refeitório	A60
	Serviço de Saúde	A61
	Entradas	A62
	Portaria	A63
	Lojinha	A64
	Almoxarifado	A65
	Banheiros / Vestiários	A66

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Para cada uma das áreas identificadas na Tabela 15, o Programa WCM preconiza que sejam monitorados acidentes e eventos que ameaçam a segurança. A Figura 19 apresenta o total de eventos (ocorrências) por área industrial (alternativa) correspondente a doze meses.

Figura 19: Número total de eventos por área industrial



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Para construir a matriz de decisão *fuzzy*, os critérios de avaliação foram considerados de acordo com os indicadores do pilar de segurança, tais como *fatality* (FA), *lost time accident* (LTA), *restricted work case* (RWC), *medical treatment case* (MTC), *first aid case ou incident* (FAC/FAI), *near miss* (NM), *unsafe condition* (UC) e *insecure act* (UA). Os critérios são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Relação de critérios do pilar de segurança

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

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Após avaliar cada área industrial em termos de gravidade/severidade, ocorrência e detectabilidade, o RPN de cada dimensão do pilar de segurança foi avaliado por um especialista de segurança em termos de variáveis linguísticas, conforme apresentado na Tabela 17, que representa a matriz de decisão.

Tabela 17: Matriz de decisão do pilar de segurança

A_m $/C_m$	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	VL	VL	VL	M	M	M	M	M
A2	VL	VL	VL	L	M	M	M	M
A3	VL	VL	VL	VL	M	M	H	M
A4	VL	VL	VL	VL	VL	L	VL	VL
A5	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL	L
A6	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL	M
A7	VL	VL	VL	VL	VL	L	M	M
A8	VL	VL	VL	VL	VL	L	VL	M
A9	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL	M
A10	VL	VL	VL	VL	VL	H	L	H
A11	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	L
A12	VL	VL	VL	VL	VL	M	M	L
A13	VL	VL	VL	VL	VL	H	H	M
A14	VL	VL	VL	VL	VL	H	H	M
A15	VL	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL
A16	VL	VL	VL	VL	VL	L	H	L
A17	L	L	L	M	VH	VH	VH	VH
A18	VL	VL	VL	VL	VL	M	VH	M
A19	VL	VL	VL	VL	VL	M	M	M
A20	VL	VL	VL	VL	VL	M	M	L
A21	VL	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL
A22	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	VL
A23	L	L	L	VL	VL	L	L	M
A24	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	VL
A25	VL							
A26	VL							
A27	VL	L						
A28	VL							
A29	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL	L
A30	VL							
A31	VL	M	L	L	VL	L	VL	L
A32	VL	VL	VL	VL	VL	VL	M	L
A33	L	M	M	L	L	L	L	M
A34	L	M	M	L	L	L	L	M
A35	VL	VL	VL	VL	VL	L	VL	L
A36	L	VH	H	H	H	VH	M	H
A37	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	M
A38	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	L
A39	VL	VL	VL	VL	VL	L	VL	M
A40	L	M	M	L	L	L	VL	M

A41	VL	M						
A42	VL	VL	VH	H	H	VH	VH	VH
A43	VL	VL	VL	VL	VL	M	M	M
A44	VL	VL	VH	H	H	VH	VH	VH
A45	VL	VL	VL	VL	VL	H	VH	VH
A46	VL	VL	VL	VL	L	L	M	L
A47	VL	L	L	L	L	M	VL	M
A48	VL	VL	L	L	M	H	L	H
A49	VL	VL	VL	VL	L	L	M	M
A50	VL	M						
A51	VL	M						
A52	VL	VL	VL	L	L	VH	M	M
A53	VL							
A54	H	VH	H	M	L	H	M	H
A55	VL	VL	VL	VL	VL	VL	M	L
A56	VL	VL	VL	VL	VL	L	VL	VL
A57	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	L
A58	VL	VL	VL	VL	VL	H	L	L
A59	VL	L						
A60	VL	VL	VL	VL	VL	VL	L	L
A61	VL							
A62	VL	L						
A63	VL							
A64	VL							
A65	VL	VL	VL	VL	VL	M	VL	M
A66	VL	VL	VL	VL	VL	L	VL	M

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Os pesos obtidos junto ao especialista de segurança refletiram a importância usada na avaliação dos indicadores do pilar de segurança. A Tabela 18 apresenta os pesos de acordo com as variáveis linguísticas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 18: Pesos dos critérios - pilar de segurança

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

Fonte: Esta pesquisa (2020).

É importante enfatizar que a definição das classes para o procedimento de classificação ordinal sugerido neste trabalho não dependeu apenas da avaliação das alternativas, como ocorre em um processo de classificação estatística. A definição de classes esteve associada ao que é desejado em termos do processo de tomada de decisão para o significado de cada classe em termos preferenciais. Ou seja, foi 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, conforme as etapas apresentadas na Figura 6. Os perfis que definiram as classes a serem consideradas foram definidos pelo especialista e estão apresentados abaixo:

Tabela 19: Perfis de classificação - pilar de segurança

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

Fonte: Esta pesquisa (2020).

As alternativas foram classificadas considerando os termos linguísticos apresentados na Tabela 18, conforme procedimento estabelecido por Ferreira *et al.* (2018) para aplicação do FTOPSIS-Class. A Tabela 20 apresenta os valores de CC_i^p para cada alternativa em relação ao perfil da classe, respectivamente, e destaca os valores de acordo com a adesão à classe.

Tabela 20: Coeficiente de proximidade - pilar de segurança

	P1	P2	P3	P4
A1	0,70998622	0,71633982	0,49942635	0,29001378
A2	0,74529575	0,74179057	0,53230156	0,25470425
A3	0,74085875	0,69285114	0,54089309	0,25914125
A4	0,89659058	0,71976860	0,45509729	0,10340942
A5	0,86635310	0,74146125	0,44992070	0,13364690
A6	0,83185195	0,71818292	0,44533232	0,16814805
A7	0,76936806	0,69625581	0,51496752	0,23063194
A8	0,83296523	0,70870026	0,44832873	0,16703477
A9	0,83185195	0,71818292	0,44533232	0,16814805
A10	0,73978743	0,70638457	0,44790700	0,26021257
A11	0,83628510	0,74353226	0,48255053	0,16371490
A12	0,80080697	0,73069258	0,51560241	0,19919303

A13	0,70606126	0,68081918	0,52552600	0,29393874
A14	0,70606126	0,68081918	0,52552600	0,29393874
A15	0,81733788	0,70052859	0,51320788	0,18266212
A16	0,76982091	0,69073342	0,52426892	0,23017909
A17	0,39623661	0,54003544	0,56978046	0,60376339
A18	0,70866151	0,65468379	0,52496329	0,29133849
A19	0,76632381	0,70576541	0,51579477	0,23367619
A20	0,80080697	0,73069258	0,51560241	0,19919303
A21	0,81733788	0,70052859	0,51320788	0,18266212
A22	0,86643995	0,73103346	0,48344692	0,13356005
A23	0,74685574	0,75140244	0,55538054	0,25314426
A24	0,86643995	0,73103346	0,48344692	0,13356005
A25	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A26	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A27	0,84926237	0,72205163	0,45452324	0,15073763
A28	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A29	0,86635310	0,74146125	0,44992070	0,13364690
A30	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A31	0,78814438	0,74362120	0,51654243	0,21185562
A32	0,78856853	0,71102540	0,51406548	0,21143147
A33	0,68550328	0,74781841	0,61024862	0,31449672
A34	0,68550328	0,74781841	0,61024862	0,31449672
A35	0,86644953	0,73104974	0,45249109	0,13355047
A36	0,36910137	0,50315321	0,61253164	0,63089863
A37	0,80279798	0,72007248	0,48045657	0,19720202
A38	0,83628510	0,74353226	0,48255053	0,16371490
A39	0,83296523	0,70870026	0,44832873	0,16703477
A40	0,71999510	0,73037856	0,56927960	0,28000490
A41	0,81731730	0,70049967	0,45069366	0,18268270
A42	0,41934834	0,47732034	0,39025438	0,58065166
A43	0,76632381	0,70576541	0,51579477	0,23367619
A44	0,41934834	0,47732034	0,39025438	0,58065166
A45	0,61836762	0,59711897	0,46731601	0,38163238
A46	0,81856528	0,73005362	0,51517167	0,18143472
A47	0,80168246	0,77013795	0,47440705	0,19831754
A48	0,72924344	0,75894207	0,44932610	0,27075656
A49	0,78340883	0,70521035	0,51533216	0,21659117
A50	0,81731730	0,70049967	0,45069366	0,18268270
A51	0,81731730	0,70049967	0,45069366	0,18268270
A52	0,69429380	0,71706308	0,48820739	0,30570620

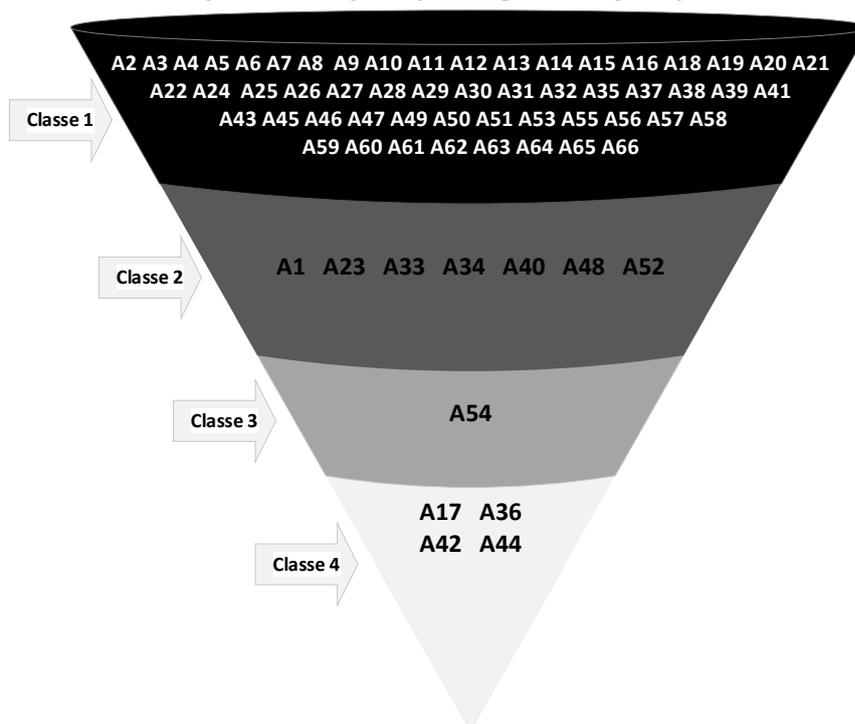
A53	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A54	0,42275925	0,50754263	0,63479064	0,57724075
A55	0,78856853	0,71102540	0,51406548	0,21143147
A56	0,89659058	0,71976860	0,45509729	0,10340942
A57	0,83628510	0,74353226	0,48255053	0,16371490
A58	0,80872013	0,76475793	0,47850359	0,19127987
A59	0,84926237	0,72205163	0,45452324	0,15073763
A60	0,82047787	0,73356145	0,48323014	0,17952213
A61	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A62	0,84926237	0,72205163	0,45452324	0,15073763
A63	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A64	0,87802398	0,71160721	0,45690784	0,12197602
A65	0,83185195	0,71818292	0,44533232	0,16814805
A66	0,83296523	0,70870026	0,44832873	0,16703477

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Conforme a etapa 4, na Figura 6, o procedimento realizado levou a classificação das alternativas, de acordo com a área industrial com maior potencial de propensão de riscos à segurança.

Assim, as alternativas pertencentes a coluna P1 foram alocadas à classe 1 - risco muito baixo, P2 à classe 2 - baixo risco, P3 à classe 3 - risco médio e P4 à classe 4 - alto risco. Assim, para apoiar os resultados apresentados na Tabela 20, as classificações estão expressas na Figura 20.

Figura 20: Categorizações do pilar de segurança



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Logo, as primeiras ações corretivas devem ser desenvolvidas em áreas industriais classificadas na classe 4, depois classe 3, classe 2 e, finalmente, classe 1.

5.3 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS

Com os resultados obtidos ao usar a abordagem proposta, foi interessante observar que entre as áreas industriais recomendadas como as mais críticas, como A17, A36, A42 e A44. É importante ressaltar que A36 não é uma daquelas alternativas com maior ocorrência de eventos totais. Por sinal, A36 possui um número pequeno de ocorrências totais de eventos, cinco vezes menos que A42, como pode ser observado na Figura 14. Portanto, ao fazer uma análise mais abrangente, aspectos ocultos que não foram capturados na avaliação tradicional do WCM puderam ser percebidos ao considerar vários critérios com FTOPSIS-Class.

Assim, considerando o uso dos princípios do FMECA para todos os indicadores dos pilares de segurança, foi possível observar que essa área pertence a área do *Crutcher*, que executa um processo de sopro, que inclui colorir e alimentar partículas. Portanto, devido à série de reações químicas e às altas temperaturas destes processos, o risco associado a essa área industrial teria sido subestimada ao usar a abordagem tradicional do Programa WCM.

O processo de sopro possui duas áreas industriais de alto risco, A17 e A36. Os especialistas verificaram que o A17 tinha mais de 450 relatórios sobre a UA durante o período analisado. Embora o A36 tenha poucos problemas na UA e na UC, foi uma das áreas industriais que teve mais problemas com NM, FAC, MTC e LTA durante o período observado. A UC e a UA estão altamente relacionadas à previsão de acidentes, pois revela procedimentos ou atitudes inseguras, são os aspectos mais críticos da A42 e A44, que juntos estão relacionados a 200 relatórios da UC e 1100 UA.

Outro aspecto interessante a destacar é que existem vários aspectos de segurança a serem gerenciados nas atividades de manutenção (A54). Tais elementos foram destacados na análise durante a avaliação da FMECA com o especialista, que não apareceria na avaliação tradicional do pilar de Segurança. Assim, na abordagem proposta, a A54 foi classificada como uma área industrial de risco médio.

Ao comparar as prioridades estabelecidas usando o Programa WCM tradicional, as áreas mais críticas seriam A17, A42, A44 e A48. Embora com a abordagem proposta neste documento, seriam A17, A36, A42 e A44, seguidas por alternativas nas classes 3, 2 e 1. A abordagem de múltiplos critérios implementados pela FMECA nos permitiu encontrar aspectos que mostraram A36 como uma área industrial de alto risco, semelhante às áreas classificadas com maior potencial de risco que a A48.

Ao estabelecer prioridades dessa maneira, são estabelecidas estratégias para que cada área industrial priorizada receba o devido cuidado, resultando em projetos ou ações voltadas à redução de riscos à segurança. Assim, as ações para mitigar os riscos podem ser orientadas pelas sete etapas de segurança do Programa WCM, como foi demonstrado na Figura 4, com base em um processo mais detalhado de priorização, resultante de uma análise mais completa que envolverá questões adicionais que os especialistas possam observar examinando cada área em detalhe.

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade relacionada a aplicação desenvolvida no pilar de segurança também teve como finalidade avaliar a robustez dos resultados obtidos com o FTOPSIS-Class.

Desta forma, junto com o especialista, algumas avaliações foram realizadas alterando os valores das avaliações das alternativas nos dois primeiros critérios em um ponto na escala para mais, neste caso, para C1 e C2. Isto por serem critérios críticos para qualquer empresa

segundo o especialista, e com base na literatura pesquisada. Como se trata de aspectos de segurança, entendeu-se que faria um sentido maior alterar somente para mais para poder ter uma dimensão mais conservadora. Assim, na Tabela 21 é apresentado os novos termos linguísticos com base na análise do especialista.

Tabela 21: Matriz de decisão - análise de sensibilidade

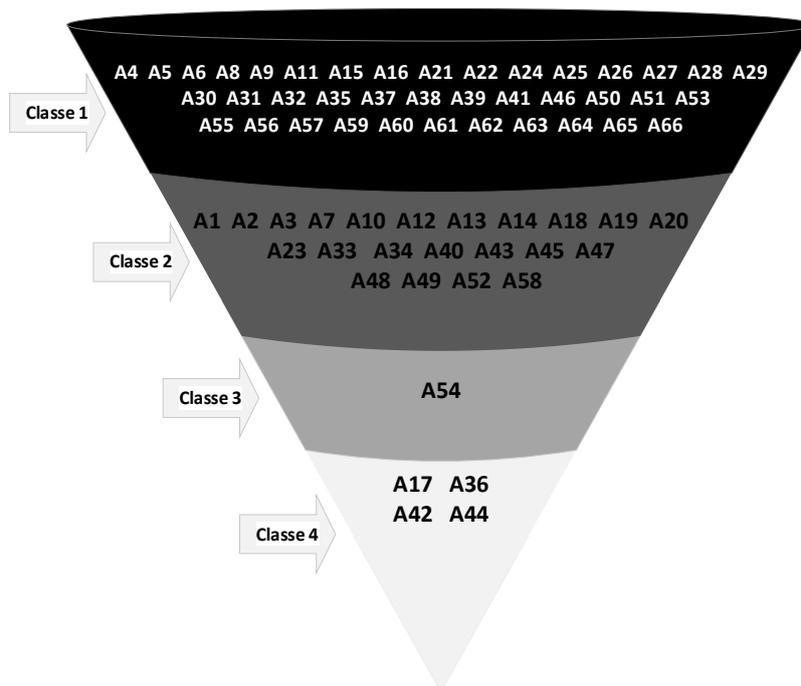
A_m $/C_m$	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	L	L	VL	M	M	M	M	M
A2	L	L	VL	L	M	M	M	M
A3	L	L	VL	VL	M	M	H	M
A4	L	L	VL	VL	VL	L	VL	VL
A5	L	L	VL	VL	VL	M	VL	L
A6	L	L	VL	VL	VL	M	VL	M
A7	L	L	VL	VL	VL	L	M	M
A8	L	L	VL	VL	VL	L	VL	M
A9	L	L	VL	VL	VL	M	VL	M
A10	L	L	VL	VL	VL	H	L	H
A11	L	L	VL	VL	VL	L	L	L
A12	L	L	VL	VL	VL	M	M	L
A13	L	L	VL	VL	VL	H	H	M
A14	L	L	VL	VL	VL	H	H	M
A15	L	L	VL	VL	VL	VL	M	VL
A16	L	L	VL	VL	VL	L	H	L
A17	M	M	L	M	VH	VH	VH	VH
A18	L	L	VL	VL	VL	M	VH	M
A19	L	L	VL	VL	VL	M	M	M
A20	L	L	VL	VL	VL	M	M	L
A21	L	L	VL	VL	VL	VL	M	VL
A22	L	L	VL	VL	VL	L	L	VL
A23	M	M	L	VL	VL	L	L	M
A24	L	L	VL	VL	VL	L	L	VL
A25	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A26	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A27	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	L
A28	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A29	L	L	VL	VL	VL	M	VL	L
A30	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A31	L	H	L	L	VL	L	VL	L
A32	L	L	VL	VL	VL	VL	M	L
A33	M	H	M	L	L	L	L	M
A34	M	H	M	L	L	L	L	M

A35	L	L	VL	VL	VL	L	VL	L
A36	M	VH	H	H	H	VH	M	H
A37	L	L	VL	VL	VL	L	L	M
A38	L	L	VL	VL	VL	L	L	L
A39	L	L	VL	VL	VL	L	VL	M
A40	M	H	M	L	L	L	VL	M
A41	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	M
A42	L	L	VH	H	H	VH	VH	VH
A43	L	L	VL	VL	VL	M	M	M
A44	L	L	VH	H	H	VH	VH	VH
A45	L	L	VL	VL	VL	H	VH	VH
A46	L	L	VL	VL	L	L	M	L
A47	L	M	L	L	L	M	VL	M
A48	L	L	L	L	M	H	L	H
A49	L	L	VL	VL	L	L	M	M
A50	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	M
A51	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	M
A52	L	L	VL	L	L	VH	M	M
A53	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A54	VH	VH	H	M	L	H	M	H
A55	L	L	VL	VL	VL	VL	M	L
A56	L	L	VL	VL	VL	L	VL	VL
A57	L	L	VL	VL	VL	L	L	L
A58	L	L	VL	VL	VL	H	L	L
A59	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	L
A60	L	L	VL	VL	VL	VL	L	L
A61	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A62	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	L
A63	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A64	L	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL
A65	L	L	VL	VL	VL	M	VL	M
A66	L	L	VL	VL	VL	L	VL	M

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Assim, na Figura 21 é apresentado em qual perfil cada alternativa foi alocada, ou seja, a qual classe pertence. O coeficiente de proximidade pode ser visualizado no Apêndice B.

Figura 21: Classificações após análise de sensibilidade 1 – pilar de segurança

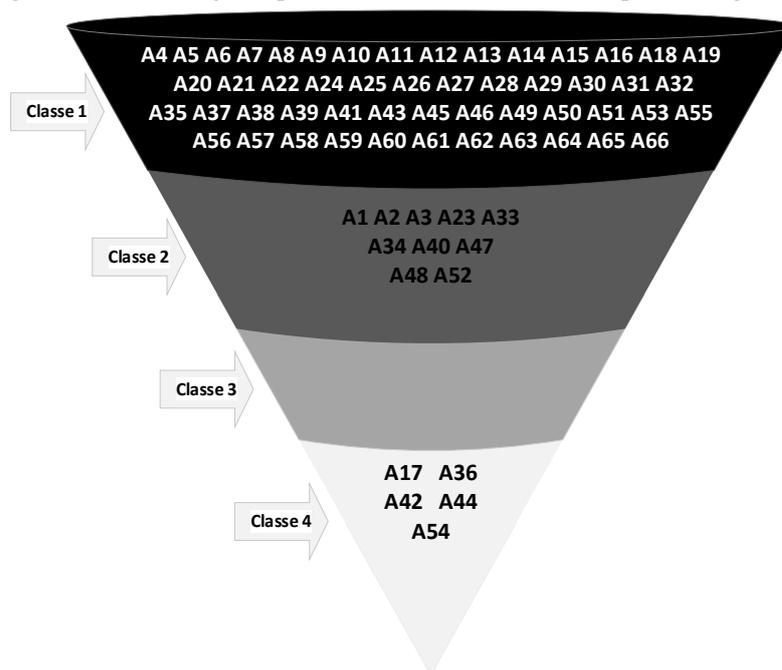


Fonte: Esta pesquisa (2020).

Portanto, após as alterações não foram observadas alterações nas alternativas (A17, A36, A42 e A44) alocadas na classe 4 anteriormente. Por outro lado, foram observadas alterações de classificação na classe 2. Alterações como por exemplo, A12, A13 e A14 pertencentes a classe 1 anteriormente e agora alocadas na classe 2.

Depois, uma nova análise de sensibilidade foi realizada alterando os pesos dos critérios para $W_m = \{EI, EI, EI, EI, EI, EI, EI, EI, EI\}$. As avaliações são apresentadas na matriz de decisão expressa na Tabela 21. Os resultados dessas modificações são ilustrados abaixo:

Figura 22: Classificações após análise de sensibilidade 2 – pilar de segurança



Fonte: Esta pesquisa (2020).

Após a realização desta segunda análise, foi possível observar que houve alterações nas classificações das alternativas A2, A3, A47 e A54. Portanto, após as análises efetuadas foi possível observar que o modelo é robusto. Os resultados foram apresentados ao especialista e na percepção dele, os resultados obtidos inicialmente com método de classificação foram consistentes. As alterações observadas na análise de sensibilidade não são consideradas significativas em termos da recomendação do modelo por não impactarem nas ações a serem desenvolvidas para melhoria da segurança nas áreas mais críticas.

5.5 CONSIDERAÇÕES

A abordagem tradicional do pilar de segurança do Programa WCM começa com uma “área piloto” que serviria de modelo para estender as melhores práticas genericamente por toda a empresa. Assim, a abordagem WCM 'atacaria' a área industrial com o pior resultado de segurança. Ainda assim, dentro dessas áreas, pode haver áreas industriais que não apresentem resultados tão ruins conforme a ótica tradicional, por exemplo, para A36. Embora a A36 não tenha mostrado um número maior de questões de segurança, foi apontada como uma área industrial de alto risco.

O framework proposto classifica as áreas industriais (alternativas) de acordo com o potencial de riscos, incorporando a lógica do FMECA para cada uma das dimensões consideradas no pilar de segurança do Programa WCM.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs dois frameworks para classificação de ações prioritárias de acordo com o impacto na estratégia de manufatura no âmbito do pilar de custo e de acordo com o nível de risco no âmbito do pilar de segurança do Programa WCM. Dessa forma, os frameworks propostos permitem que prioridades relacionadas ao pilar de custo e segurança possam ser realizadas de modo sistemático, com foco nas ações prioritárias.

A escolha do pilar de custo ocorreu por ser um dos pilares técnicos mais direcionadores na manufatura de classe mundial e, ao mesmo tempo, pouco comentado na literatura. Como o custo é um pilar norteador de qualquer manufatura, considera-se que existe uma lacuna na exploração de tratativas relacionados ao custo em WCM. Por outro lado, o pilar de segurança foi escolhido por ser o primeiro pilar do Programa WCM, uma vez que cada vez mais a segurança dentro do empresas tem se tornado um aspecto não negociável. Em outras palavras, a segurança tem como finalidade a melhoria contínua do ambiente do trabalho e a exclusão de condições inseguras para o trabalhador.

Uma revisão da literatura foi realizada visando demonstrar e discutir os avanços nos últimos vinte anos em relação as metodologias e referências direcionadas a World-Class Manufacturing e Programa WCM. Com base na revisão da literatura, foi possível constatar que nos últimos vinte anos, a maior parte dos trabalhos abordaram o termo WCM de modo genérico. Alguns trabalhos, de 1999 a 2006, buscaram apresentar práticas e/ou soluções para que empresas possam alcançar o status de WCM, enquanto outros buscaram relacionar as estratégias de manufatura e conseqüentemente objetivos de desempenho com WCM. Depois de 2007, os trabalhos buscaram destacar diferentes instrumentos que pudessem ajudar empresas a melhorar seus processos. A partir disso, o termo WCM começou a ser vinculado ao Programa WCM, contudo ainda de maneira geral. Os trabalhos com foco nos pilares do Programa WCM começaram a ganhar destaque nos últimos seis anos. Contudo, até onde se pode observar, ainda não foram publicados trabalhos voltados a todos os pilares técnicos do WCM de modo específico. Não foram encontrados também artigos científicos e revisões considerando o idioma inglês e revisão por pares com foco no pilar de custo e segurança do Programa WCM. O único trabalho que considerou o pilar de segurança, também o considerou juntamente com Lean Manufacturing e o TPM, ou seja, não houve um foco somente. Além disso, trabalhos considerando o pilar de custo do Programa WCM integrado as estratégias de manufatura e MCDM/A também não foram encontrados, mesmo considerando outros tipos de publicação. Do mesmo modo, não foram encontrados trabalhos com foco no pilar de

segurança do Programa WCM e MCDM/A integrado aos princípios do FMECA.

De modo geral, neste estudo foi proposto a criação de um caminho para que áreas industriais ou projetos sejam categorizados antes de serem priorizados, em termos de custos considerando o impacto à estratégia de manufatura e em termos de segurança considerando a prioridade de risco, diferentemente da maneira tradicional do Programa WCM. As abordagens propostas neste trabalho foram demonstradas por meio de uma aplicação numérica, considerando dados reais de uma planta industrial pertencente a uma multinacional britânica-neerlandesa de bens de consumo.

A abordagem proposta para o pilar de custo considerou além do procedimento tradicional do Programa WCM, que considera algumas etapas para identificar cada um dos custos relacionados a perdas e desperdícios que ocorrem em uma planta industrial, outros aspectos, como objetivos de desempenho em sua totalidade e o impacto de cada ação na estratégia de manufatura. De tal modo, com o framework proposto foi possível categorizar alternativas por meio do FTOPSIS-Class integrado aos impactos da estratégia de manufatura considerando além do objetivo custo outros objetivos, como credibilidade, qualidade, rapidez e flexibilidade.

A partir dos resultados obtidos no pilar de custo, recomendações e potenciais melhorias foram sugeridas considerando a classe de maior impacto na estratégia de manufatura. Para atuar de forma conjunta na redução de custos e melhoria de aspectos competitivos da manufatura foi sugerido um projeto de melhoria considerando um estudo analítico da política de manutenção adotada nos equipamentos mais críticos através de um modelo envolvendo o conceito de *delay time*. O modelo proposto considerou extensivamente a redução de *breakdowns* associados à minimização do custo. Esse processo estruturado pode ser aplicado em outras fábricas ou segmentos da indústria que adotem um programa de redução de custos.

Em relação à segurança, de modo geral, este trabalho procurou propor uma abordagem para classificar o nível de risco das alternativas em relação ao pilar de segurança do Programa WCM. Para isto foi proposto uma integração dos princípios do FMECA à análise multicritério, utilizando o método FTOPSIS-Class. Este processo estruturado de apoio a decisão permitiu classificar ações de acordo com os riscos relacionados à segurança. Em outros termos, as áreas industriais foram classificadas de acordo com uma prioridade de risco considerando todos os aspectos do pilar de segurança do Programa WCM.

Os resultados mostraram que a classificação com a integração dos princípios do FMECA com o método FTOPSIS-Class foi consistente com a realidade observada no caso em

estudo, e que pode ser replicada e testada em outras empresas, independentemente do setor industrial. Utilizando o caso apresentado, foi possível relacionar os principais conceitos exibidos ao longo do trabalho, para que a abordagem proposta pudesse ser testada e replicada.

Além disso, os resultados deste trabalho sugerem potenciais impactos reais em termos econômicos, uma vez que em termos de custos, projetos com maiores impactos na estratégia de manufatura poderão ser tratados prioritariamente. Ainda, com o uso do modelo *delay time* em políticas de manutenção envolvendo as manufaturas de classe mundial, potenciais problemas ou quebras provocados por falhas poderão ser evitados, podendo gerar potenciais impactos financeiros devido à redução de custo. Por outro lado, este trabalho sugere potenciais impactos em termos sociais, uma vez que, com o uso do framework proposto, decisões relacionadas à segurança poderão ser tomadas de modo mais estruturado. Por consequência, o número de acidentes e incidentes envolvendo trabalhadores poderão reduzir de modo significativo.

Tendo em vista a literatura restrita em relação ao trabalho envolvendo o pilar de custo e segurança no WCM, este estudo contribui com a adição de novos conceitos e possibilitando melhorias no processo de gestão do Programa WCM, além de poder contribuir com uma proposta relevante de suporte à decisão.

6.1 LIMITAÇÕES E DIFICULDADES

Por meio do trabalho realizado foi possível constatar que existe um potencial limitante nas classes não prioritárias, como classe 2 e 1 após ser realizado o procedimento de classificação. Embora o método classifique as alternativas em quatro tipos de classes, algumas classes não prioritárias irão apresentar naturalmente um número elevado de alternativas, fazendo com que seja necessária a execução de uma segunda rodada do método com as alternativas restantes, isso após as tratativas serem realizadas nas classes 4 e 3.

Em relação ao tema Programa WCM, no início, uma das dificuldades iniciais foi encontrar embasamento científico em artigos ou revisões em inglês e revisado por pares relacionados ao Programa WCM e seus princípios. A maioria dos trabalhos voltados ao Programa WCM apenas o cita de modo genérico ou são trabalhos apresentados em anais de congresso. Acredita-se que, essa restrição ocorra porque a maior parte dos materiais técnicos relacionados ao Programa WCM é restrito as empresas que o praticam efetivamente. Por isso, inicialmente, inúmeras reuniões foram necessárias com o especialista da planta industrial estudada para que pudesse se compreender alguns pontos, bem como para esclarecer dúvidas relacionadas as lacunas encontradas.

Por isso, visando compreender ainda mais sobre o funcionamento do Programa WCM na prática, além de pesquisas na literatura e reuniões realizadas com especialistas em WCM, foi realizado a parte um treinamento presencial de 60 horas em uma empresa especializada nessa finalidade. Esse treinamento foi ministrado por um Engenheiro especialista em Programa WCM e que foi treinado pela Fiat na Itália, bem como por mais três Engenheiros especialistas em Programa WCM, sendo que um deles acompanhou a implantação do Programa WCM em uma planta industrial localizada no Nordeste do Brasil.

Algumas dificuldades também foram encontradas em relação ao tempo de coleta de dados reais. Embora o especialista estivesse sempre disposto em ajudar no fornecimento de novos dados, nem sempre isso era possível instantaneamente, uma vez que a rotina de trabalho em uma planta industrial nem sempre permite esse retorno no tempo almejado.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto a pesquisas futuras, ao longo da realização deste trabalho foi possível notar que existe uma série de outros trabalhos que podem ser desenvolvidos unindo manufatura de classe mundial e métodos de apoio à decisão multicritério.

Em relação ao pilar de custo e segurança, sugere-se que, após o uso desta estrutura, um método estruturado de apoio à decisão seja utilizado para priorização. Em outras palavras, após a definição das classes, em consonância com a contribuição deste trabalho, compreende-se que a criação de uma estrutura para indicar qual projeto dentro da classe mais crítica deve ser priorizado, já que em algumas empresas é dado somente atenção a um projeto por vez.

Além disso, recomenda-se que seja desenvolvido um sistema de apoio à decisão para sistematizar e automatizar os passos do framework proposto. Em outros termos, recomenda-se melhorar o processo de automatização para a aquisição de dados o processamento no contexto da Indústria 4.0. Desta forma, acredita-se que poderá ser possível considerar um nível maior de detalhes em termos de perdas para que posteriormente sejam realizadas avaliações com o especialista.

O uso de outros métodos de MCDM/A como PROMETHEE e Electre, por exemplo, também são recomendados considerando situações com outro tipo de racionalidade. O teste com outras escalas de variáveis linguísticas também é sugerido.

Em relação aos outros pilares do Programa WCM, esta estrutura pode ser adaptada e outros processos de classificação usando o FTOPSIS-Class podem ser desenvolvidos para que classificações sejam realizadas antes da realização de tratativas, seja no aspecto de

manutenção, meio ambiente e energia, gestão da qualidade, organização do ambiente de trabalho ou desenvolvimento de pessoas.

REFERÊNCIAS

ABDELGAWAD, M.; FAYEK, A. R. Risk Management in the Construction Industry Using Combined Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP. **Journal of Construction Engineering and Management**, set. 2010. v. 136, n. 9, p. 1028–1036.

AIKHUELE, D. O.; OLUWADARE, G. Hybrid fuzzy inference system for evaluating lean product development practice. **Evolving Systems**, 7 jun. 2019. v. 10, n. 2, p. 249–259.

AIRES, R. F. De F.; FERREIRA, L. A new approach to avoid rank reversal cases in the TOPSIS method. **Computers & Industrial Engineering**, jun. 2019. v. 132, n. February, p. 84–97.

ALMEIDA-FILHO, Adiel T. DE; ALMEIDA, Adiel T. DE; COSTA, Ana Paula C.S. A flexible elicitation procedure for additive model scale constants. **Annals of Operations Research**, 2017. v. 259, n. 1, p. 1–19.

ALMEIDA-FILHO, Adiel Teixeira De; LIMA SILVA, D. F. DE; FERREIRA, L. Financial modelling with multiple criteria decision making: A systematic literature review. **Journal of the Operational Research Society**, 22 jun. 2020. v. 0, n. 0, p. 1–19.

ALMEIDA, A. T. DE. **Processo de Decisão Nas Organizações - Construindo Modelos de Decisão Multicritério**. 1. ed. [S.l.]: Atlas, 2013.

_____. *et al.* **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. [S.l.]: [s.n.], 2015. V. 231.

ALMEIDA, Adiel Teixeira DE *et al.* **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. Internatio ed. Cham: Springer International Publishing, 2015. V. 231.

ALMEIDA, Adiel Teixeira DE *et al.* A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. **European Journal of Operational Research**, 2016. v. 250, n. 1, p. 179–191.

ALMEIDA, Adiel Teixeira DE *et al.* A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal of Management Mathematics**, 1 abr. 2017. v. 28, n. 2, p. 153–184.

ANSARI, A.; MODARRESS, B. World-class strategies for safety: a Boeing approach. **International Journal of Operations & Production Management**, abr. 1997. v. 17, n. 4, p. 389–398.

ARAÚJO, A. G.; PEREIRA CARNEIRO, A. M.; PALHA, R. P. Sustainable construction management: A systematic review of the literature with meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, maio. 2020. v. 256, p. 120350.

BAINES, T. S. *et al.* A consideration of modelling techniques that can be used to evaluate manufacturing strategies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, maio. 1998. v. 14, n. 5, p. 369–375.

BALI, O.; GUMUS, S.; KAYA, I. A Multi-Period Decision Making Procedure Based on Intuitionistic Fuzzy Sets for Selection Among Third-Party Logistics Providers. **Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing**, 2015. v. 24, n. 5–6, p. 547–569.

BEHZADIAN, M. *et al.* PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, jan. 2010. v. 200, n. 1, p. 198–215.

_____ *et al.* A state-of the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, 2012. v. 39, n. 17, p. 13051–13069.

BOWLES, J. B.; PELÁEZ, C. E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, 1995. v. 50, n. 2, p. 203–213.

BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; MONTANARI, R. R. Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, set. 2003. v. 19, n. 5, p. 425–443.

BRANS, J. P.; VINCKE, P. A Preference Ranking Organisation Method. **Management Science**, jun. 1985. v. 31, n. 6, p. 647–656.

CAMPOS, L. F. R. *et al.* Advances in Automation and Cost Reduction in Spark Plugs Pressing System. **Journal of Industrial Integration and Management**, 18 mar. 2017. v. 02, n. 01, p. 1750001.

CARPITELLA, S. *et al.* A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. **Reliability Engineering & System Safety**, jan. 2018. v. 169, n. September 2017, p. 394–402.

CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R. S.; SCARF, P.A. A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. **European Journal of Operational Research**, 1 maio. 2018. v. 266, n. 3, p. 911–919.

CEPIN, M.; BRIS, R. (Org.). **Safety and Reliability. Theory and Applications**. 27th Europ ed. Portorož, Slovenia: CRC Press, 2017.

CHANG, K.-H. A novel general risk assessment method using the soft TOPSIS approach. **Journal of Industrial and Production Engineering**, 18 ago. 2015. v. 32, n. 6, p. 408–421.

CHEN, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy Sets and Systems**, ago. 2000. v. 114, n. 1, p. 1–9.

CHEN, G.; PHAM, T. T. **Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems**. [S.l.]: [s.n.], 2000.

CHEN, S. H.; WANG, C.-C. Fuzzy Distance of Trapezoidal Fuzzy Numbers. **Proceedings of the 9th Joint Conference on Information Sciences (JCIS)**, 2006. n. 1, p. 4–7.

CHEN, T. Y. An interval type-2 fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solutions using a likelihood-based comparison approach for multiple criteria decision

analysis. **Computers and Industrial Engineering**, 2015. v. 85, p. 57–72.

CHIARINI, A.; VAGNONI, E. World-class manufacturing by Fiat. Comparison with Toyota Production System from a Strategic Management, Management Accounting, Operations Management and Performance Measurement dimension. Oxon, England: **International Journal of Production Research**, 2015. EuroMed Academy of Business Conference Book of Proceedings. v. 53, n. 2, p. 590–606.

CHRISTER, A. H. *Innovatory Decision Making*. (D. J. Bowen, K; White, Org.). [S.l.]: [s.n.], 1976.

CHRISTER, A. H.; REDMOND, D. F. Revising models of maintenance and inspection. **International Journal of Production Economics**, 1 mar. 1992. v. 24, n. 3, p. 227–234. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092552739290134S>>. Acesso em: 5 maio 2018.

CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. **Journal of the Operational Research Society**, 20 maio. 1984a. v. 35, n. 5, p. 401–406. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/jors.1984.80>>. Acesso em: 5 maio 2018.

_____; _____. An Operational Research Approach to Planned Maintenance: Modelling P.M. for a Vehicle Fleet. **Journal of the Operational Research Society**, 20 nov. 1984b. v. 35, n. 11, p. 967–984. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/jors.1984.193>>. Acesso em: 5 maio 2018.

CINELLI, M. *et al.* How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. **Omega**, out. 2020. v. 96, p. 102261.

CUA, K. O.; MCKONE, K. E.; SCHROEDER, R. G. Relationships between implementation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance. **Journal of Operations Management**, 2001. v. 19, n. 6, p. 675–694.

CWTS. Welcome to VOSviewer. **Centre for Science and Technology Studies**, 2020. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/>>. Acesso em: 9 set. 2020.

D’ORAZIO, L.; MESSINA, R.; SCHIRALDI, M. M. Industry 4.0 and World Class Manufacturing Integration: 100 Technologies for a WCM-I4.0 Matrix. **Applied Sciences**, 18 jul. 2020. v. 10, n. 14, p. 4942.

DANGAYACH, G. S.; DESHMUKH, S. G. Manufacturing strategy: Experiences from select indian organizations. **Journal of Manufacturing Systems**, jan. 2000. v. 19, n. 2, p. 134–148.

DIGALWAR, A. K. A. K.; JINDAL, Anil; SANGWAN, K. S. K. S. Modeling the performance measures of world class manufacturing using interpreting structural modeling. **Journal of Modelling in Management**, 2015. v. 10, n. 1, p. 4–22.

DIGALWAR, A.K.; JINDAL, A.; SANGWAN, K. S. Modeling the performance measures of world class manufacturing using interpreting structural modeling. **Journal of Modelling in Management**, 2015. v. 10, n. 1, p. 4–22.

DIGALWAR, Abhijeet K.; DATE, P. A. Development of fuzzy PROMETHEE algorithm for the evaluation of Indian world-class manufacturing organisations. **International Journal of Services and Operations Management**, 2016. v. 24, n. 3, p. 308.

DONG, C. Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2007. v. 24, n. 9, p. 958–971.

DUBEY, R.; GUNASEKARAN, A.; CHAKRABARTY, A. World-class sustainable manufacturing: Framework and a performance measurement system. **International Journal of Production Research**, 2 set. 2015. v. 53, n. 17, p. 5207–5223.

DUDEK, M. The model for the calculation of the dispersed iron ore resource purchase cost in the world class manufacturing (WCM) logistics pillar context. Zagreb, Croatia: **Metalurgija**, 2014. v. 53, n. 4, p. 567–570.

EDE, I. J. Van. Unilever's new and integrated program for World Class Manufacturing. **Business-improvement.eu**, 2015. Disponível em: <https://www.business-improvement.eu/worldclass/Unilever_World_Class_Manufacturing_Yamashima2.php>. Acesso em: 10 out. 2019.

ERKAYMAN, B.; GUNDOGAR, E.; YILMAZ, A. An Integrated Fuzzy Approach for Strategic Alliance Partner Selection in Third-Party Logistics. **Scientific World Journal**, 2012.

EROZAN, İ. A fuzzy decision support system for managing maintenance activities of critical components in manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, jul. 2019. v. 52, n. A, p. 110–120.

FEIGENBAUM, A. V. **Total Quality Control: Engineering and Management**. New York: McGraw-Hill Book Company, INC., 1961.

FELICE, F.; PETRILLO, A. Optimization of Manufacturing System through World Class Manufacturing. **IFAC-PapersOnLine**, 2015. v. 48, n. 3, p. 741–746.

FELICE, Fabio DE; PETRILLO, Antonella; MONFRE, S. Improving Operations Performance with World Class Manufacturing Technique: A Case in Automotive Industry. **Operations Management**, 13 mar. 2013.

FERNANDEZ, E. *et al.* Application of the non-outranked sorting genetic algorithm to public project portfolio selection. New York, NY: **Information Sciences**, abr. 2013. v. 228, p. 131–149.

FERREIRA, F. A. F. *et al.* A Judgment-Based Risk Assessment Framework for Consumer Loans. Singapore: **International Journal of Information Technology & Decision Making**, 29 jan. 2019. v. 18, n. 01, p. 7–33.

FERREIRA, L. *et al.* A fuzzy hybrid integrated framework for portfolio optimization in private banking. **Expert Systems with Applications**, fev. 2018. v. 92, p. 350–362.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHROGOTT, M. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of**

the Art Surveys. New York, NY: Springer New York, 2005. V. 78.

FINE, C.; HAX, A. **Manufacturing Strategy: A Methodology and an Illustration.** Massachusetts: Sloan School of Management M.I.T., 1985.

FLYNN, B. B.; FLYNN, E. J. Information-Processing Alternatives for Coping with Manufacturing Environment Complexity. **Decision Sciences**, set. 1999. v. 30, n. 4, p. 1021–1052.

FREITAS NETTO, S. V. DE *et al.* Concepts and forms of greenwashing: a systematic review. **Environmental Sciences Europe**, 11 dez. 2020. v. 32, n. 1, p. 19.

GAJDZIK, B. Autonomous and professional maintenance in metallurgical enterprise as activities within total productive maintenance. Zagreb, Croatia: **Metalurgija**, 2014. v. 53, n. 2, p. 269–272.

GARVIN, D. A. **Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva.** 3ª Edição ed. Rio de Janeiro, Brazil: Qualitymark. ISBN-10 : 8585360143, 2002.

GHALAYINI, A. M.; NOBLE, J. S. The changing basis of performance measurement. **International Journal of Operations and Production Management**, 1996. v. 16, n. 8, p. 63–80.

GILGEOUS, V.; GILGEOUS, M. A framework for manufacturing excellence. **Integrated Manufacturing Systems**, fev. 1999. v. 10, n. 1, p. 33–44.

_____; _____. A survey to assess the use of a framework for manufacturing excellence. **Integrated Manufacturing Systems**, fev. 2001. v. 12, n. 1, p. 48–58.

GIOVANDO, G.; CROVINI, C.; VENTURINI, S. Cost Deployment Implementation: A case study. (E. Vrontis, D and Weber, Y and Tsoukatos, Org.). [S.l.]: Euromed Press, 2017. p. 652–664. 10th Annual Conference of the EuroMed-Academy-of-Business, Rome, ITALY, SEP 13-15, 2017.

GOETSCHEL JR., R.; VOXMAN, W. Elementary Fuzzy Calculus. **Fuzzy Sets and Systems**, 1986. v. 18, p. 31–43.

GOING, C. B. **Principles of industrial engineering.** New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1911.

GROUP, F. WCM Timeline. 2019. Disponível em: <https://www.wcm.fcagroup.com/en-us/wcm_at_fca/Pages/wcm_timeline.aspx>. Acesso em: 10 out. 2019.

GUGALIYA, A.; BORAL, S.; NAIKAN, V. N. A. A hybrid decision making framework for modified failure mode effects and criticality analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2 set. 2019. v. 36, n. 8, p. 1266–1283.

GUPTA, P.; MEHLAWAT, M. K.; SAXENA, A. Asset portfolio optimization using fuzzy mathematical programming. **Information Sciences**, mar. 2008. v. 178, n. 6, p. 1734–1755.

HALEEM, A. *et al.* Analysis of critical success factors of world-class manufacturing

practices: an application of interpretative structural modelling and interpretative ranking process. **Production Planning & Control**, 16 out. 2012. v. 23, n. 10–11, p. 722–734.

HAYES, R. H.; WHEELWRIGHT, S. C. **Restoring Our Competitive Edge: Competing through Manufacturing**. New York, NY: Wiley, 1984.

HEVNER *et al.* Design Science in Information Systems Research. **MIS Quarterly**, 2004. v. 28, n. 1, p. 75.

HICKS, B. J.; MATTHEWS, J. The barriers to realising sustainable process improvement: A root cause analysis of paradigms for manufacturing systems improvement. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, jul. 2010. v. 23, n. 7, p. 585–602.

HILL, T. **Manufacturing Strategy: The Strategic Management of the Manufacturing Function**. Second edi ed. London: Macmillan Education UK. ISBN 978-1-349-22664-1 (eBook), 1993.

_____. **Manufacturing Strategy Text and Cases**. London: Macmillan Business, 1995.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. Tenth edit ed. New York, NY: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-352345-3, 2015.

HOLMSTRÖM, J.; KETOKIVI, M.; HAMERI, A.-P. Bridging Practice and Theory: A Design Science Approach. **Decision Sciences**, fev. 2009. v. 40, n. 1, p. 65–87.

HSU, W. H. Genetic wrappers for feature selection in decision tree induction and variable ordering in Bayesian network structure learning. **Information Sciences**, jun. 2004. v. 163, n. 1–3, p. 103–122.

HWANG, C.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State of the Art Survey**. [S.l.]: [s.n.], 1981. V. 1.

İÇEN, D.; CATTANEO, M. E. G. V. Different distance measures for fuzzy linear regression with Monte Carlo methods. **Soft Computing**, 2017. v. 21, n. 22, p. 6687–6697.

IJADI MAGHSOODI, A. *et al.* CLUS-MCDA: A novel framework based on cluster analysis and multiple criteria decision theory in a supplier selection problem. **Computers and Industrial Engineering**, 2018. v. 118, n. August 2017, p. 409–422.

ISMAIL SALAHELDIN, S.; EID, R. The implementation of world class manufacturing techniques in Egyptian manufacturing firms. **Industrial Management & Data Systems**, maio. 2007. v. 107, n. 4, p. 551–566.

JAYARAM, J.; VICKERY, S. K.; DROGE, C. An empirical study of time-based competition in the North American automotive supplier industry. **International Journal of Operations and Production Management**, 1999. v. 19, n. 10, p. 1010–1034.

JONES, B.; JENKINSON, I.; WANG, J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. **Reliability Engineering & System Safety**, 1 jan. 2009. v. 94, n. 1, p. 111–124.

KARA SLIMANE, F.; ALLAL, M. A. Attempt to compare risk analysis methods in a highway viaduct project of the penetrating Ghazaouet in Algeria. **Innovative Infrastructure Solutions**, 4 ago. 2020. v. 5, n. 2, p. 60.

KARWOWSKI, W.; SALVENDY, G. **Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries**. [S.l.]: CRC Press, 2010.

KAUFMANN, A.; GUPTA, M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. **Mathematics of Computation**, 1986. v. 47.

KEENEY, R.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. New York: John Wiley & Sons, 1976.

KHAN, Z.; BALI, R. K.; WICKRAMASINGHE, N. Developing a BPI framework and PAM for SMEs. **Industrial Management and Data Systems**, 2007. v. 107, n. 3, p. 345–360.

KILJAN, A. World class manufacturing as a new management method. **Selected Engineering Problems**, 2015. Disponível em: <<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-02ba846d-a42e-4435-aff5-75f1f5ea4738>>. Acesso em: 9 set. 2019.

KUMAR, Sameer; CHANDRA, C. Enhancing the effectiveness of benchmarking in manufacturing organizations. **Industrial Management & Data Systems**, mar. 2001. v. 101, n. 2, p. 80–89.

LACERDA, D. *et al.* Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gest. Prod.**, 2013. v. 20, n. 4, p. 741–761.

LAGACÉ, D.; BOURGAULT, M. Linking manufacturing improvement programs to the competitive priorities of Canadian SMEs. **Technovation**, 2003. v. 23, n. 8, p. 705–715.

LEE, K. H. **First Course on Fuzzy Theory and Applications**. [S.l.]: [s.n.], 2005. V. 27.

LEKURWALE, R. R.; AKARTE, M. M.; RAUT, D. N. Framework to evaluate manufacturing capability using analytical hierarchy process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 5 jan. 2015. v. 76, n. 1–4, p. 565–576.

LIMA JUNIOR, 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**, mar. 2015. v. 22, n. 1, p. 17–34.

LIMA SILVA, D. F. DE; ALMEIDA FILHO, A. T. DE. Sorting with TOPSIS through boundary and characteristic profiles. **Computers and Industrial Engineering**, 2020. v. 141, n. June 2019, p. 106328.

_____; FERREIRA, L.; ALMEIDA-FILHO, Adiel Teixeira DE. A new preference disaggregation TOPSIS approach applied to sort corporate bonds based on financial statements and expert's assessment. **Expert Systems with Applications**, ago. 2020. v. 152, p. 113369.

LIU, H. C.; YOU, J. X.; DUAN, C. Y. An integrated approach for failure mode and effect

analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. **International Journal of Production Economics**, 2019. v. 207, n. January 2016, p. 163–172.

LIU, Y. *et al.* Multiple Attribute Strategic Weight Manipulation With Minimum Cost in a Group Decision Making Context With Interval Attribute Weights Information. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, out. 2019. v. 49, n. 10, p. 1981–1992.

LOOTSMA, F. A. **Multi-Criteria Decision Analysis via Ratio and Difference Judgement**. ISBN 0-792 ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1999.

MAHMOUDI, M. *et al.* Dynamic prioritization of equipment and critical failure modes. **Kybernetes**, 7 out. 2019. v. 48, n. 9, p. 1913–1941.

MENDES, R. De C.; MATTOS, M. C. De. Knowledge Management and World Class Manufacturing: an initial approach based on a literature review. **Perspectivas em Ciência da Informação**, jun. 2017. v. 22, n. 2, p. 244–263.

MICHAUD, P. A. **Accident Prevention and OSHA Compliance**. Boca Raton, Florida: CRC Press - Taylor & Francis Group, 1995.

MILLER, J. G.; ROTH, A. V. A Taxonomy of Manufacturing Strategies. **Management Science**, 5 out. 1994. v. 40, n. 3, p. 285–304.

MINTZBERG, H.; WATERS, J. A. Tracking Strategy in an Entrepreneurial Firm. **Family Business Review**, 21 set. 1990. v. 3, n. 3, p. 285–315.

MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, 2010. v. 8, n. 5, p. 336–341.

MONDEN, Y. **Toyota Production System - An Integrated Approach to Just-in-Time**. Fourth Edi ed. New York, USA: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2012.

MRÓZ, A. About some aspects of advanced manufacturing engineering department in WCM-oriented production plants. **Management and Production Engineering Review**, 2018. v. 9, n. 4, p. 76–85.

MUDA, S.; HENDRY, L. Developing a new world class model for small and medium sized make-to-order companies. **International Journal of Production Economics**, ago. 2002. v. 78, n. 3, p. 295–310.

MZOUGUI, I.; ELFELSOUFI, Z. Improvement of Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis by Using Fault Tree Analysis and Analytical Hierarchy Process. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, 25 ago. 2019. v. 19, n. 4, p. 942–949.

NOVICKÁ, A.; PAPCUN, P.; ZOLOTOVÁ, I. Mapping of machine faults using tools of World Class Manufacturing. **SAMI 2016 - IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics - Proceedings**, 2016. p. 223–227.

OHNO, T. **Workplace Management**. 1. ed. Cambridge, Massachusetts - USA: Productivity Press, Inc., 1988.

OKHOVAT, M. A. *et al.* Development of world class manufacturing framework by using six-sigma, total productive maintenance and lean. **Scientific Research and Essays**, 2012. v. 7, n. 50, p. 4230–4241.

OLIVEIRA, P. S. G. De *et al.* PROPOSITION FACTOR MODEL OF WORLD CLASS MANUFACTURING IN BRAZILIAN ENTERPRISES. **Independent Journal of Management & Production**, jun. 2016. v. 7, n. 2, p. 488–502.

PARK, S. H.; DAHLGAARD-PARK, S. M.; KIM, D.-C. New Paradigm of Lean Six Sigma in the 4th Industrial Revolution Era. **Quality Innovation Prosperity**, 1 abr. 2020. v. 24, n. 1, p. 1.

PEFFERS, K. *et al.* A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**, 8 dez. 2007. v. 24, n. 3, p. 45–77.

PENG, J.-J.; WANG, J.-Q.; WU, X.-H. Novel Multi-criteria Decision-making Approaches Based on Hesitant Fuzzy Sets and Prospect Theory. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, 19 maio. 2016. v. 15, n. 03, p. 621–643.

PERÇIN, S.; KAHRAMAN, C. An Integrated Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Six Sigma Project. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, out. 2010. v. 3, n. 5, p. 610–621.

PETRILLO, Antonella *et al.* Performance measurement for world-class manufacturing: a model for the Italian automotive industry. **Total Quality Management & Business Excellence**, 19 maio. 2019. v. 30, n. 7–8, p. 908–935.

_____; FELICE, Fabio DE; ZOMPARELLI, F. Performance measurement for world-class manufacturing: a model for the Italian automotive industry. **Total Quality Management & Business Excellence**, maio. 2019. v. 30, n. 7–8, p. 908–935.

PHILLIP, M. **The Modern Theory of the Toyota Production System**. New York, NY: Productivity Press, 2012.

PLATTS, K. W.; GREGORY, M. J. Manufacturing Audit in the Process of Strategy Formulation. **International Journal of Operations & Production Management**, set. 1990. v. 10, n. 9, p. 5–26.

POURVAZIRY, Z. *et al.* Designing a Sustainable World Class Manufacturing Model in the Automotive Industry in Iran. **Tehnički glasnik**, 11 jun. 2020. v. 14, n. 2, p. 143–153.

PRETORIUS, M. W.; WET, G. DE. A model for the assessment of new technology for the manufacturing enterprise. **Technovation**, jan. 2000. v. 20, n. 1, p. 3–10.

READ, S. Aristotle and Łukasiewicz on Existential Import. **Journal of the American Philosophical Association**, 22 set. 2015. v. 1, n. 3, p. 535–544.

ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples. **Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle**, 29 mar. 1968. v. 2, n. 8, p. 57–75.

ROY, B. B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. [S.l.]: Kluwer Academic

Publishers, 1996.

RUDNIK, K.; KACPRZAK, D. Fuzzy TOPSIS method with ordered fuzzy numbers for flow control in a manufacturing system. **Applied Soft Computing**, mar. 2017. v. 52, p. 1020–1041.

S. MUTHU BASKARAN; A.R. LAKSHMANAN. A framework model for lean tools selection for improving material flow using fuzzy TOPSIS. **International Journal of Productivity and Quality Management**, 2019. v. 27, n. 2, p. 96–228.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, set. 1990. v. 48, n. 1, p. 9–26.

SABOKBAR, H. F. *et al.* **Applied Optimization**. [S.l.]: IEEE, 2006. V. 49.

SAMADI, H.; NAZARI-SHIRKOUHI, S.; KERAMATI, A. Identifying and Analyzing Risks and Responses for Risk Management in Information Technology Outsourcing Projects Under Fuzzy Environment. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, nov. 2014. v. 13, n. 6, p. 1283–1323.

SATOLO, E. G. *et al.* Ranking lean tools for world class reach through grey relational analysis. **Grey Systems: Theory and Application**, 8 out. 2018. v. 8, n. 4, p. 399–423.

SCHONBERGER, R. J. The Transfer of Japanese Manufacturing Management Approaches to U.S. Industry. **Academy of Management Review**, jul. 1982. v. 7, n. 3, p. 479–487.

_____. Just-in-Time Production Systems-Replacing Complexity with Simplicity in Manufacturing Management. **Industrial Engineering**, 1984. v. 16, n. 10, p. 52.

_____. **World Class Manufacturing - The lessons of simplicity applied**. New York, NY: Schonberger & Associates. ISBN 0-02-929270-0, 1986.

SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Manufacturing excellence through TPM implementation: a practical analysis. **Industrial Management & Data Systems**, fev. 2006. v. 106, n. 2, p. 256–280.

SHARMA, V.; GROVER, S.; SHARMA, S. K. An integrated AHP-GTA approach for measuring effectiveness of quality tools and techniques. **INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEM ASSURANCE ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 2 fev. 2020. v. 11, n. 1, p. 54–63.

SHIN, M. *et al.* A system dynamics approach for modeling construction workers' safety attitudes and behaviors. **Accident Analysis and Prevention**, 2014. v. 68, p. 95–105.

SIMON, A. H. **The Sciences of the Artificial**. 3rd ed. ed. Cambridge: Mit Press, 1996.

SKINNER, W. **Manufacturing - Missing Link in Corporate Strategy**. [S.l.]: Harvard Business Review, 1969.

SLACK, N. **Vantagem competitiva em manufatura**. [S.l.]: Atlas. ISBN 8522409811, 1993.

_____. Operations Strategy. **Wiley Encyclopedia of Management**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, p. 1–2.

_____; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. Fifth edit ed. London: FT Prentice Hall - Pearson Education. ISBN: 978-0-273-70847-6, 2007.

_____; _____. **Administração da Produção**. 3. ed. [S.l.]: Atlas, 2009.

_____; LEWIS, M. **Operations strategy**. Fifth edit ed. Harlow, England: Pearson Mission. ISBN 9781292162515 (PDF), 2017.

SMITH, S. L. How a Baldrige winner manages safety. **Occupational Hazards**, 1995. v. 63, n. 2, p. 33–50.

SOUZA, N. M. De; ALMEIDA FILHO, A. T. De. A systematic airport runway maintenance and inspection policy based on a delay time modeling approach. **Automation in Construction**, fev. 2020. v. 110, n. October 2019, p. 103039.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. Second ed. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality - ASQ Press. ISBN 0-87389-598-3, 2003.

STEWART, J. M. **Managing for world class safety**. New York, NY: John Wiley & Sons, INC, 2002.

STRANKS, J. **Health and Safety at Work: Key Terms**. First ed. London: Oxford, 2002. V. 1.

SUGIMORI, Y. *et al.* Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system. **International Journal of Production Research**, 1 jan. 1977. v. 15, n. 6, p. 553–564.

SUKARMA, L.; AZMI, H.; ABDULLAH, N. L. The Impact of World Class Manufacturing Practices on Company Performance: A Critical Review. **Applied Mechanics and Materials**, jun. 2014. v. 564, n. April, p. 727–732.

SWAMIDASS, P. M.; NEWELL, W. T. **Manufacturing Strategy, Environmental and Uncertainty and Performance: A Path Analytic Model**. [S.l.]: [s.n.], 1987.

TADIĆ, D. *et al.* Evaluation and Ranking of Organizational Resilience Factors by Using a Two-Step Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014. v. 2014, p. 1–13.

TAIICHI OHNO. **Toyota Production System: Beyond Large Scale Production**. New York, NY: Productivity Press, 1988.

TAKAHIRO FUJIMOTO. **The Evolution of a Manufacturing System at Toyota**. New York, NY: Oxford University Press, 1999.

TALEBI, D. *et al.* The Role of Quality Benchmarking Deployment to World-Class Manufacturing. **QUALITY ENGINEERING**, 3 abr. 2014. v. 26, n. 2, p. 206–214.

TODOROVIĆ, P. M. *et al.* An implementation of infrared thermography in maintenance plans within a world class manufacturing strategy. **Thermal Science**, 2013. v. 17, n. 4, p. 977–987.

TONI, A. DE; TONCHIA, S. New production models: A strategic view. **International Journal of Production Research**, jan. 2002. v. 40, n. 18, p. 4721–4741.

VAHDANI, B.; ZANDIEH, M. Selecting suppliers using a new fuzzy multiple criteria decision model: the fuzzy balancing and ranking method. **International Journal of Production Research**, 15 set. 2010. v. 48, n. 18, p. 5307–5326.

VIVARES, J. A.; SARACHE, W.; HURTADO, J. E. A maturity assessment model for manufacturing systems. W Yorkshire, England: **Journal of Manufacturing Technology Management**, 13 ago. 2018. v. 29, n. 5, p. 746–767.

VUKADINOVIC, S. *et al.* Early management of human factors in lean industrial systems. **Safety Science**, 2019. v. 119, p. 392–398.

VUKADINOVIC, Saveta *et al.* Early management of human factors in lean industrial systems. **Safety Science**, nov. 2019. v. 119, n. June 2017, p. 392–398.

WANG, W. A model of multiple nested inspections at different intervals. **Computers & Operations Research**, 1 maio. 2000. v. 27, n. 6, p. 539–558.

WANG, Wenbin. An inspection model based on a three-stage failure process. **Reliability Engineering & System Safety**, 1 jul. 2011. v. 96, n. 7, p. 838–848.

_____. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. **Reliability Engineering & System Safety**, 1 out. 2012. v. 106, p. 165–178. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832012000701>>. Acesso em: 5 maio 2018.

_____; WANG, H. Preventive replacement for systems with condition monitoring and additional manual inspections. **European Journal of Operational Research**, 1 dez. 2015. v. 247, n. 2, p. 459–471. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715005494>>. Acesso em: 8 maio 2018.

WASHINGTON, D. Of Defense. Military Standard. **Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis**, 1980. Disponível em: <http://www.barringer1.com/mil_files/MIL-STD-1629RevA.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2019.

WILLMOTT, P.; MCCARTHY, D. **TPM - A route to World-Class Performance**. 1. ed. Jordan Hill, Oxford: Butterworth Heinemann, 2001.

WITTENBERG, G. Kaizen—The many ways of getting better. **Assembly Automation**, dez. 1994. v. 14, n. 4, p. 12–17.

YAMASHINA, H. Challenge to world-class manufacturing. **International Journal of Quality & Reliability Management**, mar. 2000. v. 17, n. 2, p. 132–143.

_____. World Class Manufacturing. **ApexBio**, 2010. Disponível em: <<https://wenku.baidu.com/view/07c001d2240c844769eaea2.html>>. Acesso em: 10 out. 2019.

_____; KUBO, T. Manufacturing cost deployment. **International Journal of Production Research**, 14 jan. 2002. v. 40, n. 16, p. 4077–4091.

YAMASHINA, Hajime. Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, mar. 1995. v. 1, n. 1, p. 27–38.

YOUSSEF, M. A.; YOUSSEF, E. M. The synergistic impact of ISO 9000 and TQM on operational performance and competitiveness. **INTERNATIONAL JOURNAL OF QUALITY & RELIABILITY MANAGEMENT**, 5 mar. 2018. v. 35, n. 3, p. 614–634.

ZADEH, L. A. Fuzzy logic Computation with word.pdf. **Ieee Transactions on Fuzzy Systems**, 1996. v. 4, n. 2, p. 103–111.

ZAHEDI-HOSSEINI, F.; SYNTETOS, A. A.; SCARF, Philip A. Optimisation of inspection policy for multi-line production systems. WORLD TRADE CENTER BLDG, 29 ROUTE DE PRE-BOIS, CASE POSTALE 856, CH-1215 GENEVA, SWITZERLAND: **EUROPEAN JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING**, 2018. v. 12, n. 2, p. 233–251.

ZELNY, M. **Multiple Criteria Decision Making**. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1982.

ZIMMERMANN, H.-J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. **Fuzzy Sets and Systems**, jan. 1978. v. 1, n. 1, p. 45–55.

APÊNDICE A – COEFICIENTES DE PROXIMIDADE

Coeficientes de proximidade das análises de sensibilidade:

Tabela 22: Coeficiente de proximidade – Análise de sensibilidade 1

	P1	P2	P3	P4
A1	0,64983301	0,68561213	0,37287685	0,37287685
A2	0,45823925	0,53129840	0,57013967	0,57177183
A3	0,62246644	0,64722154	0,40118635	0,40103081
A4	0,73820255	0,71503199	0,27823815	0,27823383
A5	0,69960105	0,67764795	0,31925333	0,31925333
A6	0,68077753	0,73729896	0,34101547	0,34086570
A7	0,66100086	0,64027614	0,36025696	0,36011716
A8	0,90163047	0,83398526	0,10489254	0,10491278
A9	0,84822675	0,78299259	0,16216174	0,16216174
A10	0,52874038	0,57473998	0,49951104	0,49951104
A11	0,60298262	0,60307108	0,41955535	0,42101477
A12	0,94862543	0,81356035	0,05453952	0,05453952
A13	0,63994627	0,59572589	0,38169988	0,38169988
A14	0,69174519	0,69185519	0,32855483	0,32855483
A15	0,86123255	0,83398526	0,14755808	0,14753096
A16	0,84658507	0,85197179	0,16342633	0,16342633
A17	0,64027183	0,64405203	0,38147990	0,38147990
A18	0,60268446	0,60277295	0,42119512	0,42119512
A19	0,72098142	0,69993530	0,29519995	0,29520419
A20	0,49226907	0,56369630	0,53437118	0,53590347
A21	0,71979058	0,78729795	0,29838570	0,29832955
A22	0,74624148	0,64623084	0,26838878	0,26838878
A23	0,49263359	0,52594011	0,53396520	0,53396520
A24	0,63995372	0,64004776	0,38170482	0,38184790

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Tabela 23: Coeficiente de proximidade – Análise de sensibilidade 2

	P1	P2	P3	P4
A1	0,68720285	0,72061650	0,51411351	0,31279715
A2	0,46685193	0,54917086	0,71720451	0,53314807
A3	0,68761006	0,72070308	0,50652337	0,31238994
A4	0,80162844	0,81587525	0,38913740	0,19837156
A5	0,76703123	0,78065975	0,42484962	0,23296877
A6	0,69505123	0,79044438	0,50980141	0,30494877
A7	0,73239622	0,74539923	0,46050226	0,26760378
A8	0,86984181	0,87346590	0,32780321	0,13015819
A9	0,85498196	0,85866802	0,34848065	0,14501804
A10	0,55950894	0,63709919	0,63027602	0,44049106

A11	0,64838822	0,71458424	0,53530978	0,35161178
A12	0,96133570	0,84044245	0,23107023	0,03866430
A13	0,69353787	0,69654340	0,48902470	0,30646213
A14	0,73179890	0,80670696	0,46388670	0,26820110
A15	0,85881858	0,87346590	0,33644051	0,14118142
A16	0,80538106	0,83231871	0,38948047	0,19461894
A17	0,67409566	0,69785553	0,50888082	0,32590434
A18	0,64814516	0,71437525	0,53729255	0,35185484
A19	0,78819003	0,80219763	0,38625627	0,21180997
A20	0,50961121	0,59931696	0,67158341	0,49038879
A21	0,73596756	0,83702936	0,45619532	0,26403244
A22	0,82582296	0,72436431	0,34933238	0,17417704
A23	0,52013482	0,59168298	0,66005386	0,47986518
A24	0,68314037	0,75300594	0,50019092	0,31685963

Fonte: Esta pesquisa (2020).

Fonte: Esta pesquisa (2020).

*Pesquisa baseada na coleta de dados do caso estudado.