UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Jorge Nagib Saba

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO ELECTRE III PARA ORDENAÇÃO DOS MODOS DE
FALHA SEGUNDO OS CRITÉRIOS DA FMEA

SÃO CARLOS

2020

Jorge Nagib Saba

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO ELECTRE III PARA ORDENAÇÃO DOS MODOS DE
FALHA SEGUNDO OS CRITÉRIOS DA FMEA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Processos e Gestão de
Operações

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cesar Ribeiro
Carpinetti

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO DA EESC-USP

SÃO CARLOS

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues

S Saba, Jorge Nagib
PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO ELECTRE III PARA
ORDENAÇÃO DOS MODOS DE FALHA SEGUNDO OS CRITÉRIOS DA
FMEA / Jorge Nagib Saba; orientador Luiz César Ribeiro
Carpinetti. São Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de

1. FMEA. 2. RPN. 3. Risk Priority Number. 4.
Ordenação . 5. ELECTRE III. I. Título.

Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JORGE NAGIB SABA**.

Título da dissertação: "Proposta de aplicação do Electre III para ordenação dos modos de falha segundo os critérios da FMEA".

Data da defesa: 01/12/2020

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular **Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti**

APROVADO

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Prof. Associado **André Lucirton Costa**

APROVADO

(Faculdade de Economia e Administração - RP/FEARP - USP)

Prof. Dr. **Pedro Carlos Oprime**

APROVADO

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

Profa. Dra. **Janaina Mascarenhas Hornos da Costa**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

RESUMO

SABA, Jorge Nagib. **Proposta de aplicação do Electre III para ordenação dos modos de falha segundo os critérios da FMEA**. 2019. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis (Análise dos Modos de Falha e de seus Efeitos) é largamente empregada dentro de sistemas de administração da Qualidade, no desenvolvimento e na atualização de produtos, processos e serviços e reconhecida como uma técnica adequada para a identificação de potenciais Modos de Falha (FM – Failure Mode) e de seus efeitos. Cada FM identificado é avaliado sob três critérios: Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), em escalas que associam expressões verbais a valores escalares de 1 a 10. No cálculo tradicional os valores de O, S e D são multiplicados dando origem ao RPN – Risk Priority Number, que é entendido como sendo a criticidade dos FM avaliados. Os FM são ordenados a partir de seu RPN: quanto maior o RPN de um dado FM, maior sua criticidade e vice-versa. Uma dificuldade recorrente no processo de ordenação surge quando se identificam diversos grupos de FM aos quais o mesmo valor de RPN está associado. Evitando incorrer nos problemas e dificuldades de ordenação dos FM originados do cálculo tradicional, este trabalho propõe uma alternativa de aprimoramento da ordenação com o emprego do método ELECTRE III, destinando-se àqueles que rotineiramente realizam processos FMEA e buscam a uma maneira robusta e confiável para a ordenação dos modos de falha. São aqui apresentadas a FMEA, o método ELECTRE III e a metodologia proposta, incluindo um estudo comparativo sobre um caso de FMEA realizado para um equipamento mecânico, onde são calculados os RPN segundo a formulação tradicional e comparados com os resultados obtidos pela presente proposta. Limitações e lacunas para pesquisa são apresentadas e discutidas. Os resultados apresentaram ordenações do Electre III compatíveis com as expectativas e com a ordenação tradicional FMEA, apesar da existência de grupos de modos de falha empatados na mesma posição. Os peritos, que participaram do trabalho, aceitaram os resultados. Foram elencados fatores que concorreram para com o aprimoramento da FMEA.

Palavras-chave: FMEA. RPN. Risk Priority Number. Ordenação. ELECTRE III.

ABSTRACT

SABA, Jorge Nagib. **Proposal of application of Electre III for ordering failure modes according to FMEA criteria.** 2019. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

FMEA – Failure Mode and Effects Analysis is a technique widely employed by Quality Administration systems in the development and modernization of products or services. It is acknowledged as being able to identify potential failure modes (FM) and their effects upon components or systems to which they are related. For every identified FM, a team of specialists performing a FMEA evaluates three factors: Severity (S), Occurrence (O) and Detection (D), which are measured on a scale varying from 1 to 10. According to the traditional method, O, S and D are multiplied, thus generating the RPN – Risk Priority Number, which is understood as the criticality of the evaluated FM. The FMs are ranked based on their RPN, so that the higher the RPN of a given FM, the higher its criticality – and vice versa. A recurrent difficulty in the ranking process emerges when several FM featuring the same RPN value arise. In an attempt to avoid the problems and difficulties caused by the traditional computation method, the present study proposes an alternative to enhancing the ranking process by using a technique for decision support called ELECTRE III, which aims at those who perform FMEA processes on a regular basis and seek a robust and reliable tool with which to rank FMs. In this paper, FMEA, the ELECTRE III Technique and the proposed methodology are presented, including a comparative study of an FMEA process being applied to a mechanical equipment, where RPNs were calculated according to the traditional method and compared to the results yielded by the application of the presented proposition. Limitations and research opportunities are presented and discussed. The rankings produced by Electre III were compatible with the expectation, although some FM were indeed in the same position. The participating Experts gladly took them in. Factors which contributed to the enhancement of FMEA were brought to light.

Keywords: FMEA. RPN. Risk Priority Number. Ranking. ELECTRE III.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES – FIGURAS – QUADROS – TABELAS

PARTE 1

Figura 1.1 – Ilustração das fases do projeto de pesquisa

PARTE 2

Figura 2.1 – Representação esquemática da FMEA (Adaptado de PALADY, 2007)

Figura 2.2 – Diagrama de áreas como subsídio para a priorização

Gráfico 2.1 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na base *Scopus*

Gráfico 2.2 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na base *Web of Science*

Gráfico 2.3 – Documentos sobre a FMEA por ramo da ciência na ciência na base *Scopus*

Gráfico 2.4 – Documentos sobre FMEA por ramo da ciência na base *Web of Science*

Gráfico 2.5 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na área Engenharia – Base *Scopus*

Gráfico 2.6 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na área Engenharia – Base *Web of Science*

Quadro 2.1 – FMEA e seus elementos

Quadro 2.2 – Características e Vantagens dos Processos FMEA

Quadro 2.3 – Objeções levantadas contra o cálculo tradicional do FMEA

Quadro 2.4 – Expressões e valores para a Severidade

Quadro 2.5 – Expressões e Valores para a Ocorrência

Quadro 2.6 – Expressões e valores para a Detecção

Quadro 2.7 – Resumo dos artigos baseados em técnicas de suporte à decisão

Quadro 2.8 – Artigos visando à ordenação através de aplicações específicas

Quadro 2.9 – Artigos envolvendo abordagens diversas, não classificadas nos dois grupos anteriores

Tabela 2.1 – Problemas mencionados sobre análise de risco na revisão de literatura

PARTE 3

Quadro 3.1 – Fluxograma do ELECTRE III

Quadro 3.2 – Normalização dos pesos

PARTE 4

Figura 4.1 – Fluxograma da FMEA

Figura 4.2 – Foto de uma típica máquina Router

Figura 4.3 – máquina “Router” de nove cabeçotes sobre a qual se aplicou o trabalho de campo.

Figura 4.4 – Exemplos de carretéis produzidos a partir dos discos de MDF

Figura 4.5 – Exemplo de operação de controle dimensional sobre o carretel

Figura 4.6 – Ilustração: deformação do pórtico no plano y-z

Figura 4.7 - Ilustração: deformação do pórtico no plano x-z

Quadro 4.1 – Protocolo da pesquisa de campo

Quadro 4.2 – Descrição dos modos de falha identificados para estudo

Quadro 4.3 – Escala para Ocorrência

Quadro 4.4 – Escala para Severidade

Quadro 4.5 – Escala de valores para Detecção

Quadro 4.6 – Julgamentos do Expert 1 – após nivelamento

Quadro 4.7 – Julgamentos do “Expert” 2 após nivelamento

Quadro 4.8 – Agregação “pessimista”

Quadro 4.9 - Modos de falha considerados, julgamentos e RPN

Quadro 4.10 – Quadro de julgamentos pela média aritmética

Quadro 4.11 – Ordenação segundo FMEA, julgamentos pela média aritmética

Quadro 4.12 – Ordenação segundo FMEA, julgamentos “pessimistas”

Quadro 4.13 – Tabela “ideal” com julgamentos pré-ordenados em números decimais

Quadro 4.14 – Tabela “ideal” com julgamentos pré-ordenados - números inteiros

Quadro 4.15 – Ordenação por ELECTRE III a partir dos julgamentos pré-ordenados (constantes do Quadro 4. 13 e do Quadro 4.14)

Quadro 4.16 – Ordenação Electre III a partir dos julgamentos pela média aritmética

Quadro 4.17 – Ordenação Electre III a partir dos julgamentos “pessimistas”

Quadro 4.18 – Ordenação com pesos $w = 0,80; 0,10; 0,10$

Quadro 4.19 – Ordenação com pesos $w = 0,10; 0,80; 0,10$

Quadro 4.20 – Ordenação com pesos $w = 0,10; 0,10; 0,80$

Quadro 4.21 - Ordenação Electre III com pesos $w = 0,80; 0,10; 0,10$

Quadro 4.22 – Ordenação Electre III com pesos $w = 0,10; 0,80; 0,10$

Quadro 4.23 – Ordenação Electre III com pesos $w = 0,1; 0,10; 0,80$

Quadro 4.24 – Ordenações Electre III c/ pesos iguais, pesos aplicados nos julgamentos pela média ponderada.

Quadro 4.25 – Resumo das ordenações FMEA e Electre III

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

AI – Artificial Intelligence

ANP – *Analytic Network Process*

DEA – *Data Envelopment Process*

DEMATEL – *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Model*

DFMEA – *Design Failure Mode and Effect Analysis*

EFMEA – *Expanded FMEA*

ELECTRE – *Elimination Et Choix Traduisant la Realité*

EWGM – *Exponential and Weighted Geometric Mean Method*

FDSS – *Fuzzy Decision Support System*

FFMEA – *Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis*

FIT – *Fault Insertion Testing*

FM – *Failure Mode*

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*

FMECA – *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*

FOWA – *Fuzzy Ordered Weighted Averaging*

GDM – *Group Decision Making*

GDSS – *Group Decision Support System*

GRA-TOPSIS – *Grey relational analysis-TOPSIS*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

LEAN – *Lean Manufacturing*

MCDM – *Multicriteria Decision Making Method*

MdF – *Modo de Falha*

OWA – *Ordered Weighted Averaging*

OWGA – *Ordered Weighted Geometric Averaging*

PFMEA – *Process Failure Mode and Effect Analysis*

PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*

QFD – *Quality Function Deployment*

RPN – *Risk Priority Number*

SFMEA – *Service Failure Mode and Effect Analysis*

TOPSIS – *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Apresentação do problema	21
1.2 Objetivos	23
1.3 Justificativa	23
1.4 Metodologia	26
1.5 Estruturação do trabalho	27
2. FMEA: HISTÓRICO E FUNDAMENTOS	29
2.1 Introdução	29
2.2 Principais objeções à ordenação do cálculo tradicional da FMEA	36
2.3 O problema da ordenação dos modos de falha na FMEA	39
2.3.1 <i>Conceitos e histórico</i>	39
2.3.2 <i>Pesquisa bibliográfica: apresentação e comentários</i>	43
3. TÉCNICAS ELECTRE: APRESENTAÇÃO, PRINCÍPIOS E APLICAÇÃO	57
3.1 Electre III: conceitos	57
3.2 A construção das relações de sobreclassificação	58
3.2.1 <i>Índice de concordância</i>	59
3.2.2 <i>Índice de discordância</i>	59
3.2.3 <i>Índice de credibilidade</i>	59
3.3 Ordenação	60
3.3.1 <i>Tratamento dos pesos (w)</i>	60
3.3.2 <i>Nível de corte (λ)</i>	61
3.3.3 <i>Ordenação descendente ou otimista</i>	61
3.3.4 <i>Ordenação ascendente ou pessimista</i>	62
3.3.5 <i>Ordenação final</i>	62

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO ELECTRE III À FMEA	65
4.1 Contextualização	65
4.2 Realização da FMEA segundo cálculo tradicional	66
4.2.1 Apresentação sobre máquinas Router	67
4.2.1.1 Apresentação de uma máquina “Router” de construção usual	67
4.2.1.2 Apresentação da máquina “Router” sobre a qual se realizou a pesquisa de campo	70
4.2.2 Composição do Time de “Experts”	71
4.2.3 Processo de determinação dos Modos de Falha (MFs)	72
4.2.3.1 Modos de Falha ligadas ao dimensionamento e à fabricação da máquina	73
4.2.4 Modos de falha considerados	75
4.2.6 Atribuição de julgamentos O, S e D aos MFs pelos “Experts”	77
4.2.7 Análise e agregação dos julgamentos	79
4.2.7.1 Agregação “pessimista”	79
4.2.7.2 Agregação pela média aritmética dos valores dos julgamentos	81
4.3 Aplicação do Electre III para a ordenação dos modos de falha	83
4.3.1 Definições para a aplicação	83
4.3.1.1 Construção dos pseudo-critérios	83
4.3.2 Teste de sensibilidade – Passo 1: primeira parte com julgamentos ideais pré-ordenados	85
4.3.3 Teste de sensibilidade – Passo 2: verificação sobre λ	86
4.3.4 Observações sobre o valor de λ	87
4.3.5 Ordenação dos modos de falha originados da FMEA	87
4.3.5.1 Teste de sensibilidade das Ordenações com variação dos valores dos pesos (w)	88
4.3.5.2 Ordenação com pesos w = 0,80; 0,10; 0,10	88
4.3.5.3 Ordenação com pesos w= 0,10; 0,80; 0,10	88
4.3.5.4 Ordenação com pesos w= 0,10; 0,10; 0,80	89

4.3.5.5 Ordenação a partir da tabela de julgamentos “pessimistas”	89
4.4. Análises	91
4.4.1 <i>Análise dos resultados da ordenação com a aplicação do Electre III no estudo de caso e confronto com os resultados de ordenação produzidos pela FMEA (objetivo específico “c”)</i>	91
4.4.2 <i>Verificação da coerência entre o título da dissertação, a pergunta de pesquisa e a pesquisa de campo</i>	95
4.4.3 <i>Apreciação sobre o atingimento do objetivo geral e dos objetivos específicos</i>	95
4.4.4 <i>Análise da aplicação do método Electre III e discussão sobre a eliminação de objeções sobre o cálculo tradicional da FMEA e a preservação de suas vantagens</i>	96
5. CONCLUSÃO	101
BIBLIOGRAFIA	105

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

A necessidade de implantação de um robusto sistema de administração da Qualidade adquiriu importância já há algumas décadas, que se caracterizam por um ambiente fortemente competitivo, onde, como consequência da globalização, uma quantidade crescente de competidores deve ser considerada. A falta de tal sistema de administração da Qualidade pode reduzir o “*market share*” ou afetar drasticamente a lucratividade daqueles ofertantes que não se destacam em seu setor. Desta situação decorre que caberá a cada um dos competidores a busca e o atingimento de altos níveis de Qualidade – aqui entendidos como sendo o principal critério para se obter a preferência dos consumidores. A administração da Qualidade passou a ser compreendida como uma estratégia competitiva para a conquista dos objetivos empresariais (CARPINETTI; GEROLAMO, 2015).

Dentro deste contexto, destaca-se a *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) que, por requerer a avaliação e o estudo dos potenciais modos de falha com base em sua ocorrência (O) – ou mais precisamente, da frequência de sua ocorrência, de sua severidade (“S”) e da dificuldade de sua detecção (“D”), consiste em uma ferramenta para o estudo detalhado e robusto das falhas e dos modos de falha (PALADY, 2007).

O objetivo primordial dos usuários ao utilizar a FMEA para fins de desenvolvimento ou na fase de revisão (ou atualização) de um produto é identificar modos de falha e ordená-los a partir de sua importância ou criticidade. A necessidade dessa ordenação é explicada pela compreensível limitação de recursos, tais como equipe, recursos financeiros e sobretudo a exiguidade do tempo disponível para o tratamento e para a mitigação ou eliminação dos modos de falha. Para esse fim, calcula-se o *Risk Priority Number* (RPN), obtido pelo produto dos fatores $O \times S \times D$. Na formulação tradicional, são atribuídos valores de 1 (um) a 10 (dez) para cada um dos fatores analisados, especificamente, O, S e D, sendo obtíveis valores de 1 (um) a 1000 (mil) para o seu produto e, portanto, para o RPN.

Vale ainda considerar que a FMEA integra, na prática e cada vez mais, um processo de tomada de decisão por meio da equipe de técnicos, de especialistas e de gestores que a realiza. Nesse processo, são agregados os julgamentos e as opiniões dessa equipe quando da atribuição dos valores de O, S e D para o cálculo do RPN. É importante ressaltar que, apesar de sua importância, a técnica, segundo diversos autores, carece de robustez, por se basear apenas na

simples multiplicação dos fatores O, S e D, sem conferir, por exemplo, pesos para esses fatores, analisar as interrelações entre eles, ou levar em consideração outros fatores, tais como custo do reparo dos danos causados pelo modo de falha, tempo durante o qual o equipamento deve ficar fora de operação para reparo, entre outros.

Para a obtenção dos resultados procurados pela FMEA, além de sua interpretação e cálculo tradicional, métodos de decisão multicritério (métodos MCDM – *Multi-Criteria Decision Making Methods*) podem ser utilizados (LIMA JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013). Em que pesem as diversas vantagens trazidas pela FMEA, como, por exemplo, a eliminação de problemas potenciais antes que eles apareçam em um protótipo, no processo de produção ou em operação (PALADY, 2007), diversos autores apontam a existência de deficiências no processo tradicional, destacando-se: a obtenção de diversos modos de falha com o mesmo valor de criticidade (ou de RPN), o que tornaria complicada a ordenação (WANG et al. (2009b); CHIN et al. (2009a, 2009b); LIU et al. (2011, 2012); GARGAMA, CHATURVEDI (2011); KUTLU; EKMEKÇIOĞLU (2012) *apud* LIU, LIU, NAN, 2013); a atribuição da mesma importância aos fatores O, S e D com vistas à ordenação, o que poderia ser visto como discutível (WANG et al. (2009b); CHIN et al. (2009a, 2009b); LIU et al. (2011, 2012); GARGAMA, CHATURVEDI (2011); KUTLU; EKMEKÇIOĞLU (2012); ZHANG, CHU (2011) *apud* LIU, LIU, NAN, 2013); a desconsideração do custo acarretado pelos modos de falha na fase da ordenação ou do cálculo do RPN (BRAGLIA, 2000); a validade da fórmula tradicional em que o RPN é o produto de $O \times S \times D$ (ANTONELLA et al., 2017; CHIN et al. (2009a, 2009b); LIU et al. (2011, 2012); GARGAMA, CHATURVEDI (2011); KUTLU; EKMEKÇIOĞLU (2012); BRAGLIA et al. (2003a, 2003b) *apud* LIU, LIU, NAN, 2013); subjetividade na avaliação do risco, admitindo a existência de definições ambíguas neste aspecto (SPREAFICO et al., 2017); fraca medição do risco por haver falta de critérios específicos para a medição e quantificação dos riscos (por exemplo: critérios econômicos) (SPREAFICO et al., 2017); e, falta de confiabilidade nos resultados, dado que eles não são consistentes para tomada de decisão e para a solução de problemas (SPREAFICO; RUSSO; RIZZI, 2017).

Esse é, em resumo, o contexto que sugere a necessidade de um cálculo do RPN alternativo e mais robusto com vistas à ordenação dos modos de falha. Nesse sentido, a presente pesquisa propõe o uso da técnica ELECTRE III para tornar o processo FMEA mais robusto e menos sujeito às deficiências apontadas pelos estudiosos do assunto.

1.2 Objetivos

O presente trabalho objetiva aplicar o método ELECTRE III à ordenação de modos de falha, de acordo com os critérios severidade, ocorrência e detecção da FMEA e comparar os resultados com aqueles obtidos aplicando a técnica convencional.

Os objetivos específicos consistem em:

- a) Levantamento bibliográfico de publicações sobre o tema FMEA para a identificação de trabalhos a respeito de novas formas de ordenação dos modos de falha e de sua apresentação;
- b) Apresentar, explicar e fundamentar a aplicação do ELECTRE III na ordenação dos modos de falhas, de maneira que possa ser compreendida e adotada pelas equipes normalmente responsáveis pela realização de FMEAs;
- c) Realizar uma aplicação do método tradicional e do método proposto para um componente mecânico de um equipamento produzido em série, com uma discussão dos resultados alcançados.

1.3 Justificativa

A importância dos processos FMEA foi fortemente percebida a partir de 1967, quando se ampliou sua aplicação, com significativo crescimento a partir dos anos noventa. Por exemplo, a partir da aplicação pioneira pela Ford, inicialmente para verificação da segurança de seus veículos, a indústria automotiva, aeronáutica, linha branca, entre outras, passaram a usar a FMEA com regularidade. A norma TS16949 tornou obrigatória a aplicação da FMEA. E, em que pesem diversos esforços da academia e da indústria para robustecer sua aplicação, frequentemente são encontradas críticas a deficiências do processo tradicional, sobretudo no que diz respeito à ordenação dos modos de falha.

Embora esse trabalho pretenda restringir a aplicação de FMEA à Engenharia, vale mencionar, para fins de registro, que muitos estudiosos de diversos outros ramos da ciência, tais como Ciência da Computação, de Materiais, Matemáticas, Contabilidade e Administração de Negócios, Ciências Médicas e Biológicas dentre outras, realizaram estudos baseados tanto na aplicação tradicional da FMEA quanto em aplicações específicas para suas respectivas ciências. A vasta maioria dos trabalhos, todavia, foi concentrada na pura aplicação da FMEA.

Apenas uma relativamente pequena parte deles dedicou-se a estudar como o processo de ordenação dos modos de falha pode ser reforçado ou melhorado. Para esse fim, foram utilizadas diferentes abordagens que serão apresentadas adiante.

Uma pesquisa feita com base na expressão “FMEA” nos bancos de dados foi utilizada para verificar a produção de artigos relacionados ao tema nas últimas décadas: a base de dados SCOPUS forneceu mais de 4.000 resultados e a base de dados *Web of Science* armazena quase 2.500 documentos relacionados. Em ambos os casos, os resultados abrangem todas as ciências e seus sub-ramos. Ainda que se admita alguma superposição dos documentos constantes dessas duas bases de dados, os números destacam a importância dada à FMEA nos meios técnicos e acadêmicos. A quantidade de estudos é numericamente grande e importante e certamente justifica esforços no sentido de robustecer os resultados da FMEA, sobretudo quando, nesses esforços, novas técnicas e ferramentas são empregadas.

Outros autores aplicam técnicas computacionais puras ou híbridas, como, por exemplo: a combinação de FMEA com DEA estocástico, (OSADSKÁ; BERNATÍK; POSPÍŠIL, 2019); soluções mistas com aplicação de números fuzzy e abordagem GRA* (PANCHAL; KUMAR, 2017) (* A abordagem GRA estabelece que a alternativa escolhida deve ter o maior grau de relação “cinza” a partir da solução positiva ideal e, ao mesmo tempo, o menor grau de relação “cinza” da solução negativa ideal); avaliação de riscos de segurança com o emprego de FMEA associado a números fuzzy, (ARDESHIR; MOHAJERI; AMIRI, 2016); um método envolvendo análises híbridas para o sistema de combustível de um iate (MENTES; OZEN, 2015); aplicação de “*Flow Sort-GDSS*” para problemas de ordenação em FMEA (LOLLI et al., 2015); um estudo comparativo de ordenação de FMs utilizando-se AHP e REMBRANDT, (MALEKI; SAADAT, 2013); uma abordagem baseada em DEA (*Data Envelopment Analysis*) para a melhoria de aspectos ligados a segurança; um sistema de suporte à decisão baseado em números fuzzy para realizar FMEA (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007); um estudo para fortalecer projetos usando um processo MCDM (DAVIDSON; LABIB, 2003), entre outros.

Em consequência do desenvolvimento das técnicas MCDM, estudiosos da FMEA passaram a introduzir essas técnicas aos seus trabalhos com o objetivo de contornar as deficiências do cálculo tradicional da FMEA. Assim sendo, são encontrados trabalhos que combinam técnicas de suporte à decisão MCDM à teoria dos números Fuzzy; outros fazem uso de técnicas computacionais e outros, em menor número, utilizam técnicas MCDM isoladas para o objetivo retro mencionado (ordenação de FM).

Como exemplos, podem ser citadas: avaliação de risco combinando Fuzzy OWA e DEMATEL (CHANG; CHENG; CHING-HSUE, 2011); um trabalho para a melhoria de FMEA

combinando QFD e TOPSIS (GU; CHENG; QIU, 2019); aplicação de “D numbers” e TOPSIS à FMEA (BIAN et al., 2018); uma avaliação de risco utilizando um híbrido de MULTIMOORA, e AHP em ambiente fuzzy (FATTAHU; KHALILZADEH, 2018); uma FMEA sobre uma turbina eólica em ambiente fuzzy, pesos relativos e TOPSIS (LIU et al., 2016); FMEA processada com uma integração de TOPSIS, números fuzzy e pesos integrados (SONG et al., 2013); um estudo de FMEA combinando TOPSIS, AHP e fuzzy (KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012); uma abordagem para FMEA baseada em GRA-TOPSIS e linguagem imprecisa (HU et al., 2018); uma aplicação FMEA com fuzzy TOPSIS para um módulo de controle submarino (KOLIOS; UMOFIA; SHAFIEE, 2017); uma FMEA baseada em pesos relativos, números fuzzy e TOPSIS (LIU et al., 2016); uma abordagem para FMEA usando TOPSIS e fuzzy intuicionístico (LIU et al., 2015); uma integração de TOPSIS e DEMATEL para ordenar FMs em FMEA (CHANG; CHANG; LEE, 2014); FMEA realizada com a aplicação de TOPSIS e pesos integrados em ambiente fuzzy (SONG et al., 2013); uma combinação fuzzy – TOPSIS para FMEA (KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012).

Especificamente com relação ao emprego de métodos ELECTRE ao processo de ordenação dos modos de falha originado do método FMEA, apresentado como uma alternativa para o RPN tradicional, poucos documentos foram achados: um artigo que aplica ELECTRE TRI ao processo de ordenamento de FMs em FMEA (CERTA et al., 2017). Em outro trabalho, Carpitela et al. (2018) produziram um estudo da aplicação do ELECTRE I para a priorização. LIU et al. (2016) abordam o processo de priorização com o emprego de ELECTRE associado a um ambiente linguístico que usa elementos de dois componentes (*two tuple*).

O presente trabalho, voltado à aplicação por especialistas ligados à execução de FMEA, pretende trazer uma contribuição para aumentar a robustez dos resultados obtidos para a ordenação dos modos de falha que concilie os tradicionais conceitos de FMEA com as técnicas mais recentes desenvolvidas, apresentando uma proposta de realização da FMEA apoiada por conceitos modernos envolvendo o método ELECTRE III dentro de um ambiente MCDM que preencha, tanto quanto possível, lacunas apontadas pelos estudos considerados no parágrafo anterior.

1.4 Metodologia

Este projeto de pesquisa pode ser classificado como prescritivo porque propõe um modelo de apoio à ordenação dos modos de falha da FMEA. Adquire ainda um caráter descritivo ao apresentar a FMEA, Electre III e seu próprio modelo (GIL, 2008).

As grandes etapas do desenvolvimento do presente trabalho são:

- a) Escolha do tema e da pergunta de pesquisa, procurando-se a abordagem de um tema não apenas atual, mas também significativo para a Engenharia no presente contexto.
- b) Pesquisa bibliográfica sobre o tema FMEA; FMEA relativo à Engenharia; FMEA + RPN e, finalmente, exame das publicações para a identificação de estudos que procuram oferecer técnicas alternativas para o cálculo do RPN. Pesquisas para a identificação e o entendimento das técnicas ELECTRE e, particularmente, ELECTRE III visando à sua aplicação.
- c) Desenho e formulação da aplicação da Técnica Proposta com o objetivo de formatar sua aplicação incluindo considerações sobre os conceitos que a fundamentam.
- d) Aplicação da Técnica Proposta a um equipamento produzido em série com o objetivo de realizar um processo FMEA baseado na proposta deste estudo, como exemplo e guia para sua utilização por técnicos ligados ao assunto;
- e) Comparação com o cálculo tradicional do RPN e críticas pertinentes objetivando analisar e avaliar o grau de adequação da proposta deste trabalho. Será também avaliada a adequação à finalidade pretendida, o modo segundo o qual o usuário trabalha com a proposta, suas impressões e será comparada a complexidade computacional em face dos resultados pretendidos.
- f) Conclusões e lacunas de pesquisa. Nesse item, serão incorporadas as opiniões dos especialistas sobre a adoção da presente proposta relacionando-se seu emprego com o cálculo tradicional.

A figura 1.1 representa as fases acima descritas.

Figura 1.1 – Ilustração das fases do projeto de pesquisa

Fonte: Autor.

1.5 Estruturação do trabalho

O capítulo II deste trabalho apresentará a FMEA, fornecerá seu histórico, detalhes e ilustrações, abordando preferencialmente a FMEA em sua prática tradicional e procurando destacar os pontos que serão afetados pela presente proposição.

No capítulo III, será abordada o método ELECTRE, bem como suas variantes desenvolvidas ao longo do tempo, de modo a permitir ao leitor o entendimento de seus princípios, suas vantagens e seu modo de aplicação. Ênfase será dada à explicação do caráter não compensatório da técnica sugerida e sobre como essa sua característica constitui um ponto positivo para sua recomendação para a finalidade do trabalho.

A presente proposta será apresentada no capítulo IV, quando serão detalhados os passos necessários à sua aplicação, os cuidados a observar e os fundamentos da proposta, juntamente com um exemplo de aplicação da FMEA em que serão comparados os resultados, quanto à ordenação dos modos de falha obtidos através do emprego modo tradicional de sua aplicação com aqueles produzidos pela aplicação da proposta deste trabalho.

Nas considerações finais, capítulo V, serão apresentadas, limitações e lacunas de pesquisa.

2. FMEA: HISTÓRICO E FUNDAMENTOS

2.1 Introdução

A FMEA surgiu no Estados Unidos no final dos anos 1940, desenvolvida pelo Exército, quando recebeu o nome de “*Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*” e consistia em uma técnica para avaliação da confiabilidade e da segurança de sistemas e de equipamentos, constante de sua especificação MIL-P1629 (SMITH, 2014, *apud* PEDROSA, 2014; SPREAFICO et al., 2017).

A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), fundada em 1958, fez uso da FMEA nos anos 1960 para seus desenvolvimentos ligados à indústria aeroespacial, mais especificamente no projeto Apolo, que objetivava um pouso na Lua (CHANG et al., 1999, *apud* ASAN; SOYER, 2015). O emprego da FMEA foi progressivamente disseminado para outras áreas, sendo adotado primeiramente pela Ford, nos anos 1970, que tinha como principal objetivo cumprir as normatizações de segurança para veículos da época.

Nos anos 1990, a ISO 9000 passou a prever a realização da FMEA. As montadoras americanas General Motors (GM), Ford e Chrysler elaboraram um manual de referência para o processo FMEA, para que seus fornecedores passassem a aplicar a FMEA de forma organizada e comparável. O efeito da adoção e recomendação da FMEA pode ser observado no crescimento dos estudos sobre FMEA a partir dos anos noventa – como foi verificado na fase de levantamento da literatura.

Para avaliar a produção de artigos e documentos científicos sobre o tema FMEA, foi realizada uma pesquisa na base de dados SCOPUS utilizando-se apenas o termo de busca “FMEA”. Como resultado obteve-se uma lista contendo 4.145 (quatro mil, cento e quarenta e cinco) documentos abrangendo todas as ciências. A pesquisa na *Web of Science* apresentou 2.416 (dois mil, quatrocentos e dezesseis) documentos. Essas pesquisas permitem as análises seguintes:

(a) Evolução da produção bibliográfica ao longo dos anos

Houve um forte incremento a partir dos anos 2000, quando se passou de pouco mais de 50 (cinquenta) documentos nos anos 1970 para mais de 350 (trezentos e cinquenta) estudos em 2018. O ano de 2019 mostra apenas o resultado parcial até abril. Essa evolução é mostrada no Gráfico 2.1. Analogamente, na base de dados *Web of Science* foram encontrados 2.416 (dois

mil, quatrocentos e dezesseis) resultados, conforme gráfico 2.2, com um crescimento de trabalhos semelhante ao verificado na base *Scopus*.

Gráfico 2.1 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na base *Scopus*

Fonte: *Scopus*.

Gráfico 2.2 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na base *Web of Science*

Fonte: *Web of Science*.

- (b) Quanto à ciência de origem dos estudos, na base de dados *Scopus*, a sua maioria origina-se da área Engenharia (37,2%) seguida de Ciências da Computação (13,7%) e de Matemática (6,0%). Vale registrar que quase a metade dos trabalhos teve origem em diversas outras áreas do conhecimento. O gráfico 2.3 ilustra essa situação. Na base *Web of Science*, temos 65% de estudos relacionados à Engenharia. Ciências da Computação produziu 21%, seguida da Pesquisa Operacional, com 11%. O gráfico 2.4 mostra essa distribuição. Verifica-se, portanto, que o tema FMEA encontrou aplicação significativa em vários campos do conhecimento.

Gráfico 2.3 – Documentos sobre a FMEA por ramo da ciência na ciência na base *Scopus*

Documents by subject area

Fonte: *Scopus*.

Gráfico 2.4 – Documentos sobre FMEA por ramo da ciência na base *Web of Science*

Fonte: *Web of Science*.

- (c) Filtrando-se a pesquisa apenas para a área de Engenharia, obteve-se novos números de documentos, a saber: na base *Scopus*, 2.704 (dois mil, setecentos e quatro); na base *Web of Science*, 480 (quatrocentos e oitenta). A evolução dos documentos relacionados especificamente a Engenharia ao longo dos anos é mostrada nos gráficos 2.5 e 2.6, para as bases *Scopus* e *Web of Science*, respectivamente.

Gráfico 2.5 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na área Engenharia – Base *Scopus*

Fonte: *Scopus*.

Gráfico 2.6 – Evolução do número de documentos sobre FMEA na área Engenharia – Base *Web of Science*

Fonte: *Web of Science*.

Dada a visão geral dos estudos sobre FMEA, o processo de refinamento das pesquisas a partir deste ponto será descrito na Subcapítulo 2.3.2, que explanará com detalhes o procedimento adotado. As informações até aqui prestadas têm como objetivo fornecer uma visão da aplicação de FMEA nas diversas áreas do conhecimento, particularizar os estudos na área da Engenharia e mostrar a evolução do número de trabalhos ao longo do tempo.

Tomando-se como base sua classificação mais abrangente cinco tipos de FMEA podem ser identificados:

- (a) *Design Failure Mode and Effect Analysis* (DFMEA) ou “FMEA de Projeto”, aplicada ao desenvolvimento e à introdução de modificações em produtos, é usada para analisar produtos ou componentes ainda na fase de projeto ou de sua

modificação, procurando identificar potenciais deficiências de projeto. É, portanto, focada nas deficiências ligadas ao projeto, procurando a obtenção de segurança e confiabilidade ao produto durante sua vida útil (PALADY, 2007; STAMATIS, 2003; CARLSON, 2012 *apud* ASSAN; SOYER, 2015).

- (b) *Process Failure Mode and Effect Analysis* (PFMEA) ou “FMEA de Processo”, aplicada a processos de produção (PALADY, 2007), visando a analisar os processos requeridos para produzir um produto ou serviço, com foco nos modos de falha potenciais causados por deficiências ligadas ao processo de fabricação ou de montagem (STAMATIS, 2003; CARLSON, 2012 *apud* ASSAN; SOYER, 2015);
- (c) *Service Failure Mode and Effect Analysis* (SFMEA) ou “FMEA de Serviços”, usada para analisar serviços antes de sua entrega ao consumidor, focada nas deficiências do sistema ou do processo utilizado para o serviço, visando a maximizar a satisfação do consumidor (STAMATIS, 2003; CARLSON, 2012 *apud* ASSAN; SOYER, 2015).
- (d) FMEA de Sistema, também chamada de “FMEA de Conceito”, usada para analisar sistemas e subsistemas desde as primeiras fases de seu projeto, com foco nos potenciais modos de falha causados por deficiências ligadas ao sistema, tais como integração do sistema, interações entre um sistema e seus subsistemas, interações do sistema com o meio ambiente que podem prejudicar o seu funcionamento (STAMATIS, 2003; CARLSON, 2012 *apud* ASSAN; SOYER, 2015).
- (e) *Failure Mode Effects and Criticality Analysis* (FMECA), comumente utilizada para o estudo de ordenação de modos de falha em um produto ou componente, quando se delimitam as fronteiras do sistema/produto e se decompõe hierarquicamente o sistema/produto em seus componentes básicos. Na sequência, os modos de falha dos componentes básicos são identificados, estudados e as consequências são estendidas ao produto/sistema como um todo (ANTONELLA et al., 2017).

Os diferentes tipos de FMEA se diferenciam pelos objetivos procurados, a saber:

1. A DFMEA preocupa-se com o projeto ou com a atualização de um projeto de produto ou componente e nele se pergunta: (i) como o projeto/produto/componente pode deixar de fazer aquilo que ele deve fazer?, e (ii) o que se deve fazer para evitar que essas

produtos/serviços (KONING et al., 2009; AVEN, 2016 *apud* CARPITELA et al., 2018). Quando executado com vistas à ordenação dos modos de falhas, utiliza-se tradicionalmente o RPN para esse fim (CARPITELA et al., 2018).

Quadro 2.1 – FMEA e seus elementos

FASE	DESCRIÇÃO	PROCEDIMENTO
1	Planejamento	Seleção do projeto
2	Estudos das falhas e Modos de falha buscando respostas	a) como falha ou pode falhar?
		b) por que falha?
		c) o que acontece quando falha?
3	atribuição de notas (julgamentos)	Avaliar e atribuir um valor a S, O e D
4	RPN Risk Priority Number	Listagem de RPNs associados aos Modos de Falha
5	Priorização	Ordenar conforme RPN decrescente
6	Implantação e Follow-up	Acompanhamento com base em ferramentas da Qualidade

Fonte: Autor.

A realização de FMEA é praticamente considerada indispensável para o desenvolvimento de um novo produto/serviço ou quando da atualização/modificação de um produto/serviço. O objetivo é identificar possíveis falhas e seus efeitos antes mesmo que o produto seja lançado, em vez de esperar seu lançamento, a posterior ocorrência de falhas e a necessidade de seu reparo ou correção.

A FMEA pode, além disso, ser considerada uma técnica que exerce três funções distintas, a saber: ferramenta para prognóstico de problemas; procedimento para executar, desenvolver projetos, processos ou serviços, sejam eles novos ou em fase de revisão e, finalmente, um diário da atividade desenvolvida: projetos, processos ou serviços (PALADY, 2007).

Neste trabalho, será utilizada a FMEA apenas considerando-se a primeira das três funções. Para efeito de simplificação, será apenas adotada a expressão FMEA a partir desse ponto, entendendo-se que ela poderá se referir a quaisquer das designações retro mencionadas. Similarmente, produto/serviço será simplificadamente apenas “produto”.

A FMEA, realizada por um time de especialistas em um ambiente MCDM, é organizada para permitir um amplo debate com o objetivo de converter os julgamentos em valoração para fins de sua ordenação e do cálculo da criticidade ou do RPN. Obtido um diagnóstico dos

problemas, deverá a equipe responsável pela FMEA providenciar medidas para eliminá-los ou minimizá-los, dentro de valores compatíveis com a realidade e com a expectativa dos clientes (PALADY, 2007). Para isso, torna-se necessária sua priorização ou, em outras palavras sua ordenação quanto à criticidade. Quanto maior o valor do RPN, mais crítica será a falha e, portanto, maior prioridade deve ser atribuída a ela.

O quadro 2.2 – Características e Vantagens dos Processos FMEA apresenta a posição de alguns autores que defendem esse método, apresentando suas características e vantagens.

Quadro 2.2 – Características e Vantagens dos Processos FMEA

CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DOS PROCESSOS FMEA	
FMEA consiste em um procedimento fácil de aprender e de implementar e faz com que a avaliação de sistemas complexos seja feita com facilidade	(Dhillon 2009; Mozaffari et al. 2013)
FMEA constitui-se em uma útil ferramenta para a visualização dos problemas pelos os gestores e é também um excelente instrumento de apoio para o aprendizado organizacional	(Dhillon 2009; Braglia 2000)
FMEA é um método estruturado, sistematizado e confiável para a identificação das correlações entre os modos de falha, as razões ou causas para eles e também de seus efeitos.	(Dhillon 2009; Mozaffari et al. 2013; Kostina et al. 2012)
FMEA permite uma avaliação realística da conformidade de produtos e serviços com relação ao mercado e à necessidades do consumidor	(Kerekes and Johanyák 1996)
FMEA aumenta a segurança e a confiabilidade de produtos e de serviços, reduz os custos de garantia e de serviços, reduz o tempo do processo de desenvolvimento e possibilita maior atendimento de prazos	(Bujna and Pristavka 2013)
Em consequência das características derivadas de sua proatividade a FMEA, em última análise, aumenta a satisfação do consumidor.	(Dhillon 2009)

Fonte: Adaptado de Asan e Soyer (2016).

Nesse ponto, surge uma dificuldade associada ao cálculo tradicional: são normalmente encontrados diversos modos de falhas com o mesmo valor de RPN, geralmente formando grupos de modos de falha com o mesmo RPN. Sempre que isso acontece – e isso acontece com bastante frequência, a ordenação torna-se difícil e usualmente requer uma revisão dos julgamentos emitidos sobre os modos de falhas – com a obtenção de novos valores de RPN (assim recalculados). Tal procedimento, todavia, não impedirá que, uma vez realizado, haja novamente diversos modos de falha com o mesmo valor de RPN. Esse procedimento tem sido bastante criticado por suas limitações (CARPITELA et al., 2018; PALADY, 2007). No entanto, vale mencionar os pontos fortes da FMEA (ASAN; SOYER, 2016). Tais pontos fortes estão resumidos no Quadro 2.2 e, em poucos argumentos, destaca os pontos mais relevantes a favor da FMEA.

2.2 Principais objeções à ordenação do cálculo tradicional da FMEA

Diversos autores propõem diferentes técnicas de suporte à decisão multicritério e caminhos para o cálculo do RPN e para a ordenação e priorização dos modos de falha com o objetivo de oferecer alternativas para a utilização do RPN e, ainda, sugerindo modos de

contornar as deficiências e dificuldades trazidas por sua utilização. Panchal et al. (2019) propuseram uma nova metodologia para a análise de risco utilizando a abordagem Fuzzy – Lambda – Tau; Antonella et al. (2016) propuseram uma alternativa para a ordenação baseada em ELECTRE TRI, distanciando-se dos procedimentos tradicionais; Carpitela et al. (2018) produziram um estudo da aplicação do ELECTRE I para a ordenação; Yazdi elaborou um estudo sobre a ordenação e avaliação do risco em FMEA baseado em TOPSIS modificado híbrido com Fuzzy intuicionístico em 2018; Rezaei et al. (2018) apresentaram um trabalho voltado para o tema ordenação com modificações específicas para a área da saúde; Xiaotong (2018) apresentou um estudo sobre melhorias na qualidade em uma abordagem integrada “LEAN” em um estudo de caso; Liua et al. (2017), produziram um estudo para a FMEA utilizando um ambiente intervalado por meio de Fuzzy intuicionístico; Kabir e Papadopoulos (2018) elaboraram uma revisão de aplicações de conjuntos Fuzzy para a engenharia de segurança e de manufatura enxuta usando diversas ferramentas da qualidade em apoio à FMEA; Kyungmee et al. (2017) propuseram um modelo geral para o processo de ordenação na FMEA; Junkeon et al. (2017) propuseram um procedimento FMEA baseado em Fuzzy; Renjitha et al. (2017) propôs uma FMECA baseada em Fuzzy; Jiang et al. (2017) propuseram um novo método para a FMEA baseado em Fuzzy; Rachieru et al. (2013) propuseram uma PFMEA baseada em lógica Fuzzy; Chang et al. (2017) apresentaram um mapa auto-organizado para a metodologia FMEA; Banduka et al. (2016) apresentaram um trabalho sobre a PFMEA relacionado à confiabilidade, incluindo FMEA; Huai-wei e Liou (2018) propuseram um novo modelo baseado em MCDM para a avaliação do risco em processos FMEA; Hu-Chen et al. (2016) propuseram uma abordagem integrada para a FMEA e avaliação do risco usando ELECTRE; Sang-Bing et al. (2016) propuseram DEMATEL associado à FMEA para avaliar, prevenir e priorizar falhas na produção.

Os autores acima, dentre outros, sustentam que uso exclusivo do RPN não conseguiria produzir bons resultados em um ambiente composto por diversos especialistas elaborando julgamentos marcados por imprecisão e incerteza sobre os riscos (CERTA et al., 2017 *apud* Carpitela et al., 2018). Objeções e autores estão contidos no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Objeções levantadas contra o cálculo tradicional do FMEA

Objecções levantadas contra o cálculo tradicional de FMEA e os principais autores		
Objecções	Autores	quantidade de Autores
A importância relativa entre os fatores O, S e D não é levada em consideração	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekcioglu (2012), Zhang and Chu (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma and Sharma (2012, 2010), Chang and Cheng (2011, 2010), Chang and Wen (2010), Chang et al. (2010, 1999, 2001), SeyedHosseini et al. (2006), Tay and Lim (2010, 2006a), Keskin and Zkan (2009), Pillay and Wang (2003), Bowles and Peláez (1995), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Xiao et al. (2011), Franceschini and Galetto (2001), Nepal et al. (2008), Sankar and Prabhu (2001), Zammori and Gabbrielli (2011), Abdelgawad and Fayek (2010), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Garcia et al. (2005), Chang and Sun (2009)	45
Diferentes combinações envolvendo os valores de O, S e D podem produzir o mesmo valor de RPN para diferentes modos de falha, porém as suas implicações latentes podem ser totalmente diferentes	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekcioglu (2012), Zhang and Chu (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003b), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma and Sharma (2012, 2010), Tay and Lim (2010, 2006a), Keskin and Zkan (2009), Pillay and Wang (2003), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Franceschini and Galetto (2001), Chang et al. (1999, 2001), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Chang and Sun (2009)	33
Os três fatores de risco apresentam um grau de imprecisão em sua avaliação	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekcioglu (2012), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Sharma et al. (2005), Chang et al. (2010), Xu et al. (2002), Braglia (2000), Yang et al. (2011), Chen and Ko (2009a, 2009b), Zammori and Gabbrielli (2011), Abdelgawad and Fayek (2010), Garcia et al. (2005)	21
A fórmula para o cálculo do RPN pode ser questionada e é controversa	Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekcioglu (2012), Braglia et al. (2003a, 2003b), Geum et al. (2011), Chang et al. (1999, 2001), Puente et al. (2002), Ben-Daya and Raouf (1996), Gilchrist (1993)	14
A atribuição das notas é diferente para cada um dos fatores de risco	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Chang et al. (1999, 2001), Sankar and Prabhu (2001), Puente et al. (2002), Ben-Daya and Raouf (1996), Gilchrist (1993)	13
O RPN não pode ser utilizado para avaliar a efetividade das ações corretivas	Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003b, 2007), Pillay and Wang (2003), Chen (2007), Carmignani (2009), Chang et al. (1999, 2001), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Ben-Daya and Raouf (1996), Gilchrist (1993)	12
Os RPN obtíveis pela análise tradicional não são contínuos e apresentam-se distanciados uns dos outros	Liu et al. (2012), Chang and Cheng (2011, 2010), Chang et al. (2010), Chang (2009), Keskin and Zkan (2009), Carmignani (2009), Franceschini and Galetto (2001), Garcia et al. (2005), Chang and Sun (2009)	10
As relações de interdependência entre os diversos modos de falha e seus respectivos efeitos não é considerada	Xu et al. (2002), Chin et al. (2008), Braglia et al. (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Nepal et al. (2008), Zammori and Gabbrielli (2011), Shahin (2004), Chang and Sun (2009), Gandhi and Agrawal (1992)	10
A fórmula utilizada para o cálculo do RPN é bastante sensível a variações nos fatores de risco	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekcioglu (2012), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chang (2009)	9
Os diversos RPN tem numerosos valores em duplicata	Gargama and Chaturvedi (2011), Chang and Cheng (2011, 2010), Chang et al. (2010), Chang (2009), Seyed-Hosseini et al. (2006), Sankar and Prabhu (2001), Garcia et al. (2005), Chang and Sun (2009)	9
O RPN considera somente tres fatores de risco, principalmente concernentes a segurança	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chang and Cheng (2010), Braglia (2000), Carmignani (2009), Zammori and Gabbrielli (2011)	9

Fonte: Adaptado de Hu-Chen Liu, Long Liu e Nan Liu (2013).

Todavia, as empresas que costumeiramente trabalham com FMEA têm em seus arquivos numerosos valores históricos de RPN calculados segundo a metodologia e as tabelas tradicionais para a determinação do RPN. Provavelmente, tais empresas apresentarão resistência a abandonar o procedimento tradicional, por terem em arquivo resultados obtidos ao longo de vários anos e, portanto, perfeita e diretamente comparáveis aos valores determináveis em um novo projeto.

Para testar e eventualmente refutar o argumento acima, este trabalho, que sugere a utilização da técnica ELECTRE III para a ordenação dos modos de falhas, comparará, com base em um projeto real, as soluções de ordenação calculadas pela metodologia tradicional e por essa proposta.

2.3 O problema da ordenação dos modos de falha na FMEA

2.3.1 Conceitos e histórico

Para o entendimento das objeções levantadas acima, deve-se examinar o modo por meio do qual o cálculo tradicional fornece seus resultados. Durante a realização da FMEA, os componentes da equipe que a executa fazem julgamentos e atribuem notas, partindo de expressões verbais, com algum grau de imprecisão ou de incerteza, aos três critérios ligados (O, S e D) a cada modo de falha considerado no estudo. As expressões verbais normalmente utilizadas para a atribuição de julgamentos tem sido consideradas adequadas e são escolhidas pelas empresas de acordo com critérios próprios. Para o cálculo tradicional do RPN, parte-se de três tabelas com valores que variam de 1 (um) a 10 (dez) conforme sua natureza e criticidade, conforme preconiza a norma IEC 60812 (2016). Para S e O utiliza-se uma escala crescente, partindo de 1 (um) para severidade leve e baixas ocorrências. Para a avaliação de D, emprega-se uma escala invertida, que admite valor 1 (um) para detecção praticamente certa, subindo para 10 (dez) quando a detecção é praticamente impossível (ANTONELLA et al., 2017).

Nos três casos, a valoração faz corresponder expressões verbais às notas 1 (um) a 10 (dez) – significando julgamentos. O grau de incerteza associado aos julgamentos é facilmente compreendido quando se faz um exercício simples de, a partir da leitura das tabelas, atribuir as correspondentes notas que serão usadas para o cálculo do RPN. Assim sendo, o Quadro 2.4 exemplifica, em linguagem verbal, os valores e as descrições comumente adotados para a Severidade (aplicáveis a FMEA de Produto); semelhantemente aplicam-se para a avaliação da Ocorrência os valores do Quadro 2.5 e, para a Detecção (ou mais apropriadamente Dificuldade de Detecção), os valores do Quadro 2.6.

Há casos em que as empresas adotam valores convenientes e práticos para a Ocorrência baseados em porcentagem, partes por milhão (PPM) ou outra valoração, algumas vezes deixando de utilizar as expressões verbais constantes da descrição do Quadro 2.5. A Detecção é examinada e avaliada de forma bastante semelhante à Severidade e à Ocorrência, mas é precedida de uma análise em que se procuram respostas, tais como: quais as chances de se detectar o problema antes que ele chegue ao cliente (interno ou externo)? E também: quais as chances de o cliente detectar o problema antes que ele provoque uma falha importante ou catastrófica (a falha que provoca a destruição quase completa de um agregado, como, por exemplo, um motor a explosão, uma caixa de câmbio, a carcaça de um eixo diferencial, a

carroceria de um veículo)? (PALADY, 2007). A esse respeito vale mencionar os casos de “Recall” comumente praticados pela indústria automobilística. Tais casos referem-se a modos de falha não detectados ou não corretamente avaliados antes da produção e venda dos veículos, que, por suas características, não podem ser deixados sem a necessária correção ou reparo.

Essas considerações levam ao Quadro 2.6 – Escala de Avaliação da Detecção. Definidos os valores (ressalvando-se que cada empresa ou organização pode adotar valores/definições específicas para os 10 graus previstos em cada uma das tabelas), o RPN é calculado como sendo o produto dos valores ou graus atribuídos a cada modo de falha. São obtidos dessa maneira os valores de criticidade – RPN dos modos de falha segundo o cálculo tradicional. A partir desse ponto, normalmente é necessário ordená-los, para fins de priorização, adotando-se maior prioridade para os valores mais altos de RPN e menor prioridade para valores menores de RPN.

Quadro 2.4 – Expressões e valores para a Severidade em FMEA de Produto

DESCRIÇÃO DA ESCALA DE SEVERIDADE	GRAU
Efeito não percebido pelo cliente	1
Efeito bastante insignificante, percebido pelo cliente, entretanto, não faz com que ele procure serviço ou garantia	2
Efeito insignificante, percebido pelo cliente, entretanto não faz com que o cliente procure garantia ou serviço	3
Efeito bastante insignificante, percebido pelo cliente, fazendo com que o cliente procure garantia ou serviço	4
Efeito pequeno, inconveniente para o cliente, entretanto não faz com que ele procure garantia ou serviço	5
Efeito pequeno, inconveniente para o cliente, fazendo com que ele procure garantia ou serviço	6
Efeito moderado, que prejudica o desempenho do equipamento, levando a uma falha grave ou a uma falha que pode impedir a execução das funções do equipamento	7
Efeito significativo, resultando em falha grave; entretanto não coloca a segurança do cliente em risco e não resulta em custo significativo da falha	8
Efeito crítico, que provoca a insatisfação do cliente, interrompe as funções do equipamento, gera custo significativo da falha e impõe um leve risco de segurança (não ameaça a vida nem provoca incapacidade permanente) ao cliente	9
Efeito perigoso, ameaça à vida ou pode provocar incapacidade permanente ou outro custo significativo da falha, que coloca em risco a continuidade operacional	10

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

Quadro 2.5 – Expressões e Valores para a Ocorrência

DESCRIÇÃO DA ESCALA DE OCORRÊNCIA	GRAU
Extremamente remoto, altamente improvável	1
Remoto improvável	2
Pequena possibilidade de ocorrência	3
Pequeno número de ocorrências	4
Espera-se um número ocasional de falhas	5
Ocorrência moderada	6
Ocorrência freqüente	7
Ocorrência elevada	8
Ocorrência muito elevada	9
Ocorrência certa	10

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

Quadro 2.6 – Expressões e valores para a Detecção

DESCRIÇÃO DA ESCALA DE DETECÇÃO	GRAU
Sistema de revisão do projeto bastante eficaz, programas amadurecidos de qualidade e confiabilidade, controles de processo no estado da arte	1
Revisões de projeto eficazes, implementação de programas de qualidade e confiabilidade, controles de processo altamente automatizados	2
Ênfase nas revisões de projeto, programas de qualidade totalmente desenvolvidos e implementados, treinamento em andamento e implementação parcial de programas de confiabilidade, processo automatizado para a maioria das operações	3
Programa de qualidade em vigor, conscientização da coonfiabilidade sem um programa formal, revisões de projeto parcialmente implementadas, um mix de controles de processo automatizados e com intervenção humana.	4
Programas de qualidade desenvolvidos mas ainda não totalmente implementados, ausência de revisão formal de projeto, alguns controles de processo automatizados dependendo da adesão aos procedimentos operacionais	5
Implementação dos estágios iniciais do programa de qualidade, poucos controles de processo automatizados, implementação parcial de procedimentos operacionais	6
Implementação parcial de métodos de qualidade, planos de inspeção de amostras e auditorias aleatórias, 100% de inspeção	7
Totalmente dependente da auto-inspeção do operador com inspeção periódica do controle de qualidade, métodos não implementados, ausência de procedimentos formais	8
Totalmente reativo aos problemas identificados durante a fabricação, ausência de programas formais, alguma conscientização da qualidade do produto	9
Ausência de sistemas implementados, nenhuma conscientização da qualidade, definição inconsistente da qualidade do produto - baseada em julgamento individual	10

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

Após a determinação do valor de RPN associado a cada modo de falha, procede-se à sua ordenação, em ordem decrescente. Os modos de falha são usualmente abordados para mitigação ou eliminação conforme o valor de RPN. A ordenação assim obtida é praticamente o produto da FMEA. Há discussões sobre se apenas o RPN deve ser usado como critério para a ordenação e argumentos contra e a favor do emprego exclusivo do RPN nesta fase do trabalho. Diversos cenários são possíveis:

- (a) As organizações podem convencionar que, a despeito da ordenação dos modos de falha conforme a metodologia original da FMEA, modos de falha com Severidade maior ou igual a um dado valor “s”, arbitrariamente escolhido, sejam priorizados em relação aos demais modos de falha que apresentem o mesmo valor de RPN.
- (b) Similarmente, outras organizações podem convencionar que modos de falha com Ocorrência maior ou igual a um dado valor “o”, arbitrariamente escolhido, sejam priorizados em relação aos demais modos de falha que apresentem o mesmo valor de RPN.
- (c) O mesmo procedimento pode ser feito para o valor “d”, atribuído à Detecção.
- (d) A priorização – independentemente da ordenação proporcionada pela FMEA, pode ser estabelecida com base em um diagrama de áreas, tal como o da Figura 2.2, delimitadas por valores arbitrariamente convencionados de S e de O, o que significaria um compromisso entre as alternativas “a”, “b” e “c” anteriores.

Figura 2.2 – Diagrama de áreas como subsídio para a priorização

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

- (e) As empresas podem ainda estabelecer qualquer outro procedimento julgado adequado para a priorização dos modos de falha.

Independentemente da simples adoção do valor do RPN para a priorização ou de qualquer outro critério para a ordenação dos modos de falha e sua posterior priorização, haverá quase sempre – dentro do cálculo tradicional – um ou mais grupos de modos de falha com o mesmo valor de RPN, o que pode dificultar sua ordenação. Nesse ponto, embora organizações diferentes possam adotar ou ter adotado critérios próprios para a priorização, ainda assim restará

o problema: como ordenar os modos de falha que apresentam o mesmo valor de RPN? A adoção do diagrama de áreas, semelhante ao diagrama da Figura 2.2, é um meio de contornar, porém sem resolver, essa aparente dificuldade (PALADY, 2007).

Vistas as questões acima levantadas e as consequentes limitações do cálculo tradicional da FMEA, encontra-se a principal justificativa para o presente trabalho, que tem como objetivo apresentar um procedimento, combinando a FMEA com o método ELECTRE III, para robustecer a ordenação dos modos de falha, originalmente feita segundo seu valor de RPN.

2.3.2 Pesquisa bibliográfica: apresentação e comentários

A pesquisa bibliográfica teve dois de seus passos descritos na introdução deste documento. Não obstante, em nome da visão de conjunto, eles serão retomados neste ponto – sobretudo porque recebem uma apresentação muito rápida, apresentando-se a seguir a trajetória completa da revisão.

- (a) Passo 1: Com a palavra-chave “FMEA”, a base *Scopus* forneceu 4.145 (quatro mil, cento e quarenta e cinco) resultados; a base *Web of Science*, outros 2.416 (dois mil, quatrocentos e dezesseis). Esses resultados abrangem desde 1970 até o presente.
- (b) Passo 2: com a restrição para a área Engenharia, resultaram 2.704 (dois mil, setecentos e quatro) na base *Scopus* e 480 (quatrocentos e oitenta) na base *Web of Science*.
- (c) Passo 3: A introdução de filtros para tipos de documentos: artigos e *conference papers* e das palavras-chave “AND” RPN, “AND” *Risk priority number* ; “AND” *risk analysis*; “AND” *prioritization*; “AND NOT” *Fuzzy* limitou os resultados a 62 (sessenta e dois) documentos na base *Scopus* e a 30 (trinta) documentos na *Web of Science*. Esses 92 (noventa e dois) artigos foram examinados visando à seleção de artigos mais diretamente ligados a novas alternativas de ordenação de FMs. Finalmente, 20 (vinte) artigos foram escolhidos para estudo neste trabalho e são resumidamente explicados adiante.

Os artigos que envolvem a teoria dos números Fuzzy foram excluídos, porque a metodologia aplicada neste trabalho não utiliza números Fuzzy, o que os distancia do objetivo da revisão de literatura.

Além dos artigos acima citados, foram encontradas duas revisões de literatura especificamente ligadas a técnicas e métodos aplicados alternativamente para a ordenação de

FMs. Essas duas revisões, por merecerem uma atenção especial, são abordadas com detalhes a seguir.

O artigo mais recente, de 2017, teve como objetivo identificar se os esforços feitos para a melhoria dos resultados obtidos com os processos FMEA responderam, ou deixaram de responder, às críticas feitas por estudiosos. Para esse fim, foram estudados documentos de um período de sessenta anos e foram examinadas quatro diferentes visões, a saber:

- a) aplicabilidade do método;
- b) representação da cadeia de causa e efeito;
- c) análise de risco;
- d) a integração com a fase de solução de problemas.

Esse artigo em questão abordou, além de 220 (duzentos e vinte) artigos publicados, 109 (cento e nove) patentes – registradas entre 1978 e 2016, em um esforço de tentar unir as duas pontas do universo de FMEA, a academia e a indústria.

Foram encontradas semelhanças nas preocupações dos dois subconjuntos que formam o universo do estudo. A metodologia de pesquisa foi centrada nos registros de patentes, publicações internacionais e documentos apresentados em conferências, além de bancos de dados disponíveis para o período 1978 – 2016. Foi dada preferência para jornais científicos de grande notoriedade, a periódicos de suficiente maturidade e de fator de impacto significativo, privilegiando-se aqueles indexados por entidades internacionais, tais como a *Scopus*. Os principais termos de busca foram: “FMEA”, “FMECA”, “DFMEA”, “AFMEA”, “RFMEA”, “*Failure Mode and Effects Analysis*”, “*Risk Analysis*” e “*Failure Analysis*”. Ao abordar a aplicabilidade, os autores mencionam ter encontrado:

- (a) Achado 1: alentado número de estudos ligados a soluções de quantificação de risco, mostrando a grande atenção dedicada ao emprego de números Fuzzy produzidos quase que exclusivamente pela academia.
- (b) Achado 2: ausência de alinhamento nas propostas de solução de problemas – parcialmente inferiores à demanda.
- (c) Achado 3: carência de soluções para o fortalecimento de times de trabalho – com maior preocupação da indústria e menor na academia.
- (d) Achado 4: caráter incremental dos trabalhos, trazendo gradualmente novas contribuições a partir de situações anteriores, sem o surgimento de soluções mais impactantes, que pudessem modificar a natureza dos processos FMEA.

A revisão identificou que os estudos sobre aplicabilidade são os mais numerosos e heterogêneos, estão ligados a questões tais como repetibilidade, investimento em tempo, subjetividade dos resultados, dificuldade para o tratamento de sistemas complexos, dentre outras.

Quanto a estudos envolvendo Causa e Efeito, relacionados à habilidade da FMEA para suportar os usuários durante o processo, foram identificadas:

- a) deficiências no apoio à determinação das falhas e de modos de falha;
- b) ausência de uma tipologia para definir ou classificar efeitos primários que afetam o produto, efeitos secundários que afetam o usuário e/ou o meio ambiente e, ainda,
- c) deficiência quanto à descrição das falhas – destacando-se a dificuldade de distinção entre os tipos de falha e da escolha do nível adequado de detalhamento.

Com respeito à análise de risco, foram identificados problemas ligados aos modos de falha encontrados e sua ligação com os resultados. Os autores atribuem essas deficiências aos critérios de avaliação ambíguos e limitados e a alguma inconsistência entre os resultados do processo e as atividades subsequentes.

Merecem destaque as discrepâncias encontradas entre citações feitas pela academia e pela indústria quanto a:

- (i) subjetividade – que identificou definições ambíguas que podem levar à subjetividade no processo de avaliação do risco: a academia fez 23 (vinte e três) menções, enquanto a indústria fez apenas 4 (quatro);
- (ii) quanto à medição do risco – ausência de critérios específicos e de quantificação (por exemplo: falta de critérios econômicos) houve 10 (dez) menções da academia apenas e, finalmente;
- (iii) quanto à confiabilidade dos resultados: a academia menciona em 8 (oito) artigos que há inconsistência na avaliação do risco para fins de tomada de decisão e de solução de problemas.

A Tabela 2.1 (Problemas mencionados sobre análise de risco na revisão de literatura) ilustra essa situação.

Tabela 2.1 – Problemas mencionados sobre análise de risco na revisão de literatura

PROBLEMAS MENCIONADOS SOBRE ANÁLISE DE RISCO NA REVISÃO DE LITERATURA			
Categoria: análise de risco	Número de citações		
	ACADEMIA	INDÚSTRIA	TOTAL
SUBJETIVIDADE: definições ambíguas levando à subjetividade no processo de avaliação do risco	232	4	27
MEDIÇÃO DO RISCO: falta de critérios específicos e de quantificação do risco (p.e.: critérios econômicos)	10	0	10
CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS: avaliação do risco inconsistente para tomada de decisão e solução de problemas	8	0	8
TOTAL	41	4	45

Fonte: Autor.

Finalmente, quanto à solução de problemas – vista como sendo a capacidade de fornecer resultados adequados para a tomada de decisão por meio de quantificação confiável e baseada em parâmetros ou em testes, bem como sobre a viabilidade dos resultados –, foram encontradas deficiências como a falta de metas específicas e de caminhos bem definidos para as soluções e de soluções claramente inteligíveis (SPREAFICO; RUSSO; RIZZI, 2017).

O segundo artigo de revisão da literatura apoiou-se no contínuo surgimento de numerosas menções às deficiências do processo tradicional de priorização dos processos FMEA e, para isso, baseou-se em um estudo de 75 (setenta e cinco) “*papers*” publicados entre 1992 e 2012 em periódicos de renome e usualmente avaliados internacionalmente.

Deste modo, 75 (setenta e cinco) documentos foram analisados, com o objetivo de se encontrarem respostas para três questões:

- (i) quais deficiências recebem maior atenção;
- (ii) quais são as abordagens mais populares;
- (iii) se há inadequações nas abordagens.

A partir dos estudos realizados, foi observado pelos autores que o método tradicional para calcular o RPN não é suficientemente robusto, considerando-se as deficiências apontadas na literatura. Despontam como mais frequente objeto de estudo as principais deficiências:

- a) a falta de um sistema de pesos que possa atribuir maior ou menor importância a um desses três fatores; e
- b) a falta do estabelecimento de relações de causa e efeito entre os três fatores.

Embora numerosas abordagens tenham sido apresentadas à comunidade científica e, em sua maioria, atendam os objetivos de robustecimento de particulares características do processo de ordenação, não foi identificada uma proposta de tal abrangência que tenha sido majoritariamente aceita.

A pesquisa identificou a demanda de fatores de risco mais amplos, que reduzam a imprecisão das decisões e que facilitem a ordenação. Exemplificando: S poderia ser subdividida em três sub-riscos: danos ao produto, custos de produção e de manutenção. Foi possível observar que, segundo diversos autores, há necessidade de atribuição de pesos aos fatores S, O e D, que deveria ser feita através de um processo adequado e consolidado.

Para fins de clareza, foi feita uma categorização das abordagens, do seguinte modo:

- (i) técnicas MCDM;
- (ii) Inteligência artificial, subdividida em sistemas baseados em regras; sistemas baseados em regra empregando a teoria dos números fuzzy; algoritmos fuzzy e mapas cognitivos fuzzy;
- (iii) abordagens integradas;
- (iv) outras abordagens.

Além disso, a pesquisa identificou as seguintes participações percentuais das abordagens, a saber: inteligência artificial (40% das propostas) e MCDM (22%). Abordagens fuzzy são as mais populares, seguidas de *Grey Theory*, *Cost based models*; AHP-ANP e programação linear (HU-CHEN; LONG LIU; NAN LIU, 2014).

Nesse ponto, foram retomados os 20 (vinte) artigos considerados relevantes para ilustrar as abordagens ligadas ao robustecimento do processo de ordenação. Embora esses artigos estejam apresentados mais detalhadamente em quadros explicativos que se seguem, é propícia uma apresentação resumida a seu respeito.

Dentro da primeira das categorias acima, destaca-se o mais recente trabalho: “An improved FMEA analysis method based on QFD and TOPSIS theory” (GU; CHENG; QIU, 2019). Na priorização, aplica-se também o “*weighted geometric average algorithm*”. Embora encerrando conceitos que indicam sua boa eficácia, a proposta possui elevada complexidade computacional.

O segundo trabalho neste grupo, “*Using EWGM method to optimise the FMEA as a risk assessment methodology*” (AL MASHAQBEH; MUNIVE-HERNANDEZ; KHURSHID, 2019) propõe uma combinação de AHP com EWGM (*Exponential and Weighted Geometric Mean Method*) para suportar a análise de risco: inicialmente, a AHP é usada para estimar os pesos a serem atribuídos aos fatores O, S e D que compõem o RPN. Em seguida, aplica-se o método EWGM para o ordenamento dos RPNs. A técnica EWGM não apresenta especial

dificuldade computacional, mas não pertence ao ferramental usual dos membros das equipes de FMEA.

A terceira proposta desta categoria, “*ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number*” (ANTONELLA et al., 2017) aborda o emprego de ELECTRE TRI para a categorização, utilizando uma metodologia simples e de fácil aplicação, com pequena complexidade computacional, porém de uma maneira diferenciada da proposta deste trabalho.

A quarta proposta, “*An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty*” (LIU et al., 2016); apresenta uma aplicação da técnica ELECTRE associada a um ambiente linguístico de dois componentes (*two tuple*) do tipo $T = (s, \alpha)$, onde T é um termo típico (*two tuple*), s é uma “informação linguística” e α é um valor numérico associado ao elemento linguístico. Essa metodologia pretende associar as vantagens do ELECTRE, que permite a atribuição de pesos aos fatores O, S e D e inclui o processamento dos termos “*two tuple*” para a ordenação dos modos de falha, trazendo alguma dificuldade computacional para sua realização.

Outro estudo recente, “*Failure mode and effects analysis based on D numbers and TOPSIS*” (BIAN et al., 2018), utiliza duas diferentes ferramentas para a ordenação: o emprego de “D-numbers”, derivados da Teoria de Dempster Shafer, porém conceitualmente modificados para admitir e aceitar informações incompletas, seguindo-se o emprego de TOPSIS, em sete passos, os quais estão explicados no quadro geral que se encontra adiante. Tal estudo envolve uma importante complexidade computacional.

O sexto estudo, “*FlowSort-GDSS – A novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA*” (LOLLI et al., 2015), faz emprego da técnica *Group Decision Support System* (GDSS), que se baseia na técnica de suporte à decisão PROMETHEE e procura ordenar os modos de falha mediante classes de prioridade. Para isso, os decisores são incentivados a fornecer um perfil de referência para os fatores de risco, conforme sua própria experiência. A aplicação do GDSS possibilita o ordenamento dos modos de falha a partir dos julgamentos dos decisores e dos perfis de referência dos modos de falha.

O sétimo trabalho, “*Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA*” (CHANG; CHANG; LEE, 2014), pretende contornar algumas deficiências da priorização tradicional, que explicitamente menciona, propondo o emprego associado de TOPSIS e DEMATEL e produzindo um trabalho com fortes conceitos sobre a eficácia do ordenamento pretendido, porém com alguma dificuldade computacional.

O oitavo trabalho, “*Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology*” (CHANG, 2009), enquanto critica o cálculo tradicional por desconsiderar as relações entre os componentes de um dado sistema, propõe o emprego de um algoritmo mais robusto, especificamente, o operador OWGA (*Ordered Weighted Geometric Averaging*) associado à técnica DEMATEL, apresentando mediana complexidade computacional e conceitos eficazes para o objetivo procurado.

Finalmente, referindo-se a uma alegada deficiência do cálculo tradicional de não considerar relações indiretas entre componentes de um sistema e a sua dificuldade de processar sistemas complexos, com muitos subsistemas e componentes, o nono e último trabalho deste grupo, “*Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory Technique*” (SEYED-HOSSEINI; SAFAEI; ASGHARPOUR, 2006) preconiza o emprego de DEMATEL como uma abordagem efetiva para analisar as mencionadas relações quanto a serem diretas ou indiretas e com respeito à severidade (S). São apontadas as vantagens dessa técnica para incluir as relações indiretas na análise, na atribuição de FMs a tipos de alternativas e quanto à formação de grupos de alternativas em sistemas de grande porte.

O quadro 2.7 (Resumo dos artigos baseados em técnicas de suporte à decisão) apresenta os respectivos artigos com maior detalhe.

O segundo grupo de artigos compõe-se de trabalhos realizados com fins específicos, sem validade generalizada, que incluem uma nova proposta de priorização, a saber: o primeiro estudo, “*Evaluation of risk priority number (RPN) in design failure modes and effects analysis (DFMEA) using factor analysis*” (SELLAPPAN; NAGARAJAN; PALANIKUMAR, 2015), faz uso de métodos estatísticos para a ordenação, tendo aplicação particularizada pois, segundo seus autores, deve ser usada quando: (i) o time do processo tem divergências na atribuição dos valores de O, S e D; (ii) os valores médios de RPN são idênticos para mais de um modo de falha, e (iii) os três fatores são considerados igualmente importantes.

O artigo “*Design FMEA for a diesel engine using two risk priority numbers*” (LING et al., 2012) propõe usar dois conjuntos de RPN, o primeiro deles obtido a partir do cálculo tradicional (ou seja: $RPN = S \times O \times D$) e uma nova escala é introduzida para valores de prevenção P. Nessa escala, medidas de prevenção são avaliadas quanto à sua capacidade de significativamente eliminar ou mitigar FMs, com valores entre 1 e 10 (menores valores são os mais seguros). Um quadro adicional é construído levando-se em conta as combinações entre os

dois tipos de RPN já calculados e fornece as diretrizes para a priorização. Havendo uma coincidência do valor tradicional de RPN entre duas ou mais falhas, deve-se priorizar levando em conta primeiramente S; seguida de O; seguida de P e finalmente de D. Trata-se de um estudo específico para motores diesel por utilizar recomendações e valores de falha específicos.

Outro estudo, “*One approach for improvement of FMEA in risk analysis and design optimization*” (HUANG; WANG; LI, 2010), procura reforçar os resultados da ordenação nos casos em que duas ou mais falhas tem o mesmo valor de RPN e nos casos em que o time de decisores tem discordâncias nos valores de S, O ou D. A solução proposta é um novo RPN, designado como RPN-robusto que, com o emprego de um processo estruturado de gerenciamento dos FMs, apoiado na ferramenta FIT (*Fault Insertion Testing*), procura determinar as relações entre os FMs, indicando o caminho para o ordenamento das falhas.

Em outro estudo, “*Expanded FMEA (EFMEA)*” (BLUVBAND; GRABOV; NAKAR, 2015), os autores propõem um aumento da efetividade da ordenação de FMs através do emprego de uma ferramenta gráfica, descrita no trabalho. Com essa ferramenta, a adequação de ações de melhoria sobre produtos/processos/serviços se faz de modo simplificado, por se basear na avaliação da viabilidade da ação de melhoria. Assim, a proposta apoia tanto a viabilidade de implementação de uma ação corretiva quanto o impacto produzido por ela sobre o particular FM.

Quadro 2.7 – Resumo dos artigos baseados em técnicas de suporte à decisão

TÉCNICAS DE SUPORTE À DECISÃO - ISOLADAS OU COMBINADAS		
An improved FMEA analysis method based on QFD and TOPSIS theory - 2019	Gu, Y.-K., Cheng, Z.-X., Qiu, G.-Q.	Integração de QFD – Quality Function Deployment e TOPSIS c/ a inclusão da interação entre a satisfação dos clientes e os diversos FMs com respeito a performance, economia e serviço. Avalia-se a importância dos requisitos dos clientes através de AHP, a importância das características técnicas é avaliada com o algoritmo média geométrica ponderada (weighted geometric average algorithm). A importância das características técnicas é convertida para um coeficiente de correção no cálculo do FMEA, para a obtenção da Severidade relativa de cada FM
Using EWGM method to optimise the FMEA as a risk assessment methodology, 2019	Bian, T., Zheng, H., Yin, L., Deng, Y.	Uma combinação de AHP com EWGM (Exponential and Weighted Geometric Mean Method) para suportar a análise de risco: AHP para estimar os pesos dos fatores O, S e D. Em seguida: método EWGM para o ordenamento dos RPNs.
Failure mode and effects analysis based on D numbers and TOPSIS, 2019	Bian, T., Zheng, H., Yin, L., Deng, Y.	Duas ferramentas para a priorização: o emprego de “D-numbers”, derivados da Teoria de Dempster Shafer, porém conceitualmente modificados para admitir e aceitar informações incompletas, seguindo-se o emprego de TOPSIS, em sete passos: 1) listagem dos FMs nas tabelas com valores de 1 a 10, seguida de fatores relevância de risco, extraídos de uma tabela com valores arbitrários, variando, por exemplo de 1 a 10; 2) construção de uma matriz de avaliação com os FMs e os pesos dos fatores de risco expressos com números D; 3) conversão da matriz de avaliação com números D para uma matriz com números escalares; 4) normalização da matriz escalar com os pesos dos fatores de risco; 5) construção de uma matriz afetada pelos pesos; 6) determinação da solução ideal positiva e da solução ideal negativa para cada fator de risco; 7) cálculo da distância entre a solução ideal positiva e a negativa; 8) cálculo da distância de um dado FM às duas soluções do item 7 e ordenamento dos FMs
ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number	Antonella, Certa; Mario, Enea; Maria, Galante Giacomo; et al.	Técnica MCDM ELECTRE TRI para vincular FMs a riscos ordenados e predefinidos para permitir a avaliação da criticidade dos FMs do produto ou do sistema, ordenando os FMs a partir do mais alto para o mais baixo quanto às classes de risco.
An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty, 2016	Liu, Hu-Chen; You, Jian-Xin; Chen, Shouming; et al.	ELECTRE associada a um ambiente linguístico two tuple, do tipo $T = (s, \alpha)$, onde T é um elemento de dois componentes (two tuple), s é uma “informação linguística” e α é um valor numérico associado ao elemento linguístico. Associa as vantagens do ELECTRE, que permite a atribuição de pesos aos fatores O, S e D ao processamento dos termos “two tuple” para a priorização dos FMs. Diferentes membros do time de FMEA podem ter avaliações particulares. Emprega-se um operador médio híbrido para a construção de uma matriz de avaliações do grupo.
FlowSort-GDSS – A novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA, 2015	Lollia, F. et al	Estudo baseado na técnica GDSS – Group Decision Support System, apoiada por PROMETHEE ordena os FMs através de classes de prioridade. Os decisores fornecem um perfil de referência para os fatores de risco. Metodologia GDSS ordena os modos de falha a partir dos julgamentos dos decisores e dos perfis de referência dos FMs.
Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA, 2014	Chang, K.-H., Chang, Y.-C., Lee, Y.-T.	Os autores propõem a associação da técnica TOPSIS juntamente com DEMATEL para o ordenamento dos FMs
Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology, 2009	Chang, K.-H.	Os autores propõem um algoritmo mais abrangente, combinando o emprego do operador OWGA (ordered weighted geometric averaging) associado à técnica DEMATEL (decision-making trial and evaluation laboratory) para o processo de priorização
Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by DEMATEL, 2006	Seyed-Hosseini, S.M., Safaei, N., Asgharpour, M.J.	Referindo-se se a uma alegada deficiência do cálculo tradicional de não considerar relações indiretas entre componentes de um sistema e a sua dificuldade de processar sistemas complexos, com muitos subsistemas e componentes, os autores preconizam o emprego da técnica DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) como uma abordagem efetiva para analisar as mencionadas relações com respeito a serem diretas ou indiretas e com respeito à severidade (S). São apontadas as vantagens dessa técnica para incluir as relações indiretas na análise, na atribuição de FMs a tipos de alternativas e quanto à formação de grupos de alternativas em sistemas de grande porte

Fonte: Autor.

Em “A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis” (ANES; HENRIQUES; FREITAS, 2018), propõe-se uma nova metodologia fazendo uso de duas

funções: a função risco “*isosurface*” que prioriza três variáveis de risco considerando sua ordem de importância em um dado cenário de risco (por exemplo, pode-se priorizar S, O e D, nesta ordem ou adotar quaisquer outras ordens de priorização) e a função índice de priorização do risco, que prioriza três variáveis considerando pesos para elas. Segundo os autores, o método é de fácil aplicação e de baixa complexidade computacional.

Por sua vez, “*Failure Mode Prioritization by Improved RPN Calculation Method*” (WU; TIAN; ZHAO, 2014) é um trabalho que apresenta um método para a ordenação dos FMs introduzindo perdas, custos, tempo fora de operação, probabilidade de ocorrência e detectabilidade para o cálculo do RPN. O valor de cada fator é baseado na importância relativa de um dado FM, obtido pela comparação com a pior situação na área de influência do FM, em vez de julgamentos atribuídos por especialistas. O valor final do RPN é um número escalar variando de 0 (zero) a 1 (um), que mede a importância total comparada com a pior situação aceitável.

O quadro 2.8 mostra detalhes deste grupo de artigos.

O terceiro grupo de artigos engloba aplicações particularizadas que empregam técnicas ou metodologias que não se enquadram nos dois grupos anteriores para fins deste trabalho. Nesse sentido, o estudo “*Sensitivity analysis of FMEA as possible ranking method in risk prioritization*” (VÁNYI; POKORÁDI, 2018) considera a introdução de eletrônica embarcada em veículos e equipamentos e introduz uma análise de sensibilidade que decompõe a análise dos modos de falha em quatro níveis: nível de sistema, nível do efeito, nível de projeto e nível da causa do modo de falha. O método demanda grande esforço computacional, pois exige que os modos de falha tenham todos os seus valores de RPN calculados pelo modo tradicional da FMEA e, em seguida, recebam uma análise de sensibilidade através da comparação de cada RPN de cada modo de falha com a somatória de todos os valores de RPN dos demais modos de falha.

No artigo “*General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis*” (KIM; ZUO, 2018), a metodologia utiliza interrelações entre os três fatores O, S e D como alternativa para o cálculo tradicional e dá preferência ao tratamento do tema segundo duas abordagens, a saber: (i) o conceito de “*black box*” (o sistema é visto como uma caixa preta sobre a qual nada se sabe sobre seu interior, conhecendo-se apenas suas funções e os resultados que ela deve apresentar), e (ii) um conceito hierárquico, em que se analisa um modo de falha desde o componente até o efeito final deste modo de falha sobre o sistema ao qual ele pertence. Cada modo de falha é tratado ao longo da vida do sistema, estudando-se o ponto de sua vida útil em que ele acontece e estabelecendo-se critérios para a avaliação dos modos de falha.

Quadro 2.8 – Artigos visando à ordenação através de aplicações específicas

APLICAÇÕES ESPECÍFICAS / PARTICULARIZADAS		
A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis, 2018	Anes, V.; Henriques, E.; Freitas, M.; et al.	Uma metodologia para robustecer o processo de priorização fazendo uso de duas funções, a função risco “isosurface” que prioriza três variáveis de risco considerando sua ordem de importância em um dado cenário de risco (por exemplo, pode-se priorizar S, O e D, nesta ordem ou adotar quaisquer outras ordens de priorização) e a função índice de priorização do risco, que prioriza três variáveis considerando pesos para elas.
Evaluation of risk priority number (RPN) in design failure modes and effects analysis (DFMEA) using factor analysis, 2015	Sellappan, N., Nagarajan, D., Palanikumar, K.	Método do cálculo tradicional dos valores de RPN para todos os modos de falha e faz uso de métodos estatísticos para a priorização final. Essa metodologia é de aplicação bastante particularizada pois, segundo seus autores, deve ser usada quando: a) o time do processo tem divergências na atribuição dos valores de O, S e D; b) quando os valores médios de RPN são idênticos para mais de um modo de falha e quando os três fatores são considerados igualmente importantes
Expanded FMEA, 2015	Bluvband, Z., Grabov, P., Nakar, O.	Os autores propõem um aumento da efetividade da priorização de FMs através do emprego de uma ferramenta gráfica, descrita no trabalho. Com essa ferramenta a adequação de ações de melhoria sobre produtos/processos/serviços se faz de modo simplificado, por se basear na avaliação da viabilidade da ação de melhoria. Assim a proposta apoia tanto a viabilidade de implementação de uma ação corretiva quanto o impacto produzido por ela sobre o particular FM
Failure Mode Prioritization by Improved RPN Calculation Method, 2014	Wu, Juyi; Tian, Jin; Zhao, Tingdi	O trabalho apresenta um método para a priorização dos FMs introduzindo perdas, custos, tempo fora de operação, probabilidade de ocorrência e detectabilidade para o cálculo do RPN. O valor de cada fator é baseado na importância relativa de um dado FM, obtido pela comparação com a pior situação na área de influência do FM, em vez de julgamentos atribuídos por especialistas. O valor final do RPN é um número escalar variando de 0 a 1, que mede a importância total comparada com a pior situação aceitável
Design FMEA for a diesel engine using two risk priority numbers, 2012	Ling, D., Huang, H.-Z., Song, W., Liu, Y., Zuo, M.J.	A proposta deste trabalho consiste no emprego de dois conjuntos de RPN, o primeiro deles obtido a partir do cálculo tradicional, ou seja: $RPN = S \times O \times D$. Uma nova escala é introduzida para valores de prevenção P. Nesta escala medidas de prevenção são avaliadas quanto a sua capacidade de significativamente eliminar ou mitigar FMs, com valores entre 1 e 10, de modo que os menores valores são os mais seguros quanto à eliminação / mitigação dos FMs. Um quadro adicional é construído levando-se em conta as combinações entre os dois tipos de RPN já calculados e fornece as diretrizes para a priorização. Lém disso, o estudo recomenda que, havendo uma coincidência do valor tradicional de RPN entre duas ou mais falhas, deve-se priorizar levando em conta primeiramente S; seguida de O; seguida de P e finalmente de D. Trata-se de um estudo específico para motores diesel por utilizar recomendações e valores de falha específicos
One approach for improvement of FMEA in risk analysis and design optimization, 2010	Huang, M., Wang, Q., Li, Y.	O estudo procura reforçar os resultados da priorização nos casos em que duas ou mais falhas tem o mesmo valor de RPN e nos casos em que o time de decisores tem discordâncias nos valores de S, O ou D. A solução proposta é um novo RPN, designado como RPN-Robusto que, com o emprego de um processo estruturado de gerenciamento dos FMs, apoiado na ferramenta FIT – Fault Insertion Testing, procura determinar as relações entre os FMs, indicando o caminho para o ordenamento das falhas

Fonte: Autor.

O estudo “*An Evidential Failure Mode and Effects Analysis Using Linguistic Terms*” (LI et al., 2017) emprega termos linguísticos, para que os especialistas expressem seus julgamentos de “modo mais realístico”, seguido de um modo de transformar os julgamentos linguísticos em “atribuições básicas de probabilidade”. É feita uma atribuição de pesos aos

fatores O, S e D de modo que a avaliação do RPN permita a introdução de uma relativização da importância desses três fatores.

O estudo “*Human induced variability during failure mode effects analysis*” (BANGHART; BABSKI-REEVES; BIAN, 2016) apresenta os resultados iniciais de uma pesquisa que avaliou as fontes de variação das análises de FMEA originadas da variabilidade do processo de decisão humano. Avalia-se também o impacto das experiências dos analistas sobre as variáveis ligadas ao processo, com destaque para a avaliação da severidade e das medidas de mitigação, considerando também o efeito da disponibilidade de dados quanto a falhas e/ou acidentes. Trata-se de uma abordagem comportamental.

Finalmente, o artigo “*New Failure Mode and Effects Analysis: An Evidential Downscaling Method*” (DU et al., 2016) contém a proposta de um método para a redução das avaliações de risco baseada em evidências. Para essa finalidade, é utilizada uma abordagem de raciocínio evidencial, que expressa os julgamentos dos especialistas. Os julgamentos do time são transformados em números escalares com o emprego da média ponderada – pesos admitidos e estabelecidos no processo de discussão ao longo dos julgamentos. Calcula-se a distância média Euclidiana para a atribuição das expectativas básicas dentro da teoria de Dempster-Shafer. Essa metodologia, segundo os autores, reduz a complexidade computacional. A regra de combinação de Dempster é aplicada para agregar os julgamentos dos fatores de risco. O quadro 2.9 resume essas aplicações.

Quadro 2.9 – Artigos envolvendo abordagens diversas, não classificadas nos dois grupos anteriores

ABORDAGENS DIVERSAS		
General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis, 2018.	Kim, K.O., Zuo, M.J.	A priorização utiliza interrelações entre os três fatores O, S e D como alternativa para o cálculo tradicional. Tratamento do tema segundo duas abordagens, a saber: a) o conceito de "black box" (sistema visto como uma caixa preta: nada se sabe sobre seu interior, apenas suas funções e os resultados que elas devem apresentar), e b) um conceito hierárquico: um FM é analisado desde o componente até o efeito final deste FM sobre o sistema ao qual ele pertence. Cada modo de falha é tratado ao longo da vida do sistema, estudando-se o ponto de sua vida útil em que ele acontece e estabelecendo-se critérios para a avaliação dos modos de falha.
Sensitivity analysis of FMEA as possible ranking method in risk prioritization, 2016.	Ványi G., Pokorádi L.	Considerando a introdução de eletrônica embarcada em veículos e equipamentos, esta proposta introduz uma análise de sensibilidade que decompõe a análise dos modos de falha em quatro níveis, começando por nível de sistema, nível do efeito, nível de projeto e nível da causa do modo de falha. Alto esforço computacional: os FMs tem seus valores de RPN calculados pelo modo tradicional e, em seguida, recebem uma análise de sensibilidade através da comparação de cada RPN de cada modo de falha com a somatória de todos os valores de RPN dos demais modos de falha
An Evidential Failure Mode and Effects Analysis Using Linguistic Terms, 2017.	Li, Z., Xiao, F., Fei, L., Mahadevan, S., Deng, Y.	Estudo apresentado com o emprego de termos linguísticos: especialistas devem expressar seus julgamentos de "modo mais realístico", seguido de um modo de transformar os julgamentos linguísticos em "Atribuições básicas de probabilidade". É feita uma atribuição de pesos aos fatores O, S e D de modo que a avaliação do RPN permita a introdução de uma relativização da importância desses três fatores
New Failure Mode and Effects Analysis: An Evidential Downscaling Method, 2016.	Du, Y., Lu, X., Su, X., Hu, Y., Deng, Y.	Método para a redução das avaliações de risco baseada em evidências. Para isso é utilizada uma abordagem de raciocínio evidencial, que expressa os julgamentos dos especialistas. Os julgamentos do time são transformados em números escalares com o emprego da média ponderada – pesos admitidos e estabelecidos no processo de discussão ao longo dos julgamentos. Calcula-se a distância média Euclidiana para a atribuição das expectativas básicas dentro da teoria de Dempster-Shafer. Finalmente a regra de combinação de Dempster é aplicada para agregar os julgamentos dos fatores de risco
Human induced variability during failure mode effects analysis, 2016.	Banghart, M., Babski-Reeves, K., Bian, L.	Abordagem comportamental que apresenta os resultados iniciais de uma pesquisa que avaliou as fontes de variação das análises de FMEA originadas da variabilidade do processo de decisão humano. Avalia-se o impacto das experiências dos analistas sobre as variáveis ligadas ao processo, com destaque para a avaliação da severidade e das medidas de mitigação, considerando também o efeito da disponibilidade de dados quanto a falhas e/ou acidentes.

Fonte: Autor.

Em resumo, os diversos artigos analisados mostram a grande preocupação existente entre os estudiosos, engenheiros e técnicos das indústrias quanto à necessidade de aprimoração da FMEA, sempre a partir de sua forma tradicional de cálculo, objetivando disponibilizar algoritmos, métodos e ferramentas que facilitem a ordenação e possam levar em consideração a importância relativa dos critérios quando da análise dos modos de falha. As abordagens são diversas, algumas mais simples, outras mais complexas quanto aos cálculos computacionais, todas elas, porém, buscam dar uma contribuição para o enriquecimento dos resultados obtidos com a utilização da FMEA. Nesse mesmo sentido, o presente trabalho busca, na associação da FMEA com o ELECTRE III, um modo simples para robustecer os resultados da FMEA.

3. TÉCNICAS ELECTRE: APRESENTAÇÃO, PRINCÍPIOS E APLICAÇÃO

ELECTRE, o acrônimo de Elimination Et Choix Traduisant la Realité (ELiminação E esColha Expressando a REalidade), teve origem no final dos anos sessenta, com uma publicação de Bernard Roy que, atendendo ao pedido de uma empresa de consultoria (SEMA), desenvolveu o método ELECTRE para a escolha das melhores ações a partir de um conjunto de ações, a seguir denominado ELECTRE I. Um novo desenvolvimento do método resultou em Electre II, que surgiu em 1973, descrito em uma publicação de Roy e Batier.

ELECTRE III (ROY, 1978) surgiu como um posterior desenvolvimento, destinado à ordenação de alternativas julgadas com base em um conjunto de critérios, introduzindo pseudo-critérios para definir limiares de preferência, indiferença e veto relacionados às preferências individuais dos decisores (ALMEIDA, 2013; FIGUEIRA, GRECO, EHRGOTT, 2016). Um de seus objetivos foi aperfeiçoar ELECTRE II em problemas de ordenação (“ranqueamento”) (FIGUEIRA, GRECO, EHRGOTT, 2016). As alternativas são avaliadas aos pares dentro de um processo de sobreclassificação para se chegar à sua ordenação.

Os métodos ELECTRE receberam novas versões: ELECTRE IV (ROY; HUGONNARD, 1981), ELECTRE IS (ROY, 1985) e ELECTRE TRI (MOUSSEAU et al., 1999; YU, 1992).

3.1 Electre III: conceitos

Electre III, concebido como um método para ordenação, apoia-se na comparabilidade parcial, prevendo o emprego de quatro relações binárias, a saber: i) indiferença (I); ii) incomparabilidade (R); iii) preferência (P) e iv) “não preferência” (P^-) para estabelecer as relações de sobreclassificação. O método introduz pseudo-critérios e os parâmetros seguintes: a) p (preferência); b) q (indiferença) e c) v (veto), para a construção das relações (PAPADOULOS; KARAJIANNIDES, 2006). O algoritmo faz com que o veto, estabelecido pelos decisores, impeça que uma alternativa, a qual tenha um desempenho muito ruim em um dado critério, possa compensar seu desempenho com boas avaliações em outros critérios, reforçando a característica não compensatória do método.

ELECTRE III envolve a construção e o tratamento de relações de sobreclassificação entre as alternativas, com baixa complexidade computacional, conforme quadro 3.1 – Fluxograma do ELECTRE III.

Quadro 3.1 – Fluxograma do ELECTRE III

Fonte: adaptado de Carpinetti e Galo (2017).

3.2 A construção das relações de sobreclassificação

Uma alternativa tem uma dada avaliação e essa sua avaliação determinaria se essa dada alternativa é preferível a uma outra, configurando-se aqui a aplicação de um critério. Pseudo-critérios – vistos adiante, são introduzidos pelo ELECTRE III para que seja considerada a incerteza e a imprecisão dos dados e julgamentos em problemas complexos de decisão.

Os limiares de “preferência” (“p”) e “indiferença” (“q”) permitem a criação de pseudo-critérios para estabelecer relações entre duas alternativas A_1 e A_2 , do seguinte modo:

- i) A_1 e A_2 são indiferentes se a diferença de desempenho (ou de avaliação) entre elas é menor que o limiar de indiferença. A notação correspondente é $A_1 I A_2$.
 $A_1 I A_2$, se e somente se, $g(A_1) - g(A_2) \leq q$ (equação 3.1)

- ii) A Alternativa A_1 tem uma preferência fraca (é “não preferível”) comparada com a alternativa A_2 , se a diferença de desempenho entre elas estiver compreendida entre os limiares de preferência e indiferença. Notação: $A_1 P^- A_2$.
 $A_1 P^- A_2$, se e somente se, $q < g(A_1) - g(A_2) \leq p$ (equação 3.2)

- iii) A alternativa A_1 é preferível à alternativa A_2 se a diferença de desempenho entre elas é maior que o limiar de preferência. Notação: $A_1 \mathbf{P} A_2$.

$$A_1 \mathbf{P} A_2, \text{ se e somente se, } g(A_1) - g(A_2) \geq p \quad (\text{equação 3.3})$$

Nas relações acima, $g(A_i)$ é o desempenho da alternativa A_i , “p” e “q” são limiares de preferência e de indiferença respectivamente.

3.2.1 Índice de concordância

O índice de concordância é definido pela fórmula seguinte:

$$C(A_1, A_2) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot c_i(A_1, A_2), \quad (\text{equação 3.4})$$

onde $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, onde w_i são os pesos dos critérios.

Para as relações entre os critérios aplica-se a seguinte equação:

$$c_i(A_1, A_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_i(A_2) \leq g_i(A_1) + q_i \\ 0 & \text{if } g_i(A_2) \geq g_i(A_1) + p_i \\ \frac{g_i(A_1) + p_i - g_i(A_2)}{p_i - q_i}, & \end{cases} \quad (\text{equação 3.5})$$

3.2.2 Índice de discordância

Se a diferença de desempenho entre as alternativas A_1 e A_2 no critério i é maior que o limiar de veto v_i , não se pode afirmar que A_1 sobreclassifica A_2 .

Para o cálculo, usa-se a fórmula:

$$d_i(A_1, A_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_i(A_2) \leq g_i(A_1) + p(g_i(A_1)) \\ 1 & \text{se } g_i(A_2) \geq g_i(A_1) + v_i(g_i(A_1)) \\ \frac{g_i(A_2) - g_i(A_1) - p_i(g_i(A_1))}{v_i(g_i(A_1)) - p_i(g_i(A_1))}, & \end{cases} \quad (\text{equação 3.6})$$

Onde: p_i é o limiar de indiferença, v_i é o limiar de veto na alternativa i .

3.2.3 Índice de credibilidade

Considerando-se a concordância (Equação 3.4) e a discordância (Equação 3.6) o grau de credibilidade (equação 3.7) indica se a hipótese de sobreclassificação é verdadeira ou não.

$$S(A_1, A_2) = \begin{cases} C(A_1, A_2), & \text{se } d_i \leq C(A_1, A_2), \forall i \\ C(A_1, A_2) * \prod_{\{j \in \Omega: d_j(A_1, A_2) > C(A_1, A_2)\}}^n \frac{1 - d_j(A_1, A_2)}{1 - C(A_1, A_2)} & \text{(Equação 3.7)} \end{cases}$$

Verifica-se que, quando $D_i(A_1, A_2) = 1$, tem-se como consequência que $S(A_1, A_2) < 0$, porque $C(A_1, A_2) < 1$.

A definição de $S(A_1, A_2)$ é baseada no seguinte:

- (a) Quando não existe critério discordante, a credibilidade da relação de preferência é igual ao índice global de concordância;
- (b) Quando um critério discordante ativa o seu poder de veto, a assertiva não tem credibilidade e, assim, o índice é zero.
- (c) Para as situações restantes, nas quais o índice global de concordância é menor que o índice de discordância do critério discordante, o índice de credibilidade se torna menor que o índice global de concordância, por causa do efeito contrário neste critério (FIGUEIRA et al., 2004).

O índice $S(A_1, A_2)$ corresponde ao índice $C(A_1, A_2)$ enfraquecido pelos possíveis efeitos do veto. Aqui se aplica o conceito de discordância.

3.3 Ordenação

A ordenação é feita conforme os seguintes passos.

3.3.1 Tratamento dos pesos (w)

Para os cálculos os pesos são normalizados, de tal forma que sua soma seja igual a 1 (um). A procedimento de normalização pode ser visto no Quadro 3.3 – Normalização dos pesos.

Quadro 3.2 – Normalização dos pesos

	Critérios			
Peso	WC1	WC2	...	WCn
Peso normalizado	$WC1 / (WC1 + WC2 + \dots + WCn)$	$WC2 / (WC1 + WC2 + \dots + WCn)$	...	$WCn / (WC1 + WC2 + \dots + WCn)$

Fonte: Adaptado de Carpinetti e Galo (2017).

3.3.2 Nível de corte (λ)

A ordenação das alternativas demanda o emprego de níveis de corte segundo recomendações da literatura (Roy, 1985), a saber:

Nível de corte $s(\lambda)$.

$$\lambda_0 = \max S(A_1, A_2) \quad (\text{equação 3.8})$$

$$\lambda_1 = 0,3 - 0,15 \cdot \lambda_0 \quad (\text{equação 3.9})$$

$$s(\lambda) = \lambda_0 - \lambda_1. \quad (\text{equação 3.10})$$

3.3.3 Ordenação descendente ou otimista

Obtém-se a Matriz de Ordenação Descendente a partir de um nível de corte $s(\lambda)$, que represente o menor valor de um Índice de Credibilidade $S(A_1, A_2)$ para o qual se pode afirmar que $A_1 \succeq A_2$. A seguinte sequência de avaliação é utilizada:

Onde: I – Indiferente; R – incomparável; P – preferível; P^- Não preferível.

A pontuação final para a ordenação é avaliada com o emprego do índice $Q(A_1)$, de tal modo que:

$Q(A_1) = n.$ de alternativas para que “ A_1 ” supera – $n.$ de alternativas que superam “ A_1 ”.

No cálculo de $Q(A_1)$ são feitas as considerações seguintes:

- (i) $A_1SA_2 = A_1PA_2, A_1IA_2$ ou A_1RA_2
- (ii) se $A_1SA_2 = bSA_1$, então A_1IA_2 .

Caso haja empate, deve-se reduzir o nível de corte gradativamente até que uma pré-ordem completa seja obtida.

3.3.4 Ordenação ascendente ou pessimista

Obtém-se a Matriz de ordenação ascendente a partir de um nível de corte $s(\lambda)$ que represente o menor valor de um índice de credibilidade $S(A_1, A_2)$ em que se pode afirmar que A_1SA_2 . Aplica-se a seguinte sequência de avaliação:

A pontuação final para a ordenação é avaliada por meio do índice $Q(A_i)$, do seguinte modo:

- (a) a ordenação é feita do menor $Q(A_i)$ para o maior;
- (b) $Q(A_1) = n.$ de alternativas que “ A_1 ” supera – $n.$ de alternativas que superam “ A_1 ”;
- (c) para o cálculo de $Q(A_1)$, considera-se: $A_1RA_2 = A_1IA_2$; A_1SA_2 somente quando A_1PA_2 .

Em caso de empate, deve-se reduzir o nível de corte gradativamente até se obter uma pré-ordem completa.

3.3.5 Ordenação final

Calcula-se a ordenação final com base nas duas ordens retro calculadas, a descendente e a ascendente. Caso as ordens não sejam iguais, utiliza-se para a ordenação final a seguinte equação (CARPINETTI; GALO, 2017):

$$\text{Ordenação final} = \frac{\text{posição decrescente} + \text{posição crescente}}{2} \quad (3.11).$$

Caso a média aritmética acima ainda forneça uma ordenação com “empates” para algumas alternativas, a redução progressiva do valor de corte (λ) permite uma maior sensibilidade (e, conseqüentemente, um maior espaçamento entre as alternativas) na ordenação. Essa propriedade será demonstrada, na prática, no momento da apresentação da ordenação final e de estudos de sensibilidade.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO ELECTRE III À FMEA

4.1 Contextualização

Para permitir a visualização do conjunto da pesquisa de campo, foi elaborado o Quadro 4.1 – Protocolo da pesquisa de campo, contendo as informações-chave para o entendimento deste trabalho e sobre a forma como ele foi conduzido.

Quadro 4.1 – Protocolo da pesquisa de campo

PROTOCOLO DA PESQUISA DE CAMPO			
Pergunta de pesquisa	Como aprimorar a ordenação dos modos de falha de um processo FMEA através da aplicação do método ELECTRE III?		
Objetivo Geral	Aplicar o método ELECTRE TRI para a ordenação de modos de falha, de acordo com os critérios severidade, ocorrência e detecção do da FMEA e comparar os resultados com aqueles obtidos aplicando a técnica tradicional		
Objetivos específicos	<p>Objetivo específico "a":</p> <p>Levantamento bibliográfico de publicações sobre o tema FMEA para a identificação de trabalhos a respeito de novas formas de priorização dos modos de falha e sua apresentação</p>	<p>Objetivo específico "b":</p> <p>Apresentar, explicar e fundamentar a aplicação do ELECTRE III na priorização dos modos de falhas, de maneira que possa ser compreendida e adotada pelas equipes normalmente responsáveis pela realização de FMEAs;</p>	<p>Objetivo específico "c":</p> <p>Uma aplicação do método tradicional e do método proposto para um componente mecânico de um equipamento produzido em série, com uma discussão dos resultados alcançados.</p>
Perguntas específicas	Quais as principais objeções ao cálculo tradicional da FMEA e por quais motivos?	Como aplicar o método ELECTRE III a um processo FMEA, sobretudo quanto à determinação dos limiares e de seus parâmetros?	Como aplicar, na prática, o método ELECTRE III para a ordenação dos modos de falha de um processo FMEA, com testes de sensibilidade para sua validação?
Referencial teórico	Pesquisa nas bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE	Pesquisas nas bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE, particularmente sobre autores que aplicaram ELECTRE III para a ordenação de alternativas em processos MCDM	Aplicação do método ELECTRE III a partir da literatura específica e de estudos de diversos autores

Fonte: Autor.

Para a execução da pesquisa de campo, foram procuradas empresas que não somente pudessem abrir suas portas e propiciar um intercâmbio de informações, mas que, ao mesmo tempo, potencialmente pudessem aproveitar os resultados deste trabalho em suas atividades futuras. Assim foi identificada a empresa parceira apresentada adiante.

A empresa parceira (EP) tem fornecido máquinas “Router” em diversos tamanhos e com diferentes graus de complexidade ao longo de nove anos de atividade (explicação sobre a máquina Router será dada adiante).

Trata-se de uma empresa do ramo metalúrgico, com sede no interior do estado de São Paulo, que projeta, constrói, comercializa máquinas e presta serviços técnicos, responsabilizando-se também pelo pós-venda de seus produtos. Considerada a classificação do SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas) trata-se de uma microempresa (até dezenove empregados). Para conservar o seu “*status*” de microempresa, a terceirização de serviços é fortemente empregada, baseada em um criterioso processo de seleção e desenvolvimento de fornecedores. A EP tem o caráter de empresa montadora de máquinas, optando por menor investimento em “CAPEX” (sobre máquinas e equipamentos) e maior investimento em “OPEX” (despesas com terceirização, salários e outras operacionais – mais diretamente ligadas aos contratos de venda). A empresa se apresenta ao mercado como inovadora, flexível e disposta a atender os requisitos dos clientes com base em sua tecnologia e em seus valores.

Quanto à sua administração, a EP conta com dois sócios fundadores, ambos com experiência em áreas técnicas e projetos e com formação em engenharia. Colaboradores e subfornecedores respondem pela parte operacional e produção.

4.2 Realização da FMEA segundo cálculo tradicional

Para permitir uma visualização global da realização da FMEA segundo sua forma e cálculo tradicional, foi construído o fluxograma da Figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxograma da FMEA

Fonte: Autor.

4.2.1 Apresentação sobre máquinas Router

Para a boa compreensão sobre a máquina “Router”, sobre a qual foi feita a pesquisa de campo, torna-se necessária a apresentação de uma máquina “Router” de construção usual, que se faz a seguir.

4.2.1.1 Apresentação de uma máquina “Router” de construção usual

Preliminarmente e para um bom entendimento deste projeto, dos MFs e de outros aspectos técnicos é apresentada uma máquina “Router” de construção usual, que pode ser vista na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Foto de uma típica máquina Router

Fonte: Cortesia da empresa parceira.

Uma máquina “Router” possui uma mesa de alta rigidez, em construção metálica soldada ou fundida, disposta em um plano horizontal cujas dimensões variam arbitrariamente dependendo do produto a ser trabalhado sobre a mesa. Mesas que não tenham sido

adequadamente dimensionadas e/ou construídas podem apresentar deformações durante o funcionamento, com consequências adversas sobre a conformidade dos produtos obtidos.

Comumente, o produto é trabalhado (fresado ou cortado a “*laser*”) por meio de um ou mais cabeçotes fresadores, ou por meio de um ou mais conjuntos de corte a “*laser*”. Para simplicidade deste texto somente o cabeçote fresador será mencionado a partir deste ponto, embora seja sempre possível que, em vez de um cabeçote fresador, exista um conjunto para corte a “*laser*”.

Sobre a mesa é montado um pórtico, que se movimenta ao longo de uma de suas dimensões (seu comprimento ou, mais raramente, sua largura). A direção de deslocamento do pórtico sobre a mesa é horizontal e corresponde ao eixo de trabalho “*y*”. A direção “*x*” é definida como sendo paralela à viga do pórtico. Um terceiro eixo vertical “*z*” completa o sistema de eixos ortogonais cartesianos que define os movimentos da ferramenta de corte. O pórtico compõe-se de uma viga horizontal rigidamente conectada às suas duas colunas verticais, tal como uma letra “U” de lados e ângulos retos, disposta de cabeça para baixo. A altura útil de passagem sob o pórtico dependerá do produto a ser trabalhado e definirá a dimensão de suas colunas.

Esforços produzidos pela operação de usinagem da peça trabalhada ocorrem nas direções “*x*” (plano *xz*) e “*y*” (plano *yz*), demandando rigidez do pórtico para que não ocorram deformações indesejadas. A movimentação do(s) cabeçote(s) fresador(es) para a operação de usinagem acarreta o surgimento de acelerações importantes nas direções “*x*” e “*y*” (a aceleração na direção “*z*” é desprezada neste caso – ela é bem menos frequente e os esforços decorrentes dela são pequenos comparados aos que ocorrem em “*x*” e “*y*”). A soma da massa do pórtico e do(s) cabeçote(s) deve ser mantida tão reduzida quanto possível, para minimizar os esforços sobre a mesa e sobre o próprio pórtico. A rigidez do pórtico, todavia, exige a adoção de seções transversais robustas conflitando com o objetivo de se dimensionar e adotar um pórtico leve e compacto. Nesse ponto, reside uma das dificuldades do projeto do pórtico: é absolutamente necessário evitar que ele se deforme e ocasione produtos dimensionalmente não conformes.

Como o pórtico se movimenta ao longo de “*y*”, sua construção e, sobretudo, a união de sua viga horizontal com as colunas deve ser suficientemente rígida para garantir sua estabilidade no plano vertical *zy*, impedindo sua flexão ou torção. O projeto do sistema de apoio das colunas sobre a mesa tem uma importância considerável neste aspecto. Para facilitar a visualização deste modo de falta de rigidez pode-se imaginar a rotação do pórtico sobre o eixo “*x*”.

A estabilidade do pórtico (por hipótese considerado “flexível” nesta condição) na direção “x”, dentro do plano vertical xz dependerá da rigidez da união da viga com as colunas e do dimensionamento correto desses componentes. Semelhantemente ao caso anterior, pode-se imaginar a rotação do pórtico sobre o eixo “y”.

O pórtico apoia-se sobre a mesa de trabalho por meio de dois conjuntos de guias (apoiadas nos barramentos da mesa) dispostos no mesmo sentido que o eixo “y”, cada conjunto disposto em um dos lados da mesa, sob a respectiva coluna. Nos dois lados da mesa, dois servomotores ou motores de passo – que trabalham de forma sincronizada – comandam o movimento de avanço e sua velocidade no eixo “y”.

A estabilidade do pórtico (por hipótese considerado “rígido” nesta condição) no plano vertical “xz”, na direção “x” (direção contida no plano definido pelo próprio pórtico e suas colunas) é garantida pelo projeto adequado dos apoios das colunas do pórtico sobre o barramento, apoios esses que podem ser constituídos por guias e polias ou rolamentos espaçados entre si, como se fossem pés sobre o barramento sobre o qual deslizam.

Esses elementos de apoio devem ser suficientemente precisos e rígidos para impedir deformações ou deslocamentos indesejados do pórtico (considerado rígido, nesta hipótese) na direção “x” que possam comprometer dimensionalmente o produto produzido. A distância entre os pontos de apoio de cada coluna sobre a mesa, sempre tão pequena quanto possível para permitir que a máquina seja compacta e leve, deve ser suficientemente grande para assegurar resistência e estabilidade aos esforços de deslocamento rápido e aos esforços de corte sem causar perda de conformidade do produto.

A viga do pórtico contém, no plano xz, uma “placa vertical de suporte do fuso (ou do conjunto de fusos)”. Essa “placa de suporte” conecta-se à viga por meio de um conjunto de apoios e guias (ou barramentos) na direção horizontal (“x”) e se movimenta sobre a viga. Um eixo roscado e uma bucha guia ou um conjunto de pinhão e cremalheira constituem o acionamento dessa “placa de suporte” ao longo das guias. Um servo motor ou um motor de passo – conectado ao eixo roscado ou ao pinhão – permite seu deslocamento na direção “x”.

A “placa de suporte” acima descrita aloja sobre sua superfície uma (ou mais de uma – no caso da existência de diversos fusos) “sub-base” que suporta um fuso motorizado e sua respectiva ferramenta de corte. Guias permitem deslocamento da “sub-base” na direção vertical (“z”) – sobre a “placa de suporte”. De forma semelhante ao acionamento da “placa de suporte”

sobre a viga do pórtico, há uma motorização, para a movimentação da sub-base sobre a placa de suporte na direção “z”.

O conjunto motorizado fresador desloca-se no sentido vertical (eixo “z”), propellido por um motor elétrico (de passo ou por um servo motor) ou, em casos mais simples, movido por um cilindro pneumático.

O movimento da ferramenta de corte (usualmente uma fresa) executado de forma sincronizada entre os três eixos “x”, “y” e “z” produzirá um trabalho em duas ou três dimensões, de acordo com um programa de controle numérico (“CNC” – *Computer Numeric Control*), que pode gerar produtos bi ou tridimensionais.

A peça a ser produzida pode originar-se de uma placa plana ou de um bloco de madeira, de *Medium Density Fiberboard* (MDF), de plástico (PVC – policloreto de vinila, PP – polipropileno, PU – poliuretano, PE – polietileno etc.) ou metálico. Placas de sinalização bidimensionais, modelos tridimensionais de fundição, placas para a impressão de carimbos, peças planas de aço, alumínio ou outro metal, cortadas segundo um desenho bi ou tridimensional são produtos comuns.

4.2.1.2 Apresentação da máquina “Router” sobre a qual se realizou a pesquisa de campo

O presente trabalho apoiou o projeto e a construção de uma máquina “Router” destinada à produção dedicada de discos planos de MDF.

Esses discos de MDF são insumos para a produção de carretéis para acondicionamento de cabos e fios. A empresa cliente formulou um contrato de compra prevendo muitas proporcionais à importância da máquina em seu processo produtivo, onde a maior parte da produção será baseada nesta nova máquina. Em função disso, a proposta de trabalho desta pesquisa de campo tornou-se importante neste caso.

A responsabilidade tanto quanto ao bom funcionamento da máquina, como quanto aos aspectos financeiros embasaram a decisão de aplicar a presente proposta da pesquisa de campo, com a expectativa de obtenção de resultados seguros quanto à produção horária, à conformidade dos produtos obtidos e quanto ao funcionamento da máquina.

Foi projetada e construída uma máquina “Router” com comando CNC, provida de uma mesa de 2800 mm (“x”) por 2000 mm (“y”), para usinar placas de MDF, de dimensões 2750 (sobre “x”) x 1830 (sobre “y”) mm, com nove cabeçotes fresadores.

Adicionalmente, a máquina é equipada com um sistema de sujeição das chapas de MDF a vácuo sobre a mesa de trabalho e deve disponibilizar ar sob vácuo para o despoeiramento do campo de trabalho. O avanço de corte e o avanço de deslocamento podem atingir 20 m/min.

Trabalhando-se com o pórtico paralelo ao comprimento da chapa (2750 mm) foi possível a instalação de nove cabeçotes fresadores (ao passo que, se o pórtico fosse paralelo à largura das chapas somente seis cabeçotes poderiam ser previstos). Assim são produzidas “linhas” com nove discos de MDF (diâmetro aprox. 280 mm) simultaneamente. Cada chapa produzirá seis “colunas” de nove discos cada uma.

Usinando-se ao mesmo tempo, uma linha formada por nove discos, tudo se passa – para fins de produção horária, como se o tempo de usinagem para os nove discos fosse o tempo requerido para um único disco. Nesta disposição construtiva, são produzidas seis colunas ao longo da largura da chapa (1830mm), que coincide com o curso da chapa através da máquina, permitindo que se obtenha o menor tempo possível de passagem de uma chapa. Esse tempo de passagem é a soma do tempo para a usinagem de seis discos mais o tempo necessário para que o pórtico percorra os espaçamentos entre as fileiras de discos (1830 mm, no total). A velocidade de usinagem (também chamada de avanço de corte) nos eixos “x” e “y” obedece ao limite de velocidade de trabalho da fresa para o material MDF (velocidade limitada pela fresa e pelo próprio material) e a velocidade de translação sem usinagem (também chamada avanço rápido) – dadas as exigências funcionais – objetiva a obtenção do menor tempo de percurso do pórtico enquanto se posiciona para a usinagem. Em resumo, procura-se obter o menor tempo de passagem (menor tempo de ciclo) de uma chapa. A máquina é mostrada na Figura 4.3.

Figura 4.3 – máquina “Router” de nove cabeçotes sobre a qual se aplicou o trabalho de campo.

Fonte: Cortesia da empresa parceira.

4.2.2 Composição do Time de “Experts”

Os dois sócios fundadores, com formação em engenharia, foram escolhidos como os peritos que realizaram a FMEA e que acompanharam o desenrolar do projeto de pesquisa de

campo. Para fins de simples referência, eles foram denominados “Expert 1” e “Expert 2”. Quando houver referência ao conjunto formado pelos dois peritos, eles serão simplesmente denominados “Experts”.

4.2.3 Processo de determinação dos Modos de Falha (MFs)

Os MFs compreendidos neste trabalho têm sua origem: a) no histórico obtido das anotações, cálculos e discussões feitas durante o projeto; b) nos registros e da interpretação de reclamações dos clientes das máquinas anteriormente fornecidas; c) nos registros dos atendimentos em garantia e assistência técnica de máquinas “Router” fornecidas nos últimos anos; e d) nos registros decorrentes de serviços prestados para clientes que possuem máquinas “Router” – produzidas por outro fabricante.

Dada a grande semelhança dos trabalhos executados pelas máquinas “Router” que utilizam cabeçotes fresadores, dos produtos obtidos e do processo de obtenção desses produtos torna-se válido incluir neste estudo os MFs observados nessas outras máquinas de outras origens – que correspondem ao item “d” do parágrafo anterior.

Sem perda de validade para os fins deste trabalho, foram considerados apenas os MFs ligados aos aspectos de construção mecânica e desprezadas as abordagens sobre a parte elétrica de força e de comando. Esses componentes não se diferenciam quando se consideram as demais máquinas já produzidas pela EP, tendo sofrido considerável amadurecimento ao longo do tempo.

A máquina estudada tem os seguintes diferenciais relevantes: a) a quantidade de cabeçotes fresadores (nove unidades); b) as dimensões da área de trabalho acarretando a importante largura do pórtico (distância entre as suas colunas) para permitir a passagem de chapas de 2750 mm; c) a soma da massa do pórtico e da massa dos nove cabeçotes fresadores bastante elevada quando comparada à massa do mesmo conjunto em máquinas convencionais (de apenas um cabeçote); d) a velocidade de usinagem e de deslocamento de até 20 m/min; e) a precisão dimensional das peças produzidas; e f) destinação da máquina para produção seriada.

Considerando as exigências do cliente e as especificações dos discos de MDF a produzir foi feito um estudo para identificar os MFs que, direta ou indiretamente, acarretam:

- a) falta de conformidade da qualidade do fresamento quanto ao bom acabamento e concordância das linhas cortadas (fresadas);
- b) falta de conformidade quanto à circularidade do disco e de seus furos;
- c) falta de conformidade (dimensional) no posicionamento relativos do centro do disco em relação ao centro do furo do eixo do carretel e aos centros dos demais furos;

d) falta de conformidade na precisão dimensional dos diâmetros dos furos do disco.

Essas potenciais não-conformidades do produto (“a” a “d”) foram abrangidas dentro do conjunto de MFs ligados à construção da máquina, descritos adiante.

Os carretéis da Figura 4.4 ilustram os produtos previstos. Observação: a máquina em questão produz apenas os discos que fazem parte do carretel. O eixo do carretel é produzido a partir de um tubo. A montagem do carretel ocorre em outra estação de trabalho). A Figura 4.5 mostra, esquematicamente, operações de controle dimensional sobre o carretel.

Figura 4.4 – Exemplos de carretéis produzidos a partir dos discos de MDF

Fonte: Cortesia da empresa parceira.

Figura 4.5 – exemplo de operação de controle dimensional sobre o carretel

Fonte: Cortesia da empresa parceira.

4.2.3.1 Modos de Falha ligadas ao dimensionamento e à fabricação da máquina

Na definição, estudo e seleção dos MFs, consideraram-se apenas os elementos principais da máquina, a saber: a mesa; o pórtico; as guias e apoios do pórtico sobre a mesa; a placa vertical de suporte do conjunto de fusos, suas guias e acionamento; as placas de suporte dos fusos individuais sobre a placa de suporte do grupo de fusos, suas guias e acionamento e o sistema de vácuo. Esses componentes representam as grandes diferenças entre a máquina base para a FMEA e os componentes das demais máquinas já produzidas. Não foram abordados os elementos de fixação e componentes pertencentes a subconjuntos menores porque se

considerou que esses elementos e componentes, sendo iguais ou, às vezes, idênticos aos elementos já empregados em várias outras máquinas, estão suficientemente bem desenvolvidos e dimensionados.

(i) MESA: Falta de rigidez e estabilidade dimensional da mesa, no plano x-y (insuficiente para assegurar a conformidade do produto). Obs.: a obtenção de uma mesa nivelada no plano horizontal é realizada com o emprego de amortecedores de vibração de altura ajustável conhecidos no mercado como “vibra-stop”.

(ii) PÓRTICO:

a) Falta de rigidez e estabilidade dimensional do pórtico no plano y-z (na direção paralela ao seu deslocamento (rotação em torno de “x”) ou “Instabilidade dimensional do pórtico no plano yz” admitindo-se “flexibilidade excessiva” do pórtico, conforme croquis da Figura 4.6.

Figura 4.6 – Ilustração: deformação do pórtico no plano y-z

Fonte: Autor.

b) Falta de rigidez e estabilidade dimensional do pórtico no plano x-z (plano vertical que passa pela viga do pórtico e por suas duas colunas (“rotação” em torno de “y”), conforme ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 Ilustração: deformação do pórtico no plano x-z

Fonte: Autor.

c) Oscilação (por hipótese, com “flexibilidade zero”) sobre o eixo x (excesso de folga no sistema guias / apoios).

(iii) PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS:

a) oscilação excessiva em torno do eixo x – no plano yz;

b) oscilação excessiva em torno do eixo y – no plano xz;

c) oscilação excessiva em torno do eixo z – no plano xy.

(iv) SISTEMA DE SUPORTE DOS FUSOS INDIVIDUAIS:

a) falta de rigidez – no plano yz – em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos;

b) falta de rigidez – no plano xz – em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos;

c) falta de rigidez – no plano xy – em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos.

(v) RUÍDO EM OPERAÇÃO:

Ruído acima de 85 dBA – em operação de avanço de corte ou avanço rápido.

(vi) SISTEMA DE VÁCUO / FIXAÇÃO DA PLACA MDF:

a) vazão insuficiente para assegurar a fixação da placa;

b) pressão (vácuo) insuficiente;

c) excesso de perda de vácuo na tubulação;

d) excesso de perda de vácuo nas válvulas;

e) ruído excessivo em operação

(vi) SISTEMA DE ASPIRAÇÃO DE POEIRA:

a) vazão insuficiente para a aspiração de pó;

b) vácuo insuficiente;

c) excesso de perda de vácuo nas válvulas;

d) ruído excessivo.

4.2.4 Modos de falha considerados

Da análise dos dados existentes, mencionados no início desta seção, foram selecionados para análise e para a realização da FMEA, em sua forma tradicional, vinte MFs, conforme o quadro 4.2 – Descrição dos modos de falha.

Quadro 4.2 – Descrição dos modos de falha identificados para estudo

N.	Descrição do modo de falha (MdF)	N.	Descrição do modo de falha (MdF)
1	Mesa: Falta de rigidez da mesa no plano xy	11	CONJUNTO DA MÁQUINA: Ruído acima de 85 dBA - em operação
2	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano xz	12	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - vazão vácuo insuficiente
3	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano yz	13	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - pressão vácuo insuficiente
4	Pórtico: Oscilação sem deformação angular sobre o eixo x (excesso de folga nas guias)	14	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda vacuo na tubulação
5	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo x – no plano yz	15	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda de vacuo nas válvulas
6	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo y – no plano xz	16	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - ruído excessivo
7	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo z – no plano xy	17	ASPIRAÇÃO POEIRA - vazão insuficiente
8	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano yz - em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	18	ASPIRAÇÃO POEIRA - vacuo insuficiente
9	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xz - em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	19	ASPIRAÇÃO POEIRA - excesso perda vacuo nas válvulas
10	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xy - em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	20	ASPIRAÇÃO POEIRA - ruído excessivo

Fonte: Autor.

4.2.5 Seleção das tabelas com as avaliações para O (Ocorrência), S (Severidade) e D (Detecção)

Após o estudo de diferentes tabelas preconizadas por diversos autores, os peritos escolheram as seguintes tabelas para Ocorrência, Severidade e Detecção, extraídas de Palady, 2007, conforme Quadro 4.3; Quadro 4.4 e Quadro 4.5.

Quadro 4.3 Escala para Ocorrência

DESCRIÇÃO DA ESCALA DE OCORRÊNCIA	GRAU
Extremamente remoto, altamente improvável	1
Remoto improvável	2
Pequena possibilidade de ocorrência	3
Pequeno número de ocorrências	4
Espera-se um número ocasional de falhas	5
Ocorrência moderada	6
Ocorrência freqüente	7
Ocorrência elevada	8
Ocorrência muito elevada	9
Ocorrência certa	10

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

Quadro 4.4 – Escala para Severidade

DESCRIÇÃO DA ESCALA DE SEVERIDADE	GRAU
Efeito não percebido pelo cliente	1
Efeito bastante insignificante, percebido pelo cliente, entretanto, não faz com que ele procure serviço ou garantia	2
Efeito insignificante, percebido pelo cliente, entretanto não faz com que o cliente procure garantia ou serviço	3
Efeito bastante insignificante, percebido pelo cliente, fazendo com que o cliente procure garantia ou serviço	4
Efeito pequeno, inconveniente para o cliente, entretanto não faz com que ele procure garantia ou serviço	5
Efeito pequeno, inconveniente para o cliente, fazendo com que ele procure garantia ou serviço	6
Efeito moderado, que prejudica o desempenho do equipamento, levando a uma falha grave ou a uma falha que pode impedir a execução das funções do equipamento	7
Efeito significativo, resultando em falha grave; entretanto não coloca a segurança do cliente em risco e não resulta em custo significativo da falha	8
Efeito crítico, que provoca a insatisfação do cliente, interrompe as funções do equipamento, gera custo significativo da falha e impõe um leve risco de segurança (não ameaça a vida nem provoca incapacidade permanente) ao cliente	9
Efeito perigoso, ameaça à vida ou pode provocar incapacidade permanente ou outro custo significativo da falha, que coloca em risco a continuidade operacional	10

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

Quadro 4.5 Escala de valores para Detecção

DESCRIÇÃO DA ESCALA DE DETECÇÃO	GRAU
Sistema de revisão do projeto bastante eficaz, programas amadurecidos de qualidade e confiabilidade, controles de processo no estado da arte	1
Revisões de projeto eficazes, implementação de programas de qualidade e confiabilidade, controles de processo altamente automatizados	2
Ênfase nas revisões de projeto, programas de qualidade totalmente desenvolvidos e implementados, treinamento em andamento e implementação parcial de programas de confiabilidade, processo automatizado para a maioria das operações	3
Programa de qualidade em vigor, conscientização da confiabilidade sem um programa formal, revisões de projeto parcialmente implementadas, um mix de controles de processo automatizados e com intervenção humana.	4
Programas de qualidade desenvolvidos mas ainda não totalmente implementados, ausência de revisão formal de projeto, alguns controles de processo automatizados dependendo da adesão aos procedimentos operacionais	5
Implementação dos estágios iniciais do programa de qualidade, poucos controles de processo automatizados, implementação parcial de procedimentos operacionais	6
Implementação parcial de métodos de qualidade, planos de inspeção de amostras e auditorias aleatórias, 100% de inspeção	7
Totalmente dependente da auto-inspeção do operador com inspeção periódica do controle de qualidade, métodos não implementados, ausência de procedimentos formais	8
Totalmente reativo aos problemas identificados durante a fabricação, ausência de programas formais, alguma conscientização da qualidade do produto	9
Ausência de sistemas implementados, nenhuma conscientização da qualidade, definição inconsistente da qualidade do produto - baseada em julgamento individual	10

Fonte: Adaptado de Palady (2007).

4.2.6 Atribuição de julgamentos O, S e D aos MFs pelos “Experts”

Primeiro passo: providência para a obtenção dos julgamentos dos “Experts” isentos de pressão entre eles. Julgamentos emitidos isoladamente pelos “Experts”.

Segundo passo: reunião para nivelamento e homogeneização da forma de avaliação e julgamento. Houve concordância para o descarte dos primeiros julgamentos.

Terceiro passo: novos julgamentos. Novos resultados parciais após o nivelamento encaminhados para agregação. Os julgamentos constam dos Quadros 4.6 - Julgamentos do “Expert” 1 e Quadro 4.6 – Julgamentos do “Expert” 2.

Quadro 4.6 – Julgamentos do Expert 1 – após nivelamento

ITEM	DESCRIÇÃO	O	S	D	RPN Ex 1
1	Mesa: Falta de rigidez da mesa no plano xy	5	7	7	245
2	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano xz	7	7	8	392
3	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano yz	7	7	8	392
4	Pórtico: Oscilação sem deformação angular sobre o eixo x (excesso de folga nas guias)	7	8	5	280
5	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo x – no plano yz	7	7	6	294
6	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo y – no plano xz	7	7	6	294
7	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo z – no plano xy	6	7	5	210
8	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano yz - em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	6	210
9	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xz - em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	6	7	5	210
10	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xy - em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	7	245
11	Ruído acima de 85 dBA - em operação	4	7	6	168
12	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - vazão vácuo insuficiente	5	7	3	105
13	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - pressão vácuo insuficiente	6	7	4	168
14	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda vacuo na tubulação	5	7	3	105
15	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda de vacuo nas válvulas	3	7	3	63
16	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - ruído excessivo	5	6	5	150
17	ASPIRAÇÃO POEIRA - vazão insuficiente	4	7	3	84
18	ASPIRAÇÃO POEIRA - vacuo insuficiente	4	7	6	168
19	ASPIRAÇÃO POEIRA - excesso perda vacuo nas válvulas	4	7	3	84
20	ASPIRAÇÃO POEIRA - ruído excessivo	4	7	6	168

Fonte: Autor.

Quadro 4.7 – Julgamentos do “Expert” 2 após nivelamento

ITEM	DESCRIÇÃO	O	S	D	RPN Ex 2
1	Mesa: Falta de rigidez da mesa no plano xy	6	6	6	216
2	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano xz	5	6	7	210
3	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano yz	7	6	7	294
4	Pórtico: Oscilação sem deformação angular sobre o eixo x (excesso de folga nas guias)	6	7	5	210
5	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo x – no plano yz	6	6	5	180
6	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo y – no plano xz	6	6	5	180
7	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo z – no plano xy	5	6	6	180
8	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano yz - em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	5	175
9	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xz - em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	7	6	4	168
10	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xy - em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	6	6	5	180
11	Ruído acima de 85 dBA - em operação	4	6	5	120
12	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - vazão vácuo insuficiente	5	6	3	90
13	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - pressão vácuo insuficiente	5	6	4	120
14	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda vacuo na tubulação	4	6	3	72
15	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda de vacuo nas válvulas	3	7	3	63
16	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - ruído excessivo	5	5	5	125
17	ASPIRAÇÃO POEIRA - vazão insuficiente	4	6	3	72
18	ASPIRAÇÃO POEIRA - vacuo insuficiente	4	6	5	120
19	ASPIRAÇÃO POEIRA - excesso perda vacuo nas válvulas	3	7	3	63
20	ASPIRAÇÃO POEIRA - ruído excessivo	3	7	4	84

Fonte: Autor.

4.2.7 Análise e agregação dos julgamentos

4.2.7.1 Agregação “pessimista”

Nesta agregação, para cada alternativa e para cada critério, foi considerada a maior avaliação (avaliação mais alta). Houve uma clara predominância dos julgamentos do “Expert” 1 sobre os julgamentos do “Expert” 2, porque o “Expert” 1 costumeiramente atribuiu avaliações mais altas que o “Expert” 2. Como resultado os valores de RPN aumentaram em relação aos julgamentos iniciais feitos isoladamente. O “Experts” concordaram em denominar como “pessimista” essa agregação, que contém os maiores valores de RPN dentre todas as anteriores. Houve concordância quanto à necessidade de se fazer uma nova agregação que, de modo mais inclusivo, permitisse uma participação melhor balanceada nos julgamentos. A denominada agregação “pessimista” será utilizada para balizar os resultados da aplicação do ELECTRE III. Esta agregação é mostrada no Quadro 4.8 – Agregação pessimista.

Quadro 4.8 – Agregação “pessimista”

ITEM	DESCRIÇÃO	O	S	D	RPN pessim.
1	Mesa: Falta de rigidez da mesa no plano xy	6	7	7	294
2	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano xz	7	7	8	392
3	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano yz	7	7	8	392
4	Pórtico: Oscilação sem deformação angular sobre o eixo x (excesso de folga nas guias)	7	8	5	280
5	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo x – no plano yz	7	7	6	294
6	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo y – no plano xz	7	7	6	294
7	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo z – no plano xy	6	7	6	252
8	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano yz - em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	6	210
9	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xz - em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	7	7	5	245
10	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xy - em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	7	245
11	Ruído acima de 85 dBA - em operação	7	6	5,5	231
12	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - vazão vácuo insuficiente	7	3	3	63
13	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - pressão vácuo insuficiente	6	7	4	168
14	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda vacuo na tubulação	5	7	3	105
15	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - excesso de perda de vacuo nas válvulas	3	7	3	63
16	FIXAÇÃO DA PLACA MDF - ruído excessivo	5	6	5	150
17	ASPIRAÇÃO POEIRA - vazão insuficiente	4	7	3	84
18	ASPIRAÇÃO POEIRA - vacuo insuficiente	4	7	6	168
19	ASPIRAÇÃO POEIRA - excesso perda vacuo nas válvulas	4	7	3	84
20	ASPIRAÇÃO POEIRA - ruído excessivo	4	7	6	168

Fonte: Autor.

A análise da ordenação dos modos de falha a partir da agregação retro mencionada permitiu as seguintes constatações: a) considerando-se os julgamentos individuais, são coincidentes os dez MFs mais críticos (RPN mais elevados); b) em ambos os julgamentos, nota-se um intervalo de valores de RPN mais dilatado entre o décimo e o décimo-primeiro MF.

Como consequência, convencionaram os “Experts” que esses dez menos críticos MFs não seriam considerados no restante do trabalho, por constituírem problemas menores e riscos também menores. Entre os dez primeiros (mais importantes quanto à criticidade) modos de falha há o diversos “empates”, a saber: dois MFs itens 2 e 3 (com RPN = 392); três MFs itens 1, 5 e 6 (com RPN = 294) e dois outros itens 9 e 10 (com RPN = 245), como se pode ver no Quadro 4.9. A partir deste ponto, portanto, as atenções foram concentradas apenas nos dez primeiros modos de falha.

Os dez itens considerados constam do Quadro 4.9 – Modos de falha considerados, julgamentos e RPN.

Quadro 4.9 – Modos de falha considerados, julgamentos e RPN

ITEM	DESCRIÇÃO	O	S	D	RPN pessim.
1	Mesa: Falta de rigidez da mesa no plano xy	6	7	7	294
2	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano xz	7	7	8	392
3	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano yz	7	7	8	392
4	Pórtico: Oscilação sem deformação angular sobre o eixo x (excesso de folga nas guias)	7	8	5	280
5	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo x – no plano yz	7	7	6	294
6	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo y – no plano xz	7	7	6	294
7	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo z – no plano xy	6	7	6	252
8	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano yz - em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	6	210
9	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xz - em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	7	7	5	245
10	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xy - em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	7	245

Fonte: Autor.

4.2.7.2 Agregação pela média aritmética dos valores dos julgamentos

Nesta agregação, para cada modo de falha e para cada critério foram atribuídos valores iguais à média aritmética dos julgamentos individuais, com a consequente obtenção de novos valores de RPN – mais baixos que os valores da agregação anterior “pessimista”. O Quadro 4.10 – Quadro de julgamentos pela média aritmética contém os dados envolvidos.

Quadro 4.10 – Quadro de julgamentos pela média aritmética

ITEM	DESCRIÇÃO	O	S	D	RPN m
1	Mesa: Falta de rigidez da mesa no plano xy	5,5	6,5	6,5	232
2	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano xz	6	6,5	7,5	293
3	Pórtico: Instabilidade do pórtico no plano yz	7	6,5	7,5	341
4	Pórtico: Oscilação sem deformação angular sobre o eixo x (excesso de folga nas guias)	6,5	7,5	5	244
5	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo x – no plano yz	6,5	6,5	5,5	232
6	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo y – no plano xz	6,5	6,5	5,5	232
7	PLACA DE SUPORTE DO CONJUNTO DE FUSOS: oscilação em torno do eixo z – no plano xy	5,5	6,5	5,5	197
8	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano yz - em torno do eixo x, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5	7	5,5	193
9	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xz - em torno do eixo y, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	6,5	6,5	4,5	190
10	SISTEMA DE SUPORTE DO FUSO INDIVIDUAL - Oscilação - no plano xy - em torno do eixo z, do sistema de suporte do fuso individual sobre a placa que suporta o conjunto de fusos	5,5	6,5	6	215

Fonte: Autor.

A análise do quadro acima mostra que houve uma dispersão dos valores de RPN assim calculados, havendo apenas três itens “empatados” (itens F1, F5 e F6), que ficariam no quarto lugar, considerando-se o ordenamento pelo valor do RPN. Não houve outros empates. Para melhor visualização, a ordenação consta do Quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Ordenação segundo FMEA, julgamentos pela média aritmética.

ORDENAÇÃO FMEA TRADICIONAL JULGAMENTOS PELA "MÉDIA ARITMETICA"								
ordem	F3	F2	F4	F1, F5, F6	F10	F7	F8	F9

Para fins de comparação, é apresentado o Quadro 4.12 contendo a ordenação obtida da agregação “pessimista”, onde se encontram vários modos de falha com o mesmo valor de RPN e, portanto, com a mesma posição no ordenamento.

Quadro 4.12 – Ordenação segundo FMEA, julgamentos “pessimistas”

ORDENAÇÃO FMEA TRADICIONAL "JULGAMENTOS PESSIMISTAS"						
ordem	F2, F3	F1, F5, F6	F4	F7	F9, F10	F8

4.3 Aplicação do Electre III para a ordenação dos modos de falha

4.3.1 Definições para a aplicação

A aplicação do ELECTRE III foi feita a partir da FMEA, utilizando-se os dez modos de falha considerados e os critérios O, S e D. Como resultado da FMEA, foi adotada a agregação obtida pela média aritmética dos julgamentos e se convencionou que a agregação “pessimista” também será considerada para se ter uma base de comparação mais ampla.

O apêndice, disposto no final deste trabalho, apresenta as tabelas em Excel mais importantes para permitir o entendimento dos cálculos feitos segundo o algoritmo do Electre III. Todas as tabelas foram receberam um texto explicativo para facilitar seu entendimento.

4.3.1.1 Construção dos pseudo-critérios

Pseudo-critérios são usados para que seja considerada a imprecisão, a incerteza e a falta de acurácia na elaboração dos julgamentos, quando se trata de resolver problemas complexos. Os parâmetros “preferência” (p) e “indiferença” (q) são aqui aplicados para esse fim (INFANTE et al., 2013).

As definições do método ELECTRE III para os parâmetros foram utilizadas, na prática, para a construção dos pseudo-critérios, a saber:

- a) As alternativas A e B são indiferentes se a diferença de suas performances é menor que o limiar de indiferença. A indiferença será representada por I. Esse raciocínio aplica-se a cada critério “i”.

$$A \text{ I } B, \text{ se e somente se, } g(A) - g(B) \leq q \quad (\text{equação 4.1})$$

- b) A alternativa A é fracamente preferida quando comparada com a alternativa B se a diferença entre suas performances se situar entre os limiares de indiferença e preferência. A indiferença será representada por P^- , para cada critério “i”.

$$A \text{ } P^- \text{ } B, \text{ se e somente se, } q < g(A) - g(B) \leq p \quad (\text{equação 4.2})$$

- c) A alternativa A é preferível à B quando a diferença de suas performances é maior que o limiar de preferência. Representação: P, para cada critério “i”.

$$A P B, \text{ se e somente se, } g(A) - g(B) \geq p \quad (\text{equação 4.3})$$

- d) Índice de concordância C (A, B)

O índice de concordância C (A, B) indica a verdade sobre a afirmação “alternativa A é superior à alternativa B”, representada por A S B.

O índice de concordância C (A, B), a partir de sua definição, permite inferir que:

- se $g(A) + q \geq g(B)$, (equação 4.4) então as alternativas A e B são indiferentes, acarretando acordo sobre a afirmação “A tem desempenho superior a B”;

- se $g(A) + p \leq g(B)$, (equação 4.5) então a alternativa B é preferível à A, e é falso que A tem desempenho superior a B;

- se $q < g(B) - g(A) < p$, (equação 4.6) então B tem desempenho fracamente superior a A, o que permite uma concordância parcial com a afirmação “A tem desempenho superior a B”;

Como os julgamentos foram atribuídos em degraus iguais a 0,5; foram atribuídos os valores de $p = 0,1$ e $q = 0,6$ (menores valores possíveis); que todavia deverão ser testados quanto ao fornecimento de ordenações que façam sentido para os “Experts” e, que possam ser aceitas por eles. Da mesma forma tem-se $p = 0,1$; $q = 1,0$ e $v = 1,1$, para a tabela com graus inteiros.

Para a determinação do valor do veto “v”, foram usadas as equações dos índices de discordância, conforme se segue.

- e) O índice de discordância D (A, B)

O índice de discordância compara os desempenhos das alternativas e põe ressalvas (discordâncias) sobre a afirmação que “uma dada alternativa tem desempenho superior a outra”, do seguinte modo:

- se $g(A) + v \leq g(B)$, (equação 4.7) a diferença entre o desempenho da alternativa A e alternativa B excede o limiar de veto, acarretando total discordância com a afirmação “A tem desempenho superior a B”.

- se $g(A) + p \geq g(B)$, (equação 4.8) então B é fracamente preferível a A, entendendo-se que não há discordância quando se diz que a alternativa A tem desempenho superior a B.

- se $p < g(A) - g(B) < v$, (equação 4.9) então alternativa B é preferível à alternativa A, acarretando uma leve discordância sobre a afirmação “alternativa A tem desempenho superior à alternativa B.

Consideradas as equações acima, em face dos valores dos julgamentos, foi atribuído o valor de $v = 1,1$ (válido para as duas tabelas: decimais e inteiros).

4.3.2 Teste de sensibilidade – Passo 1: primeira parte com julgamentos ideais pré-ordenados

Para aferição da sensibilidade dos parâmetros, foram idealizadas duas tabelas “ideais” contendo dois conjuntos de julgamentos pré-ordenados de cima para baixo, conforme os Quadros 4.13 e Quadro 4.14.

Quadro 4.13 – Tabela “ideal” com julgamentos pré-ordenados em números decimais

Alt.	C1	C2	C3
F1	10,00	9,50	9,00
F2	9,50	9,00	8,50
F3	9,00	8,50	8,00
F4	8,50	8,00	7,50
F5	8,00	7,50	7,00
F6	7,50	7,00	6,50
F7	7,00	6,50	6,00
F8	6,50	6,00	5,50
F9	6,00	5,50	5,00
F10	5,50	4,00	4,50

Fonte: Autor.

Quadro 4.14 – Tabela “ideal” com julgamentos pré-ordenados - números inteiros

Alt.	C1	C2	C3
F1	10,000	10,000	10,000
F2	9,000	9,000	9,000
F3	8,000	8,000	8,000
F4	7,000	7,000	7,000
F5	6,000	6,000	6,000
F6	5,000	5,000	5,000
F7	4,000	4,000	4,000
F8	3,000	3,000	3,000
F9	2,000	2,000	2,000
F10	1,000	1,000	1,000

Fonte: Autor.

4.3.3 Teste de sensibilidade – Passo 2: verificação sobre λ

Conforme o algoritmo do ELECTRE III tem-se $\lambda = 3$ (este valor origina-se das definições do algoritmo e foi calculado por meio de uma planilha Excel, com a qual foram feitos os cálculos para a ordenação).

Para o início dos testes foi utilizada, primeiramente, a tabela constante do Quadro 4.13, que contém números decimais como julgamentos ideais pré-ordenados.

Aplicado o valor acima, foram feitas simulações com λ variando de 3,0; 2,5; 2,0 e 1,5 obtendo-se ordenações empatadas em todas as dez alternativas. Conclusão: é necessário reduzir λ .

Adotando-se λ igual a 1,0 até 0,27 foi obtida uma ordenação coerente com a tabela “ideal” pré-ordenada de cima para baixo. Ordenação coerente significa dizer que foi obtida uma ordenação conforme os valores da tabela “ideal” e, portanto, na ordem F1...F10.

Com a adoção de $\lambda = 0,27$, obteve-se igualmente uma ordenação coerente conforme Quadro 4.15 - Ordenação Electre III com $\lambda = 0,27$. Esse valor de λ foi empregado para a ordenação, por permitir um aumento da sensibilidade do algoritmo. O quadro 4.15 é válido também para mostrar a ordenação Electre III a partir da tabela “ideal” com números inteiros nas condições correspondentes (com $p = 0,1$; $q = 1,0$; $v = 1,0$).

Quadro 4.15 – Ordenação por ELECTRE III a partir dos julgamentos pré-ordenados (constantes do Quadro 4. 13 e do Quadro 4.14)

ORDENAÇÃO ELECTRE III A PARTIR DA TABELA PRÉ-ORDENADA DECIMAL										
ordem	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10

Fonte: Autor.

4.3.4 Observações sobre o valor de λ

- i) Adotando-se λ igual ou inferior a 1,0 obtém-se como resultado uma ordenação coerente com os valores esperados. O menor valor de λ , conforme simulações é 0,27.
- ii) Os demais parâmetros mostraram-se adequados à boa ordenação.

Os procedimentos acima foram repetidos com o uso da tabela constante do Quadro 14, que contém números inteiros como julgamentos, obtendo-se os idênticos resultados, permitindo inferir que as conclusões “i” e “ii” acima podem ser aplicadas também aos julgamentos baseados em números inteiros.

4.3.5 Ordenação dos modos de falha originados da FMEA

Foram mantidos os parâmetros já descritos nos testes de sensibilidade e aplicadas as avaliações consideradas para este trabalho, a saber: a avaliação com julgamentos pela média aritmética e a avaliação “pessimista”.

A primeira ordenação obtida com a tabela de julgamentos pela média aritmética gerou o seguinte resultado: F3, F4, [F2, F5, F6, F9], [F1, F7, 10], F8. Os colchetes reúnem os modos de falha cuja posição na ordenação é idêntica ou, em outras palavras, empatada. Para melhor visualização é fornecido o Quadro 4.16.

Quadro 4.16 – Ordenação Electre III a partir dos julgamentos pela média aritmética

5 - ORDENAÇÃO ELECTRE III A PARTIR JULGAMENTOS PELA MÉDIA ARITMÉTICA, PESOS IGUAIS					
ordem	F3	F4	F2, F5, F6, F9	F1, F7, F10	F8

Fonte: Autor.

Calculando-se a ordenação pelo Electre III a partir da tabela com julgamentos “pessimistas”, obteve-se: F3, F9, [F4, F5, F6], [F1, F2, F7], [F8, F10]. Para visualização é fornecido do Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Ordenação Electre III a partir dos julgamentos “pessimistas”

ORDENAÇÃO ELECTRE III A PARTIR JULGAMENTOS PESSIMISTAS - PESOS IGUAIS					
ORDEM	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10

Fonte: Autor.

Observa-se que há diversos modos de falha ordenados na mesma posição. Quando se comparam os dois quadros, Quadro 4.16 e 4.17, obtidos pela ordenação verifica-se que não há resultados incoerentes entre eles, embora existam diferenças.

4.3.5.1 Teste de sensibilidade das Ordenações com variação dos valores dos pesos (w)

Até este ponto as ordenações foram calculadas a partir de pesos iguais dos critérios. O seguinte estudo foi feito para se avaliar o efeito do emprego de pesos diferenciados. Partindo-se do primeiro jogo de valores (0,33; 0,33 e 0,34) respectivamente para O, S e D, foi retomada a ordenação em ambos os casos utilizando-se os seguintes jogos de pesos: a) 0,80; 0,10; 0,10; b) 0,10; 0,80; 0,10; c) 0,10; 0,10; 0,80. Previamente foi verificado, por meio de simulações, que diferenças menores entre os pesos não produzem diferenças significativas nas ordenações.

4.3.5.2 Ordenação com pesos $w = 0,80; 0,10; 0,10$

A partir da tabela com julgamentos obtidos pela média aritmética, obteve-se a ordenação constante do Quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Ordenação com pesos $w = 0,80; 0,10; 0,10$

ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS MÉDIA ARITM / PESOS 0,80; 0,10; 0,10						
ordem	F3	F4	F2, F5, F6, F9	F7, F10	F1	F8

Fonte: Autor.

4.3.5.3 Ordenação com pesos $w = 0,10; 0,80; 0,10$

De modo semelhante, obteve-se a ordenação do quadro 4.19.

Quadro 4.19 – Ordenação com pesos $w = 0,10; 0,80; 0,10$.

7 - ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS MÉDIA ARITM / PESOS 0,10; 0,80; 0,10						
ordem	F3	F4	F2, F5, F6, F9	F7, F10	F1	F8

Fonte: Autor.

4.3.5.4 Ordenação com pesos $w = 0,10; 0,10; 0,80$

Do mesmo modo, obteve-se o quadro 4.20.

Quadro 4.20 – Ordenação com pesos $w = 0,10; 0,10; 0,80$

8 - ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS MÉDIA ARITM / PESOS 0,10; 0,10; 0,80							
ordem	F3	F4	F5, F6, F9	F2	F7, F10	F1	F8

Fonte: Autor.

4.3.5.5 Ordenação a partir da tabela de julgamentos “pessimistas”

Aplicando-se os pesos na mesma sequência dos itens 4.5.1; 4.5.2 e 4.5.3 acima, tem-se os resultados mostrados nos quadros 4.21; 4.22 e 4.23, respectivamente.

Quadro 4.21 - Ordenação Electre III com pesos $w = 0,80; 0,10; 0,10$

10 - ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS "PESSIMISTAS" / PESOS 0,80; 0,10; 0,10					
ordem	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10

Fonte: Autor.

Quadro 4.22 – Ordenação Electre III com pesos $w = 0,10; 0,80; 0,10$

ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS "PESSIMISTAS" / PESOS 0,10; 0,80; 0,10					
ordem	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10

Fonte: Autor.

Quadro 4.23 – Ordenação Electre III com pesos $w = 0,1; 0,10; 0,80$

ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS "PESSIMISTAS" / PESOS 0,10; 0,10; 0,80					
ordem	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10

Fonte: Autor.

4.3.5.6 Teste de sensibilidade a pesos aplicados diretamente sobre os julgamentos

Constatada a baixa sensibilidade das ordenações quando se variam os pesos no próprio algoritmo foi testada a sensibilidade de aplicação de pesos diretamente sobre os julgamentos, mantendo-se, no algoritmo, pesos iguais para evitar qualquer distorção nos resultados.

Um teste com pesos normalizados (portanto com somatória igual a 1,0) aplicados sobre a tabela com os julgamentos reais da FMEA obtidos pela média aritmética, produziram uma ordenação com 8 posições empatadas. Esses empates se explicam dada a ação dos limiares. Os julgamentos assim afetados por pesos ficaram ainda mais próximos (por serem multiplicados por números menores do que 1,0), numericamente, entre si.

Um segundo teste, com pesos inteiros de soma igual a 10, foi testado conforme acima e permitiu a obtenção de resultados de ordenação bastante diferenciados em relação aos anteriores. A ação destes pesos é explicada, já que eles distanciam os valores numéricos entre si. Eles foram previamente testados com relação aos limiares com o uso das julgamentos ideais pré-ordenados.

Foram aplicados pesos que pudessem diferenciar a importância dada aos critérios, com soma total igual a 10. Arbitrariamente definiu-se: alta importância – peso 6,0; média importância – peso 3,0 e, finalmente peso 1,0 para a menor importância. Outros conjuntos de valores poderiam ser testados, mas os resultados foram suficientemente claros para justificar o emprego com os três jogos de pesos adotados a seguir.

Assim, foram testados os três seguintes conjuntos de pesos sobre os critérios O, S e D: a) 6,0; 3,0; 1,0; b) 1,0; 6,0; 3,0; e c) 3,0; 1,0; 6,0. Foi feito um rodízio dos pesos nestas condições.

Os resultados das ordenações são mostrados no Quadro 4.24.

Quadro 4.24 – Ordenações Electre III c/ pesos iguais, pesos aplicados nos julgamentos pela média ponderada.

ORDEN. ELECTRE III pesos iguais, pesos nos JULGAMENTOS MEDIA POND., PESOS 6,0; 3,0; 1,0										
ordem	F3	F1	F10	F5, F6		F9	F2	F7	F4, F8	
ORDEN. ELECTRE III pesos iguais, pesos nos JULGAMENTOS MÉDIA POND., PESOS 1,0; 6,0; 3,0										
ordem	F2, F3		F1	F4	F9	F10	F5, F6, F7, F7			
ORDEN. ELECTRE III pesos iguais, pesos nos JULGAMENTOS MÉDIA POND., PESOS 3,0; 1,0; 6,0										
ordem	F1	F3, F10		F5, F6		F2, F4		F7	F8	F9

Fonte: Autor.

Dada maior importância à Ocorrência, com peso 6,0; seguida de Severidade, com peso 3,0 e de Detecção, com peso 0,1; obteve-se a ordenação mostrada na primeira linha acima (pesos “a”).

A segunda linha, pesos “b”; mostra a ordenação quando se atribuem os pesos do conjunto “b”, que privilegiam a Severidade (e também o custo do reparo) e sucessivamente se

pode apreciar a terceira linha, com os pesos do conjunto “c” (mais diretamente ligada aos processos de projeto, fabricação e de montagem, quanto à detecção de falhas).

Desta forma, a presente proposta, que aplica Electre III à ordenação dos modos de falha da FMEA demonstra que permite a aplicação de pesos diferenciados aos critérios. Uma empresa interessada em eliminar ou mitigar com prioridade modos de falha mais diretamente críticos com relação à Ocorrência ou à Severidade ou à Detecção poderá livremente escolher seus respectivos pesos.

Ressalte-se que a aplicação de pesos seguida do cálculo de RPN pela sua fórmula tradicional não permitiria novas ordenações, quaisquer que fossem os pesos, porque os pesos, uma vez multiplicados sobre os julgamentos acarretariam o mesmo efeito que se o RPN fosse multiplicado pelo produto dos pesos, não alterando a posição relativa dos modos de falha.

4.4. Análises

A análise seguinte focará nos resultados obtidos para a ordenação dos modos de falha, abrangendo também aspectos ligados aos objetivos desta dissertação.

4.4.1 Análise dos resultados da ordenação com a aplicação do Electre III no estudo de caso e confronto com os resultados de ordenação produzidos pela FMEA (objetivo específico “c”)

Para facilitar a análise, introduz-se um quadro com a totalidade das ordenações para permitir rapidez nas comparações. O Quadro 4.25 mostra essas ordenações.

Quadro 4.25 – Resumo das ordenações FMEA e Electre III

ORDENAÇÕES FMEA TRADICIONAL A PARTIR DO RPN									
ORDENAÇÃO FMEA TRADICIONAL JULGAMENTOS PELA “MÉDIA ARITMÉTICA”									
ordem	F3	F2	F4	F1, F5, F6	F10	F7	F8	F9	
ORDENAÇÃO FMEA TRADICIONAL “JULGAMENTOS PESSIMISTAS”									
ordem	F2, F3	F1, F5, F6	F4	F7	F9, F10	F8			
5 - ORDENAÇÃO ELECTRE III A PARTIR JULGAMENTOS PELA MÉDIA ARITMÉTICA, PESOS IGUAIS									
ordem	F3	F4	F2, F5, F6, F9	F1, F7, F10	F8				
ORDENAÇÃO ELECTRE III A PARTIR JULGAMENTOS PESSIMISTAS - PESOS IGUAIS									
ordem	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10				
7 - ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS MÉDIA ARITM / PESOS 0,80; 0,10; 0,10									
ordem	F3	F4	F2, F5, F6, F9	F7, F10	F1	F8			
10 - ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS “PESSIMISTAS” / PESOS 0,80; 0,10; 0,10									
ordem	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10				
8 - ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS MÉDIA ARITM / PESOS 0,10; 0,10; 0,80									
ordem	F3	F4	F5, F6, F9	F2	F7, F10	F1	F8		
ORDENAÇÃO ELECTRE III / JULGAMENTOS “PESSIMISTAS” / PESOS 0,10; 0,10; 0,80									
ordem	F3	F9	F4, F5, F6	F1, F2, F7	F8, F10				
ORDEN. ELECTRE III pesos iguais, pesos nos JULGAMENTOS MÉDIA POND., PESOS 6,0; 3,0; 1,0									
ordem	F3	F1	F10	F5, F6	F9	F2	F7	F4, F8	
ORDEN. ELECTRE III pesos iguais, pesos nos JULGAMENTOS MÉDIA POND., PESOS 1,0; 6,0; 3,0									
ordem	F2, F3	F1	F4	F9	F10	F5, F6, F7, F8			
ORDEN. ELECTRE III pesos iguais, pesos nos JULGAMENTOS MÉDIA POND., PESOS 3,0; 1,0; 6,0									
ordem	F1	F3, F10	F5, F6	F2, F4	F7	F8	F9		

Fonte: Autor.

Observação: Alternativas agrupadas na mesma célula têm a mesma posição na ordenação.

A análise e a comparação das ordenações exigiram o exame das seguintes questões:

a) Os resultados produzidos pela aplicação do Electre III forneceram ordenações claras, com ausência de modos de falha empatados, comparáveis aos resultados obtidos pelo cálculo tradicional da FMEA?

Objeção: a obtenção de diversos modos de falha com o mesmo valor de criticidade (ou de RPN), o que tornaria complicada a ordenação (WANG et al., 2009b; CHIN et al., 2009a, 2009b; LIU et al., 2011, 2012).

Resposta: Os resultados obtidos a partir do cálculo tradicional da FMEA e da aplicação do Electre III são comparáveis, porém apresentando algumas diferenças. As primeiras posições e as últimas são bastante semelhantes em todas as ordenações. Quanto à existência de posições empatadas houve ressalvas da parte dos “Experts”, visto que não foi possível a obtenção de ordenações sem empates com a aplicação do Electre III (a este respeito ver Subcapítulo 3.3). Foi admitida a dificuldade – introduzida pela proximidade dos julgamentos, de se produzir um ordenamento sem empates a partir de performances das alternativas muito próximas e, em diversos casos, coincidentes. As ordenações pelo cálculo tradicional também trazem vários empates. Ao fazer comparações par a par entre o desempenho das alternativas, o método Electre III produzirá ordenações empatadas, caso os desempenhos sejam iguais ou equivalentes, considerados os limiares. Essa explicação foi entendida e aceita pelos peritos. As ordenações a partir do RPN originadas da FMEA apresentavam também diversas posições coincidentes.

b) Restaram dúvidas dos “Experts” relativas à ordenação fornecida pelo Electre III, com respeito ao destaque para os modos de falha mais críticos e menos críticos, assim avaliados com base na sua experiência e nos resultados da FMEA tradicional?

Objeção: falta de confiabilidade nos resultados (SPREAFICO; RUSSO; RIZZI, 2017).

Resposta: No que diz respeito à qualidade da ordenação do Electre III, as eventuais dúvidas dos “Experts” foram eliminadas a partir dos testes de sensibilidade levados a efeito. Foi possível comprovar que o Electre III pode fornecer ordenações corretas quanto ao desempenho das alternativas, com o emprego das simulações feitas com as tabelas “ideais” pré-ordenadas, constantes dos Quadros 4.13 e 4.14. A construção dos pseudo-critérios e a determinação dos limiares p , q e v , apoiadas pelo exame e aplicação das definições previstas no método Electre III não deixaram dúvidas a este respeito. Ficou claro que sempre se poderá

testar os limiares e o valor de λ , previamente à aplicação do algoritmo com vistas à verificação da ordenação que será produzida a partir das avaliações (reais) das alternativas envolvidas. Na prática, a cada alteração feita com os parâmetros e com o nível de corte, foi verificada, com auxílio das tabelas pré-ordenadas, que os resultados por elas fornecidos continuavam válidos (ou seja, ordenação F1, F2, ...F10).

c) Como o algoritmo utilizado pelo Electre III trata as dificuldades de avaliação e julgamento, levando em conta a imprecisão, incerteza e falta de acurácia? Objeção: subjetividade na avaliação do risco, admitindo a existência de definições ambíguas nesse aspecto (SPREAFICO et al., 2017).

Resposta: A pergunta acima foi respondida pelo algoritmo e por suas definições. Ficou claro, por sua definição e construção, que os limiares podem atenuar os efeitos da imprecisão e da incerteza na elaboração dos julgamentos (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015; ROY, 1991). De qualquer maneira, ao fazer a FMEA pelo cálculo tradicional, tiveram os técnicos tanto opiniões divergentes entre si, como variação em seus próprios julgamentos. Quanto mais exatos forem os julgamentos (requerendo, para isso, um forte sistema de qualidade), menor será a incerteza e a imprecisão. Todavia, considerando-se a natureza dos julgamentos dos peritos, pode-se admitir que sempre haverá alguma imprecisão e alguma incerteza.

d) O método Electre III permite a utilização de pesos diferentes para cada critério, de modo a dar maior importância a um deles, traduzindo os interesses ou os modos de pensar da equipe que executa a FMEA?

Objeção: a atribuição da mesma importância aos fatores O, S e D com vistas à ordenação (LIU et al., 2011, 2012; GARGAMA, CHATURVEDI, 2011; KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012; ZHANG, CHU, 2011 *apud* LIU, LIU, NAN, 2013).

Resposta: Os “Experts” puderam verificar, pelos cálculos produzidos pelo seu algoritmo, que é possível tanto atribuir pesos diferentes aos critérios, como obter resultados diferentes na ordenação. Todavia, os resultados obtidos na aplicação praticamente não se diferenciaram significativamente entre si quando os pesos foram aplicados “por dentro” do algoritmo.

Por outro lado, a introdução de pesos diretamente sobre os julgamentos dos modos de falha produziu significativas diferenças nas ordenações, quando os pesos foram variados entre os três critérios. Essa possibilidade está ligada diretamente aos conceitos que podem ser

adotados pelas empresas para priorizar a segurança ou para considerar o custo do reparo. Objeção: a desconsideração do custo acarretado pelos modos de falha (BRAGLIA, 2000); maior peso para S; maior tempo entre falhas MTBF (*Mean Time Between Failures*) com maior peso para O; ou para compensar dificuldades ou deficiências do sistema de qualidade, falta de portais de qualidade, falta de instrumentos e dispositivos tais como poka-yoke; calibres “passa-não passa”; controle numérico de torques aplicados, entre outros, quando se dá maior peso à D.

Em contrapartida, a atribuição de pesos seguida da fórmula tradicional do RPN, não produz alteração na posição relativa dos modos de falha – objeção: a discutível validade da fórmula tradicional do RPN (ANTONELLA et al., 2017) –, porque os valores de RPN se deslocam como se fossem todos eles multiplicados por uma constante, que, é igual ao valor do produto dos pesos. Exemplo: Modo de falha genérico: julgamentos 4, 5 e 6, $RPN = 4 \times 5 \times 6 = 120$.

Atribuindo-se pesos (dentro desta fórmula do RPN) 0,6; 0,3; 0,1, tem-se o novo RPN calculado como $(4 \times 0,6) \times (5 \times 0,3) \times (6 \times 0,1) = 120 \times 0,18 = 21,60$. Esse valor 0,18, igual ao produto dos pesos introduzidos nos critérios seria igual para todos os modos de falha apreciados e não produziria qualquer nova ordenação. Esse raciocínio é válido, quaisquer que sejam os pesos assim introduzidos.

Adicionalmente, consideraram os técnicos, para fins de emitir um parecer sobre a influência do Electre III na realização da FMEA, que, dadas as condições do caso particular envolvido, provavelmente, qualquer método produziria ordenações coincidentes, em maior ou menor número, mesmo que fossem introduzidos outros modos ou algoritmos para se fazer a ordenação dos modos de falha.

A ordenação produzida pela FMEA a partir dos julgamentos calculados como média aritmética produziu um resultado que foi bem aceito pelos “Experts”. Foi considerado que, diante da natureza dos modos de falha, os resultados produzidos pelo Electre III são satisfatórios, por agrupar, na ordenação, modos de falha que, de fato, haviam sido avaliados com imprecisão e com incerteza. Abordando a imprecisão e a dificuldade de se elaborarem julgamentos “seguros”, com baixa ou reduzida incerteza, a discussão sobre os limiares trouxe novas luzes aos “Experts” sobre maneiras de emitir julgamentos.

Em resumo, o emprego do Electre III na ordenação dos modos de falha do processo FMEA foi considerado satisfatório pelos técnicos e entendido (por eles) como um aprimoramento da FMEA quanto à ordenação dos modos de falha.

4.4.2 Verificação da coerência entre o título da dissertação, a pergunta de pesquisa e a pesquisa de campo

O objetivo deste subitem e de seus derivados é explicitar de que forma os objetivos da presente dissertação foram considerados, se foram atingidos e como foram atingidos, para esclarecer se o escopo e o resultado da pesquisa de campo alcançaram os objetivos da dissertação.

O título da presente dissertação é: “FMEA – Ordenação dos modos de falha baseada em ELECTRE III: uma proposta de aprimoramento”. A pergunta de pesquisa é: “Como aprimorar a ordenação dos modos de falha de um processo FMEA através da aplicação do método ELECTRE III?”

A resposta à pergunta de pesquisa foi parcialmente dada no subcapítulo 4.3 e se completa neste subitem. A dissertação logrou atender totalmente o escopo mencionado em seu título e em sua pergunta de pesquisa.

4.4.3 Apreciação sobre o atingimento do objetivo geral e dos objetivos específicos

O objetivo geral abrange, textualmente, o seguinte: “Aplicar o método ELECTRE III para a ordenação de modos de falha, de acordo com os critérios severidade, ocorrência e detecção do da FMEA e comparar os resultados com aqueles obtidos aplicando a técnica tradicional”.

De fato, o objetivo geral foi atingido, pelo que se depreende do exame do Capítulo 4, subcapítulo 4.3, onde se constata a afirmação do parágrafo acima.

O objetivo específico “a”, cujo teor é: “Levantamento bibliográfico de publicações sobre o tema FMEA para a identificação de trabalhos a respeito de novas formas de priorização dos modos de falha e sua apresentação” foi atingido pelo exposto no Capítulo 2 – FMEA: Histórico e Fundamentos, que contém citações, apresentação de conceitos emitidos pelos autores pesquisados e sua discussão.

O objetivo específico “b”, cujo teor é: “Apresentar, explicar e fundamentar a aplicação do ELECTRE III na priorização dos modos de falhas, de maneira que possa ser compreendida e adotada pelas equipes normalmente responsáveis pela realização de FMEAs” foi abordado no subcapítulo 4.3, onde foram apresentadas as maneiras para a determinação dos limiares e dos

parâmetros utilizados no algoritmo do Electre III, à luz de suas equações, ilustradas por pequenos textos que objetivam transmitir o conceito envolvido na determinação dos parâmetros e dos limiares. Foi apresentado e explicado o conceito de pseudo-critérios e sua vinculação com o grau de incerteza, de imprecisão e de eventual falta de acurácia na elaboração dos julgamentos.

O objetivo específico “c”, cujo teor é: “Como aplicar, na prática, o método ELECTRE III para a ordenação dos modos de falha de um processo FMEA, com testes de sensibilidade para sua validação?” pode ser considerado como plenamente atingido, por meio do exame do teor do subcapítulo 4.3 e das análises deste subcapítulo. A presente dissertação poderá ser utilizada como guia para técnicos interessados na sua reprodução ou na sua aplicação.

4.4.4 Análise da aplicação do método Electre III e discussão sobre a eliminação de objeções sobre o cálculo tradicional da FMEA e a preservação de suas vantagens

A pesquisa bibliográfica nas bases de dados identificou numerosos estudos de autores que fazem ressalvas e objeções ao cálculo tradicional da FMEA. Essas ressalvas e objeções fazem parte do Quadro 2.3 – Objeções levantadas contra o cálculo tradicional da FMEA e serão utilizadas como parâmetro para se avaliar se a proposta deste trabalho foi bem sucedida, quer dizer, se aprimorou a ordenação dos modos de falha de um processo FMEA mediante a aplicação do método ELECTRE III.

As objeções são discutidas a seguir e comentadas individualmente, quanto à sua eliminação. Caso se possa afirmar que total ou parcialmente elas tenham sido eliminadas por este trabalho, será possível emitir um juízo sobre se seu objetivo geral foi alcançado. Para esse fim, torna-se necessário revisitar tanto as objeções feitas pelos estudiosos quanto ao cálculo tradicional da FMEA quanto as suas vantagens.

Eis as principais objeções feitas pelos autores e seu confronto com o presente trabalho:

Objeção “a”: a importância relativa entre os critérios O, S e D não é levada em consideração (WANG et al., 2009b; CHIN et al., 2009a, 2009b; LIU et al., 2011, 2012); além de outros autores citados no Quadro 2.3.

Comentário: a questão da importância relativa entre os critérios é integralmente eliminada pela possibilidade de aplicação de pesos aos critérios (ROY, 1991). Os resultados obtidos pela aplicação de pesos diferentes aos critérios, que serão examinados adiante, comprovam que essa questão foi eliminada. Vale dizer que não existe uma regra para a determinação dos pesos e eles são estimados ou admitidos pelos peritos que executam o método, conforme suas convicções (ROY, 1991). A aplicação de pesos diretamente sobre os

julgamentos, conforme o interesse dos peritos que fazem a FMEA, permite a obtenção de ordenamentos diferenciados conforme os pesos atribuídos aos critérios, conforme se viu no subitem 4.3.5.5, onde a aplicação de pesos foi discutida.

Objecção “b”: diferentes combinações envolvendo os valores de O, S e D podem produzir o mesmo valor de RPN para diferentes modos de falha, porém suas implicações latentes podem ser totalmente diferentes (WANG et al., 2009b; CHIN et al., 2009^a, 2009b; GARGAMA, CHATURVEDI, 2011), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: por um lado, o método Electre III não utiliza os valores de RPN e, sim, os valores dos julgamentos, eliminando a primeira parte dessa objeção. Por outro lado, quanto às implicações mencionadas, pode-se considerar que a introdução dos pseudo-critérios pelo método Electre III permite a eliminação dessa segunda parte da objeção, ao menos parcialmente. Os resultados trazidos pelo estudo de caso deste trabalho corroboram essa afirmação, embora, em termos absolutos, sejam necessários estudos mais profundos e mesmo transversais para se refutar totalmente essa objeção.

Objecção “c”: os três fatores de risco (O, S e D) apresentam um grau de imprecisão em sua avaliação (WANG et al., 2009b; CHIN et al., 2009a, 2009b; LIU et al., 2011, 2012), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: essa objeção é eliminada pela aplicação da definição dos pseudo-critérios, justamente introduzidos pelo método Electre III para considerar a imprecisão, a incerteza e a eventual falta de acurácia na elaboração dos julgamentos (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015).

Objecção “d”: a fórmula para o cálculo do RPN pode ser questionada e é controversa (CHIN et al., 2009a, 2009b; LIU et al., 2011, 2012; GARGAMA, CHATURVEDI, 2011), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: essa objeção é eliminada pela definição do método Electre III, que não utiliza os valores de RPN em seu algoritmo. De fato, a partir dos julgamentos dos peritos, são feitas comparações par a par entre as alternativas, com base em relações “Fuzzy” e construídas relações de sobreclassificação para se obter a ordenação desejada (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015; ROY, 1991).

Objecção “e”: a atribuição das notas é diferente para cada um dos fatores de risco (CHIN et al., 2009b; LIU et al., 2011; BRAGLIA et al., 2003a, 2003b), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: essa objeção pode ser levantada se for considerado que os pseudo-critérios foram introduzidos para levar em conta a imprecisão, a incerteza e a eventual falta de acurácia na elaboração dos julgamentos (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015). Dessa forma, inconveniências trazidas pela diferença na atribuição das notas podem ser eliminadas.

Objeção “f”: os RPNs obtíveis pelo cálculo tradicional não são contínuos e apresentam-se distanciados uns dos outros (YANG et al., 2012; CHANG, CHENG, 2011, 2010; CHANG et al., 2010), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: o método Electre III não utiliza os valores de RPN em seu algoritmo. Essa objeção é totalmente eliminada pelas definições do método Electre III, que faz comparações par a par entre as alternativas com base em relações “Fuzzy” e constrói relações de sobreclassificação, além de utilizar pseudo-critérios (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015; ROY, 1991).

Objeção “g”: a fórmula utilizada para o cálculo do RPN é bastante sensível a variações nos fatores de risco (CHIN et al., 2009b; LIU et al., 2011, 2012; GARGAMA, CHATURVEDI, 2011), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: exatamente como no caso anterior, essa objeção é totalmente eliminada pelas definições do método Electre III, que faz comparações par a par entre as alternativas com base em relações “Fuzzy” e constrói relações de sobreclassificação, além de utilizar pseudo-critérios (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015; ROY, 1991).

Objeção “h”: diversos RPN tem números valores em duplicata (GARGAMA, CHATURVEDI, 2011; CHANG, CHENG, 2011, 2010; CHANG et al., 2010), além de outros autores citados no quadro 2.3.

Comentário: essa objeção é diretamente eliminada pela aplicação do algoritmo do Electre III, que não utiliza os valores de RPN e que faz comparações par a par, entre as alternativas e para cada critério (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015; ROY, 1991).

Há outras objeções conhecidas e publicadas, todavia nem todas foram aqui comentadas, o que escaparia do objetivo deste trabalho.

Em face das objeções e respectivos comentários retro apresentados a introdução do método Electre III para aprimorar a ordenação dos modos de falha de um processo FMEA é aparentemente bem sucedida. Antes de se emitir uma afirmação a este respeito, porém, é necessário verificarem-se os efeitos do Electre III sobre as vantagens e características da FMEA.

Para se verificar se as principais vantagens e características da FMEA foram preservadas, será necessário revisitar o Quadro 2.2 – Características e Vantagens dos processos

FMEA, reexaminar essas vantagens e comentar quanto à sua preservação após a aplicação do Electre III.

Vantagem “a”: FMEA é um instrumento fácil de aprender e de implementar e faz com que a avaliação de sistemas complexos seja feita com facilidade (DHILLON, 2009; MOZAFFARI et al., 2013).

Vantagem “b”: FMEA constitui-se em uma ferramenta útil para a visualização dos problemas pelos gestores e é também um excelente instrumento de apoio para o aprendizado organizacional (DHILLON, 2009; BRAGLIA, 2000).

Vantagem “c”: FMEA é um modo estruturado, sistematizado e confiável para a identificação das correlações entre os modos de falha, as razões ou causas para eles e de seus efeitos (DHILLON, 2009; MOZAFFARI et al., 2013; KOSTINA et al., 2012).

Vantagem “d”: FMEA permite uma avaliação realística da conformidade de produtos e serviços com relação ao mercado e à necessidade do consumidor (KEREKES; JOHANYAK, 1996).

Vantagem “e”: FMEA aumenta a segurança e a confiabilidade de produtos e serviços, reduz os custos de garantia e de serviços, reduz o tempo do processo de desenvolvimento e possibilita maior atendimento de prazos (BUJNA; PRISTAVKA, 2013).

Vantagem “f”: em consequência das características derivadas de sua proatividade a FMEA, em última análise, aumenta a satisfação do consumidor (DHILLON, 2009).

Há outras vantagens publicadas na literatura, desconsideradas por este trabalho para fins de se manter sua objetividade. Tal omissão não prejudica, de modo absoluto, a validade das análises seguintes.

As vantagens acima, previamente conhecidas pelos “Experts” que colaboraram com este trabalho foram consideradas. Feita a aplicação do Electre III, houve manifestação dos “Experts” no sentido de confirmar a preservação integral das mencionadas vantagens.

Por outro lado, não foram localizados estudos que discutam ou que abordem as vantagens acima elencadas para sua confirmação ou sua negação, o que permitiria a obtenção de uma resposta dos autores e estudiosos, para fins de verificação se as vantagens acima são preservadas pela introdução e aplicação do método Electre III.

Tentando oferecer uma resposta deve-se registrar que Electre III é destinado a resolver problemas de ordenação em sistemas complexos, utilizando um processo computacional simples – passível de ser resolvido por planilhas Excel, baseado na construção de relações de

sobreclassificação, dando margem para a imprecisão e incerteza dos julgamentos através da introdução dos pseudo-critérios (INFANTE et al., 2013; VEZMELAI et al., 2015; ROY, 1991).

Resta, portanto, aberta a questão quanto à preservação das vantagens da FMEA, algo que somente poderá receber opiniões após novos estudos e novas comparações. Novos estudos e estudos transversais feitos durante um período suficiente com a aplicação do Electre III para a ordenação dos modos de falha da FMEA poderão elucidar essa questão.

Em resumo, salvo se surgirem evidências no sentido contrário – não detectadas no presente trabalho –, pode-se afirmar, com as devidas reservas e limitações, que o método proposto por esse trabalho colabora de forma bem-sucedida para aprimorar a ordenação dos modos de falha da FMEA.

5. CONCLUSÃO

Essa conclusão será dividida, para melhor entendimento, em: influência dos sistemas de qualidade e dos registros de qualidade e de produção na empresa que realiza a FMEA; a influência da experiência dos técnicos que participam da FMEA e, finalmente, a influência da complexidade (maior ou menor) do sistema de qualidade existente na empresa que realiza a FMEA.

Vale registrar que o presente trabalho atingiu seu objetivo geral e conseguiu realizar a ordenação dos modos de falha da FMEA com o emprego do método Electre III, com resultados satisfatórios segundo os técnicos que colaboraram com o trabalho. Todos os aspectos propostos pelo trabalho foram abordados e satisfatoriamente atendidos.

Para fins práticos, é difícil de se imaginar que empresas automobilísticas, tais como Toyota, Mercedes Benz, BMW, Volkswagen, Chrysler, por exemplo, tenham deficiências importantes em seus sistemas de produção e de qualidade.

Ainda assim, mesmo essas empresas têm recorrido a inúmeros casos de “*recall*” para reparar falhas e modos de falha que não foram considerados no projeto e/ou na produção de seus veículos. Todas essas empresas recorrem costumeiramente a FMEAs e a PFMEAs (antes de iniciar o processo de produção que envolvam novas tecnologias na montagem). Todavia, não é possível o atingimento de “falha zero”, como se pôde verificar com a NASA – a agência aeroespacial americana, que abortou alguns projetos como consequência de falhas catastróficas, apesar de seus vastos recursos (veja-se, a este respeito, o acidente ocorrido com o “*space shuttle*” Challenger, em 28 de janeiro de 1986, ocasião em que sete pessoas morreram diante do público que assistia ao lançamento).

O texto acima deixa claro que não há solução mágica – produzida por qualquer que seja o método, para todos os problemas de qualidade. E que a FMEA não pode, igualmente, ser utilizada com a expectativa de trazer uma solução absoluta.

Apesar disso, nenhum dos argumentos acima justificaria dar menor importância aos processos FMEA. Serão sempre necessários estudos sobre maneiras e métodos para aprimorar o ordenamento dos modos de falha identificados pelas FMEA – o que justifica a realização desta pesquisa.

Sem dúvida, a experiência (ou sua falta) dos técnicos que executam a FMEA tem grande influência nos resultados obtidos por ela e na consequente melhoria de qualidade que virá a ser introduzida nos produtos ou serviços.

Não há escolas ou cursos para a formação de técnicos especificamente destinados à realização de FMEAs e, por melhor que sejam os cursos frequentados, somente a prática – as lições aprendidas por meio da análise dos erros e dos bons resultados – permitirá a construção e a solidificação do conhecimento dos técnicos.

A esse respeito, discussões deixadas de lado pelo cálculo tradicional da FMEA, mas tornadas obrigatoriamente parte do processo quando se utiliza o Electre III, sobre a dimensão da incerteza e da imprecisão (determinação dos limiares) terão, indubitavelmente, o poder de abrir horizontes e de eliminar preconceitos quando da realização de processos FMEA.

A tomada de consciência dos técnicos quanto à inevitável incerteza e imprecisão dos dados e dos julgamentos muito provavelmente incentivará a construção de sistemas de qualidade mais complexos e abrangentes para permitir a melhoria contínua da qualidade, promover a satisfação do cliente e, em última análise, aumentar a competitividade das empresas.

Empresas com sistemas de qualidade mais complexos e completos utilizam critérios adicionais para complementar a FMEA, como, por exemplo, o custo de reparo de uma dada falha. Nesses casos, são estabelecidos patamares de a partir de R\$ 5,00* a R\$ 500,00* por veículo (pensando-se aqui na produção de veículos comerciais), como critério para priorizar a solução de problemas. Imagine-se que um dado modelo de veículo tenha uma produção anual de 100.000 unidades. O valor de R\$ 500.000,00 – ou, mais crítico ainda, de R\$ 50.000.000,00 é suficiente para cobrir os custos com uma boa equipe de técnicos e engenheiros para administrar a qualidade (* Custo total causado por um modo de falha, dividido pela quantidade de veículos produzida).

Em outros casos, empresas preferem satisfazer os clientes com uma menor quantidade de falhas, optando por priorizar modos de falha que tenham ocorrência a partir de certo nível. Há uma empresa automobilística na Europa que destaca o alto grau de segurança de seus veículos, claramente priorizando a solução de problemas que afetam a segurança e, por extensão, a severidade das falhas. Outra empresa europeia apregoa “*the best or nothing*” sobre seus produtos – deixando transparecer a confiança depositada em seu sistema de qualidade. Todas elas, sem exceção, utilizam frequentemente FMEAs.

Como limitações deste trabalho, registra-se que ele não pôde englobar diversas empresas e diferentes produtos, de modo a fornecer um panorama mais completo sobre o emprego do Electre III para aprimorar a ordenação da FMEA. Em razão da necessidade de delimitação do objeto de pesquisa, foi estudado somente um equipamento de uma única empresa.

Seria necessário um relativamente longo período para que se possam avaliar os resultados do emprego da proposta deste trabalho nas empresas, configurando-se aqui um estudo longitudinal, para uma avaliação mais abalizada de sua eficácia.

Novas oportunidades de pesquisa existem, como acima mencionado, procurando-se estender o método a novos produtos ou serviços, em empresas com diferentes graus de complexidade de seus sistemas de qualidade e comparando-se os decorrentes resultados.

BIBLIOGRAFIA

AHN, J. et al. Fuzzy-based failure mode and effect analysis (FMEA) of a hybrid molten carbonate fuel cell (MCFC) and gas turbine system for marine propulsion. **Journal of Power Sources**, v. 364, p. 226-233, 2017.

ALMADA GARCIA, P. A. A data envelopment analysis approach to safety improvements based on FMEA. **Gestão e Produção**, v. 20, n. 1, p. 1-11, 2013.

ANTONELLA, C. et al. ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number. **Computers & Industrial Engineering**, v. 108, p. 100-110, June 2017.

ARDESHIR, A.; MOHAJERI, M.; AMIRI, M. Evaluation of safety risks in construction using Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (FFMEA). **Sciencia Iranica**, v. 23, n. 6, p. 2546-2556, 2016.

BANDUKA, N. et al. An integrated lean approach to Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA): A case study from automotive industry. **Advances in Production Engineering & Management**, v. 11, p. 355-365, 2016.

BLUVBAND, Z.; GRABOV, P.; NAKAR, O. Expanded FMEA (EFMEA). **Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 2004, p. 31-36.

BRAGLIA, Marcello. MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 17, n. 9, p. 1017-1033, 2020.

CARPINETTI, L. C. R.; GALO, N. R. **Notas de aula: EESC – Escola de engenharia de São Carlos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2017.

CARPITELLA, S. et al. The ELECTRE I method to support the FMECA. **IFAC PapersOnLine**, v. 51, p. 459-464, 2018.

CARPITELLA, S.; ANTONELLA, C.; ENEA, M. The ELECTRE I method to support the FMECA. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 459-464, 2018.

CERTA, A.; ENEA, M.; GALANTE, G. M; LA FATA, C. M. ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number. **Computers and Industrial Engineering**, v. 108, p. 100-110, 2017.

CHANG, K.-H. Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology. **Microelectronics Reliability**, v. 49, n. 12, p. 1586-1596, 2009.

CHANG, K.-H., CHENG, C.-H. Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 22, n. 2, p. 113-129, Apr. 2011.

CHANG, K.-H.; CHANG, Y.-C.; LAI, P.-T. Applying the concept of exponential approach to enhance the assessment capability of FMEA. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 25, n. 6, p. 1413-1427, 2014.

CHANG, K.-H.; CHANG, Y.-C.; LEE, Y.-T. Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, v. 13, n. 6, p. 1229-1257, 2014.

CHANG, K.-H.; CHANG, Y.-C.; TSAI, I.-T. Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 211-224, July 2013.

COSTA, H. G.; SANTAFE JUNIOR, H. P. G.; HADDAD, A. N. Uma contribuição do método ELECTRE TRI à obtenção da classificação de riscos industriais. **Investigação Operacional**, v. 27, n. 2, p. 179-197, Dez. 2007.

DAVIDSON, G. G., LABIB, A. W. Learning from failures: Design improvements using a multiple criteria decision-making process. In. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part G: Journal of Aerospace, v. 217, n. 4 , p. 207-216, Jan. 2003.

DU, Y. et al. A new method in failure mode and effects analysis based on evidential reasoning. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2014.

FATTAHI, R., KHALILZADEH, M. Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. **Safety Science**, v. 102, p. 290-300, Feb. 2018.

FLORINDO, T. J. et al. Application of the multiple criteria decision-making (MCDM) approach in the identification of Carbon Footprint reduction actions in the Brazilian beef production chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 1379-1389, Sept. 2018.

FÖLDEŠIOVÁ, D. ET AL. Analysis of risk using FMEA. **Advanced Materials Research**, v. 801, p. 81-85, 2013.

GALO, N. R.; CALACHE, L. D. D. R.; CARPINETTI, L. C. R. A group decision approach for supplier categorization based on hesitant fuzzy and ELECTRE TRI. **International Journal of Production Economics**, v. 202, p. 182-196, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.05.023>.

GENG, X.-L., CHU, X.-N. A novel efficient approach for DFMEA combining 2-tuple and the OWA operator. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 3, p. 2362-2370, March 2010.

GRECO, S.; EHRGOTT, M.; FIGUEIRA, J. R. (Eds.). **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. New York: Springer, 2004. 1347 p.

GU, Y.-K.; CHENG, Z.-X.; QIU, G.-Q. An improved FMEA analysis method based on QFD and TOPSIS theory. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 13, n. 2, p. 617-626, 2019.

HUAI-WEI, L. et al. A Novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. **Applied Soft Computing**, v. 73, Sep. 2018.

HUAI-WEI, L. et al. An integrated approach for failure mode and effect analysis under intervalvalued intuitionistic fuzzy environment. **International Journal of Production Economics**, v. 207, p. 163-172, Jan. 2019.

HUAI-WEI, L. et al. An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty. **IIE Transactions**, v. 48, n. 11, 2016.

HUANG, M.; WANG, Q.; LI, Y. One approach for improvement of FMEA in risk analysis and design optimization. **Proceedings of 2010 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology**, 2010. p. 977-980.

KARLSSON, C. (Ed.). **Researching Operations Management**. London: Routledge, 2009. 336p.

KIM, K.O., ZUO, M. J. General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 169, p. 321-329, Sept. 2017.

KUMAR, R.; Kumar, D.; Kumar, P. Fuzzy Decision Support System (FDSS) for conducting FMEA. **Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division**, v. 88, p. 39-44, Oct. 2007.

KYUNGME, O. K.; MING J. Z. General model for the risk priority number in failure mode and effect analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 169, p. 321-329, 2017.

LI, Z. et al. An Evidential Failure Mode and Effects Analysis Using Linguistic Terms. **Quality and Reliability Engineering**, v. 33, n. 5, p. 993-1010, Jan. 2016.

LIMA JUNIOR, F. R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L. C. R. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. **Applied Soft Computing Journal**, v. 21, p. 194-209, 2014.

LIMA JUNIOR, F. R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L. C. R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. **Gest. Prod. [online]**, v. 20, n. 4, p. 781-801, Nov. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000005>

LING, D. et al. Design FMEA for a diesel engine using two risk priority numbers. **Proceedings – Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 2012.

LING, D. et al. Design FMEA for A Diesel Engine Using Two Risk Priority Numbers. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/254023731_Design_FMEA_for_a_diesel_engine_using_two_risk_priority_numbers. Acesso em 03.06.2019.

LIU, H.-C. et al. A Novel Approach for FMEA: Combination of Interval 2-Tuple Linguistic Variables and Gray Relational Analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 31, n. 5, p. 761-772, 2015.

LIU, H.-C. et al. An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty. **IIE Transactions**, v. 48, n. 11, p. 1027-1042, 2016. DOI: 10.1080/0740817X.2016.1172742.

LIU, H.-C.; LIU, L.; LIU, N. Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: A Literature Review. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 2, p. 828-838, Feb. 2013. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.08.010

LO, H.-W.; LIOU, J. J. H. A Novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. **Applied Soft Computing**, v. 73, p. 684-696, Dec. 2018.

LOLLI, F. et al. FlowSort-GDSS – A novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 17-18, p. 6342-6349, 2015.

LOURENZUTTI, R.; KROHLING, R. A. A generalized TOPSIS method for group decision making with heterogeneous information in a dynamic environment. **Information Sciences**, v. 330, p. 1-18, Feb. 2016.

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

MASHAQBEH, S., MUNIVE-HERNANDEZ, J.E., KHURSHID KHAN, M. Using EWGM method to optimise the FMEA as a risk assessment methodology. **Concurrent Engineering**, Apr. 2019.

MENTES, A.; OZEN, E. A hybrid risk analysis method for a yacht fuel system safety. **Safety Science**, v. 79, p. 94-104, Nov. 2015.

MOUSSEAU, V., SLOWINSKI, R., ZIELNIEWICZ, P. A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support. **Computers & Operations Research**, v. 27, p. 757-777, 2000.

NARAYANAGOUNDER, S.; GURUSAMI, K. A new approach for prioritization of failure modes in design FMEA using ANOVA. **International Journal of Industrial Manufacturing Engineering**, v. 3, n. 1, p. 524-531, 2009.

OLIVEIRA, G. A.; TAN, K. H.; GUEDES, B. T. Lean and green approach: An evaluation tool for new product development focused on small and medium enterprises. **International Journal**

of Production Economics, v. 205, p. 62-73, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.026>.

OSADSKÁ, V.; BERNATÍK, A.; POSPÍŠIL, L. Combination of FMEA and stochastic DEA for risk analysis. **Conference paper**. June 2017. DOI: 10.1201/9781315210469-83.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos modos de falha e efeitos**. IMAM, 2007.

PANCHAL, D. et al. A new fuzzy methodology-based structured framework for RAM and risk analysis. **Applied Soft Computing**, Oct. 2018.

PANCHAL, D.; KUMAR, D. Risk analysis of compressor house unit in thermal power plant using integrated fuzzy FMEA and GRA approach. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 25, n. 2, Jan. 2017.

PANCHAL, D.; SRIVASTAVA, P. Qualitative analysis of CNG dispensing system using fuzzy FMEA–GRA integrated approach. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 10, n. 1, p. 44-56, Feb. 2019.

RACHIERU N. et al. Improvement of Process Failure Mode and Effects Analysis using Fuzzy Logic. **Applied Mechanics and Materials**, v. 371, p. 822-826, 2013.

RENJITHA, V. R. et al. Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2018.

REZAEI, F. et al. Revised Risk Priority Number in Failure Mode and Effects Analysis Model from the Perspective of Healthcare System. **International Journey of Preventive Medicine**, v. 9, p. 7-17, 2018.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of Electre Method. **Theory and Decision**, v. 31, p. 49-73, 1991.

SANG-BING, T. et al. Combining FMEA with DEMATEL models to solve production process problems. **PLoS ONE**, v. 12, n. 8, 2017. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0183634>. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183634>.

SANTOS, L. F. D. O. M.; OSIRO, L.; PALMA LIMA, R. H. A model based on 2-tuple fuzzy linguistic representation and Analytic Hierarchy Process for supplier segmentation using

qualitative and quantitative Criteria. **Expert Systems with Applications**, v. 79, p. 53-64, Aug. 2017.

SELLAPPAN N.; DEIVANAYAGAMPILLAI, N.; PALANIKUMAR, K. Evaluation of Risk Priority Number (RPN) in Design Failure Modes and Effects Analysis (DFMEA) using Factor Analysis. **International Journal of Applied Science and Technology**, v. 3, n. 4, p. 27-36, 2015.

SEYED-HOSSEINI, S.M.; SAFAEI, N.; ASGHARPOUR, M.J. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory Technique. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 91, n. 8, p. 872-881, 2006.

SOHAG, K.; PAPADOPOULOS, Y. A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 100, p. 29-55, 2018.

SPREAFICO, C.; RUSSO, D.; RIZZI, C. A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. **Computer Science Review**, v. 25, p. 19-28, Aug. 2017. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.05.002

SPREAFICO, C.; RUSSO, D.; RIZZI, C. Special Session – “Systematic Innovation Tools for Eco-Design”. **6th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing**. Disponível em: <http://sdm-19.kesinternational.org/index.php>. Acesso em 03.06.2019.

VÁNYI, G., POKORÁDI, L. Sensitivity analysis of FMEA as possible ranking method in risk prioritization. **UPB Scientific Bulletin. Series D: Mechanical Engineering**, v. 80, n. 3, p. 165-176, 2018.

WANG, W. A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral. **Safety Science**, v. 110, Part A, p. 152-163, Dec. 2018.

WANKE, P. et al. Predicting performance in ASEAN banks: an integrated fuzzy MCDM–neural network approach. **Expert Systems**, v. 33, n. 3, Dec. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/exsy.12144>.

WEN, J. et al. Failure mode and effects analysis based on a novel fuzzy evidential method. **Applied Soft Computing**, v. 57, p. 672-683, 2017.

WUI, L. C. et al. Application of self-organizing map to failure modes and effects analysis methodology. **Neurocomputing**, v. 249, p. 314-320, 2017.

XIAO, N.-G. et al. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 4, p. 1162-1170, June 2011.

XIAOTONG, P. Quality improvement with pfmea in a manufacturing system. **Pro Quest**. Doc. n° 10811457, 2018.

XITONG, J. J. Z. Risk evaluation method in failure mode and effects analysis based on failure cause-effect chain. **Computer Integrated Manufacturing Systems (CIMS)**, v. 15, n. 12, p. 2473-2480, Dec. 2009.

YAZDI, M. Risk assessment based on novel intuitionistic fuzzy-hybrid-modified TOPSIS approach. **Safety Science**, v. 110, p. 438-448, 2018.