



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EDWEDJA DE LIMA SILVA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO
PARA SELEÇÃO DE FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS**

CARUARU

2020

EDWEDJA DE LIMA SILVA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO
PARA SELEÇÃO DE FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS**

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

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura.

CARUARU

2020

Catálogo na fonte:
Bibliotecário – Raul César de Melo - CRB/4 - 1735

S586a Silva, Edwedja de Lima.
Avaliação de diferentes modelos de decisão multicritério para seleção de fornecedores de equipamentos / Edwedja de Lima Silva. – 2020.
79 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Márcio José das Chagas Moura.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020.
Inclui Referências.

1. Equipamentos industriais – Seleção. 2. Testes. 3. Processo decisório por critério múltiplo. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2020-063)

EDWEDJA DE LIMA SILVA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO
PARA SELEÇÃO DE FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS**

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

Aprovada em: 14/ 05/ 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcele Elisa Fontana (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Isis Didier Lins (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado em tudo na minha vida, por ter me concedido uma família maravilhosa que mesmo em momentos difíceis sempre me apoiou. Em especial aos meus pais, minhas irmãs e meu noivo.

A todos meus amigos que ajudaram de alguma forma, com um momento de descontração ou uma palavra de conforto.

Ao professor Dr. Márcio J. das Chagas Moura que me acolheu como orientanda e contribuiu para o meu progresso em todas reuniões, me aconselhando e ajudando a enxergar o caminho que deveria ser trilhado.

Agradeço ainda ao PPGEP-CAA e à CAPES por terem me disponibilizado apoio educacional e financeiro, impactando em minha vida pessoal e profissional.

RESUMO

A necessidade de atendimento, por parte das indústrias ou empresas prestadores de serviços, de índices de segurança, custo, flexibilidade, qualidade, dentre tantos outros tem provocado uma grande busca por métodos que auxiliem na seleção de parceiros que atendam às exigências de cada cadeia de suprimentos específica. Dentre estes parceiros, estão os fornecedores de equipamentos e maquinários, que possuem grande importância nos processos produtivos, tendo em vista que falhas em equipamentos provocam paradas e/ou necessidades de manutenções acarretando elevados custos de manutenção e/ou atingimento direto na segurança dos usuários e indiretamente nos serviços prestados aos clientes finais. Estes problemas podem ser mitigados por uma correta análise e seleção de fornecedores, sendo os testes de especificações técnicas essenciais para avaliação destes fornecedores específicos. Pensando nisso, este estudo teve como objetivo estruturar o contexto de seleção de fornecedores de equipamentos por meio da conexão entre estes testes e os métodos multicritério de decisão, que já são amplamente abordados em problemas de seleção de fornecedores. Como resultado foi possível oferecer uma base teórica com os métodos multicritério mais abordados na literatura, estimulando a aplicação dos testes supracitados e a criação de um sistema que facilita a seleção de um método multicritério para um problema de seleção de fornecedor de equipamento específico.

Palavras-chave: Seleção de Fornecedores de Equipamentos. Testes de Especificações Técnicas. Sistema de escolha do Método de Decisão Multicritério.

ABSTRACT

The producers' need to offer safety, cost, flexibility, quality and so many other specifications led to a search for methods that would help in selecting partners that would meet the requirements in each specific supply chain. Among these partners are the suppliers of equipment and machines, which are very important in all production processes, given that equipment failures cause downtime, leading to high maintenance costs and directly affecting user safety and indirectly on services provided to end customers. These problems can be mitigated by proper supplier analysis and selection, being the tests of technical specifications essential for evaluating these specific suppliers. Therefore, this study aimed to structure the context of equipment supplier selection by connecting these tests to multicriteria decision methods, which are already addressed in supplier selection problems. As a result, it is possible to offer a theoretical basis with the multicriteria methods most discussed in the literature, encourage the application of the tests of technical specifications and creation of a system that facilitates the selection of a multicriteria method for a specific equipment supplier selection problem.

Keywords: Equipment Supplier Selection. Technical Specification Tests. System of Choice of Multicriteria Decision Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Metodologia utilizada na criação do sistema SCMM.....	16
Gráfico 1 –	Número de aplicações de cada MCDM em SSP	19
Figura 2 –	Estados de uma cadeia Markoviana de dois componentes reparáveis	24
Figura 3 –	Representação de um problema por hierarquia	29
Figura 4 –	Ponto de indiferença das consequências	30
Figura 5 –	Aplicação fictícia	36
Figura 6 –	Diagrama de Markov dos componentes avaliados	40
Figura 7 –	Lógica do algoritmo de simulação (SMARTS)	41
Fluxograma 1 –	Fluxograma de simulação do SMARTS	42
Figura 8 –	Resultado de simulação (SMARTS)	42
Figura 9 –	Lógica do algoritmo de simulação (trade-off)	45
Figura 10 –	Resultado de simulação (trade-off)	45
Gráfico 2 –	Limites do FITradeoff	46
Figura 11 –	Estrutura hierárquica do AHP	47
Figura 12 –	Lógica do algoritmo de simulação (AHP)	48
Fluxograma 2 –	Fluxograma de simulação do AHP	49
Figura 13 –	Resultado de simulação (AHP)	49
Figura 14 –	Lógica do algoritmo de simulação (ELECTRE I)	51
Fluxograma 3 –	Fluxograma de simulação do ELECTRE I	52
Figura 15 –	Resultado de simulação (ELECTRE I)	52
Figura 16 –	Lógica do algoritmo de simulação (PROMETHEE II)	53
Fluxograma 4 –	Fluxograma de simulação do PROMETHEE II	54
Figura 17 –	Resultado de simulação (PROMETHEE II)	55
Gráfico 3 –	Frequência de ocorrência das constantes do primeiro critério no SMARTS.....	56
Gráfico 4 –	Frequência de ocorrência das constantes do primeiro critério no trade-off.....	56
Gráfico 5 –	Frequência de ocorrência dos valores globais do primeiro fornecedor pelo AHP em cada simulação	57
Figura 18 –	Algoritmo do sistema SCMM.....	61
Figura 19 –	Output do sistema para escolha do método MCDM.....	62
Fluxograma 5 –	Fluxograma de inserção de novos métodos no sistema SCMM	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Exemplo de penalização	34
Tabela 2 –	Análise de adequação dos subcritérios	38
Tabela 3 –	Matriz de conseqüências	39
Tabela 4 –	Resultado do SMARTER	43
Tabela 5 –	Ranking da simulação (FITradeoff)	46
Tabela 6 –	Perguntas feitas no sistema para escolha do método MCDM.....	60
Tabela 7 –	Espaço amostral das simulações dos parâmetros no sistema	62
Tabela 8 –	Modificação dos parâmetros no sistema para escolha do método MCDM (espaço amostral 1)	63
Tabela 9 –	Modificação dos parâmetros no sistema para escolha do método MCDM (espaço amostral 2)	64

LISTA DE SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
ASTM	American Society for Testing & Materials
DSS	Decision Support System
ELECTRE	Elimination and Choice Translating Algorithm
GDM	Group Decision-Making
DM	Decision Maker
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MCDM	Multicriteria Decision Making
PROMETHEE	Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation
PROMSORT	PROMETHEE Sorting
ROC	Rank Order Centroid
SMART	Simple Multicriteria-Attribute Rating Technique
SMARTS	SMART using Swings
SMARTER	SMART Exploiting Ranks
SSP	Supplier Selection Problem
TOPSIS	Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution
VIKOR	Visekriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje
VIP analysis	Variable Interdependent Parameters
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSI	British Standards Institution

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.2.1	Objetivos específicos	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	PROCESSO DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES	18
2.2	CRITÉRIOS QUALIFICADORES	20
2.2.1	Testes de qualificação	20
2.2.2	Testes de vida acelerada	22
2.2.3	Histórico de dados	23
2.3	FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	25
2.3.1	<i>Simple Multicriteria-Attribute Rating Technique (SMART)</i>	26
2.3.2	<i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	27
2.3.3	<i>Trade-off</i>	29
2.3.3.1	<i>Flexible and Interactive Tradeoff elicitation method (FITradeoff)</i> ..	29
2.3.4	Métodos de Sobreclassificação	30
2.3.4.1	<i>ELECTRE (Elimination and Choice Translating Algorithm)</i>	31
2.3.4.2	<i>PROMETHEE (Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation)</i>	31
2.4	SÍNTESE CONCLUSIVA DO CAPÍTULO.....	32
3	METODOLOGIA E SIMULAÇÕES	33
3.1	DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA.....	33
3.2	SIMULAÇÕES	36
3.2.1	Aplicação no SMART	40
3.2.2	Aplicações no trade-off e FITradeoff	44
3.2.3	Aplicação no AHP	47
3.2.4	Aplicações no ELECTRE	50
3.2.5	Aplicações no PROMETHEE	53
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4	SISTEMA DE ESCOLHA DO MÉTODO MULTICRITÉRIO (SCMM)	59

4.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	62
4.2	SÍNTESE CONCLUSIVA DO CAPÍTULO.....	64
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A	78

1 INTRODUÇÃO

O aumento das exigências dos consumidores influenciou na busca de melhores índices de qualidade, agilidade, flexibilidade e sustentabilidade. Essa busca impactou diretamente na escolha de fornecedores que estejam qualificados diante dos novos critérios dos consumidores. Alikhani, Torabi e Altay (2019) afirmaram que esta escolha de fornecedores é uma ação estratégica que depende de métodos de avaliação estruturados. Já os estudos de Baset *et al.* (2019) e de Pishchulov *et al.* (2019) exemplificam a atual preocupação sustentável da sociedade, apontando a necessidade de métodos ou ferramentas que se adequem à análise destes novos critérios sociais, econômicos e ambientais para avaliação de fornecedores. Esta exigência na escolha de fornecedores para compor as atividades da cadeia de suprimentos provocou a busca por métodos de seleção mais complexos, que considerem critérios não só quantitativos, mas também qualitativos, para uma maior adequação às vontades subjetivas dos clientes (HO; XU; DEY, 2010).

A seleção de fornecedores é considerada uma atividade estratégica da função de compras que impacta diretamente a qualidade dos produtos manufaturados e o desempenho de toda a cadeia de suprimentos (ARABSHEYBANI; PAYDAR; SAFAEI, 2018). Alencar, Almeida e Mota (2007) afirmaram que a seleção de fornecedores é uma etapa decisiva para o sucesso do empreendimento. Essa visível importância e o impacto do desempenho dos fornecedores justificam a intensificação na busca por ferramentas e técnicas capazes de balancear múltiplos critérios que avaliam as alternativas de suprimentos disponíveis (VIANA; ALENCAR, 2012).

Vários estudos têm sido realizados nos últimos anos aplicando métodos multicritério de apoio à decisão ou *Multicriteria Decision Making* (MCDM) em problemas de seleção de fornecedores ou *Supplier Selection Problem* (SSP). Essa tendência é mostrada por Chai, Liu e Ngai (2013), que identificaram na literatura aplicações com abordagens do critério único de síntese, de sobreclassificação, além de métodos iterativos e híbridos com utilização da lógica *fuzzy*. O aumento das exigências dos clientes atingiu a forma de escolha dos métodos para tomada de decisões, algumas análises de decisões abrangem métodos da pesquisa operacional *hard* (PO-*hard*), onde os problemas são quantitativos e bem estruturados possibilitando a busca de soluções ótimas (ENSSLIN *et al.*, 2011). Porém, a complexidade dos problemas organizacionais traduzidos nas necessidades de aplicações qualitativas e sociais causaram o surgimento da pesquisa operacional *soft* (PO-*soft*) (ALMEIDA *et al.*, 2015), que trata problemas mal estruturados, como é o caso do SSP.

Um dos critérios levados em consideração na escolha dos fornecedores de uma empresa é a adequação às especificações técnicas, como especificações de qualidade, de confiabilidade

ou de vida acelerada. Estas especificações são responsáveis pela garantia do atendimento das necessidades específicas das empresas, dos produtos, de exigências legais e, principalmente, das exigências dos clientes, podendo, portanto, tornar-se um procedimento complicado e conflitante. Mesmo em ambientes que não possuem uma exigência legal, sempre se deve buscar parceiros que, além de eficientes, se adequem às exigências da empresa e dos clientes finais. Neste contexto, Briassoulis, Hiskakis e Babou (2013) trazem como exemplo as especificações técnicas para reciclagem de resíduos plásticos agrícolas, que por um lado atendem a importantes requisitos como segurança e pensamento sustentável, que é tratado com bons olhos por muitos clientes, mas por outro lado provocam maiores custos de reciclagem para as empresas, que muitas vezes acabam por comprar apenas materiais como polietileno ou polipropileno virgens, que não necessitam passar por processos de reciclagem.

Entretanto, a verificação das especificações nem sempre é facultativa, pois diversos sistemas e/ou produtos devem realizar testes qualitativos, não apenas por exigências legais, mas também por segurança daqueles que irão utilizar ou consumir o produto ou o maquinário que o produz. Além disso, estes testes auxiliam os produtores a construírem métodos e índices comparativos que ajudam na avaliação dos sistemas e, conseqüentemente, na possibilidade de identificação de pontos de melhorias desses. Bernijazov *et al.* (2018) afirmaram que os testes de especificações técnicas são fontes para documentação, comunicação e cooperação entre os engenheiros de sistemas, especialistas e engenheiros de garantia de qualidade. Estes autores mostram a importância desse conceito por meio da criação de uma técnica de especificação para ambientes de simulação virtual em robótica espacial, onde se deve trabalhar por meio da máxima integração dos sistemas existentes, para maximizar a segurança de viagens futuras.

Verifica-se, nos estudos supracitados, que a escolha de fornecedores é uma tarefa com altos níveis de complexidade e com critérios de avaliação, que se diferenciam de acordo com os tipos de produtos ou serviços que são oferecidos aos clientes. Além disso, o estabelecimento de critérios de especificações técnicas é o ponto que mais dificulta a avaliação dos fornecedores, tendo em vista a falta de padronização para realização dos testes de especificações, conhecimento acerca do assunto e muitas vezes devido aos custos que avaliações técnicas podem acarretar aos sistemas produtivos.

Vários tipos de testes de especificações podem ser realizados, para validação ou verificação dos produtos, como mostrado por Mutilba *et al.* (2019), em amostras de matéria-prima no momento em que chegam na produtora, no próprio processo produtivo e nas dependências dos compradores, sendo estes últimos aqueles que se tem menos controle pelos produtores. A compra de maquinários para construção de processos produtivos, são as que mais necessitam da realização de testes de validação, tendo em vista a segurança não apenas do

processo de fabricação como um todo, mas também dos operadores destas máquinas. Os custos da realização destes testes não podem impedir que fornecedores garantam esta segurança. Logo, os compradores devem ter a garantia, usando seu poder de barganha e impondo requisitos para compra destes maquinários. Este tópico específico de como avaliar tais requisitos na compra de máquinas ou equipamentos, levando em consideração os métodos já aplicados para seleção de fornecedores, é objeto de estudo deste trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

A busca por parceiros pelas empresas se inicia na sua instalação física e na aquisição de equipamentos para montagem do seu processo produtivo. Estes parceiros/fornecedores são de extrema importância no início da operação produtiva e na garantia de funcionamento constante.

As técnicas de seleção destes fornecedores de equipamentos se mostram ainda mais complexas em comparação aos fornecedores de matéria-prima, pois além de considerarem as imprecisões dos julgamentos dos decisores, devem considerar ainda as dificuldades demonstradas por Hu *et al.* (2012), como a falta de discussão científica suficiente antes de comprar, a falta de procedimentos operacionais padronizados, resultantes dos problemas de comunicação entre os departamentos, a falta de critérios rígidos para aceitação de equipamentos, dentre outras exigências de especificações técnicas que impactam na escolha dos fornecedores a longo prazo.

Hu *et al.* (2012) discutem, ainda, a gestão de compra de grandes equipamentos para instituições de tecnologia de medição, mostrando que não são apenas fornecedores dos equipamentos de produção em massa que entram nesta discussão, mas sim fornecedores de equipamentos como um todo, como equipamentos de segurança, equipamentos hospitalares, dentre outros. Hess (2009) discorreu não apenas sobre a importância que as especificações técnicas possuem quando se trata de segurança, especificamente em usinas nucleares, mas também sobre a dificuldade de avaliação desta segurança, em casos em que não existem padronizações destas especificações, causando perda de informação, dificuldades de comparações, fiscalizações e, conseqüentemente, elevação de riscos.

Pensando na importância da seleção adequada de fornecedores e nos métodos de escolha propostos na literatura, além da escassez de estudos na escolha de fornecedores de equipamentos, este estudo propõe a estruturação do contexto decisório de seleção de fornecedores de equipamentos, conectando a aplicação de testes de especificações técnicas aos modelos multicritério de decisão. A escassez citada anteriormente, pôde ser visualizada na revisão da literatura, onde 78% dos estudos obtidos neste contexto são aplicações em casos

reais e apenas dois deles são problemas de seleção de fornecedores de equipamentos, mostrando uma maior tendência nos estudos com fornecedores de matérias-primas.

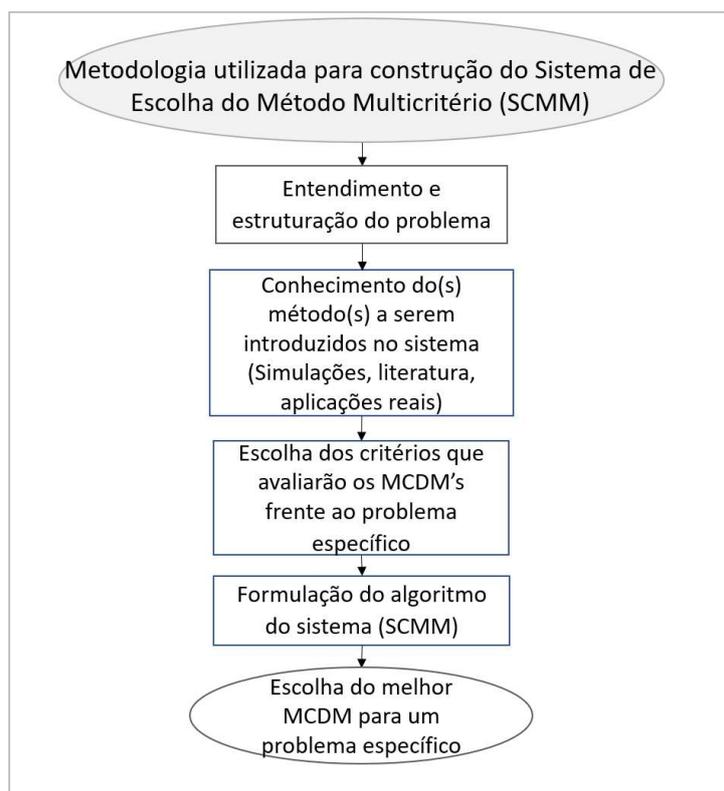
A conexão dos métodos MCDM com a aplicação dos testes de especificações, tem como objetivo estimular a execução de testes que certifiquem determinadas características dos equipamentos, como por exemplo testes de qualificação, que tem como objetivo qualificar os equipamentos de cada fornecedor verificando se estes equipamentos têm as especificações necessárias para desenvolvimentos dos processos produtivos da empresa, os testes de vida acelerada, que verificam o desempenho dos equipamentos submetendo-os a situações extremas de uso, além da avaliação dos históricos das experiências anteriores das empresas com os fornecedores de equipamentos.

Além do incentivo e da estruturação dos dados técnicos fornecidos pelos fornecedores, este estudo contribui ainda com a criação de um sistema de escolha do método multicritério que melhor se adeque às características de um problema específico. Para a criação deste sistema, foi verificada a necessidade de conhecimento dos diversos métodos multicritérios existentes na literatura, e de aprofundamento do conhecimento em uma parte deles. Quando um especialista escolhe um determinado método, o seu comportamento é identificar as características do problema e escolher um método que melhor se adeque a estas características. O sistema criado neste estudo, tem o intuito de imitar este comportamento dos especialistas.

Para isso, foi verificada a necessidade de aplicação de simulações de diversos métodos multicritério em um mesmo problema, com o objetivo que identificar quais as necessidades de cada método frente as características do problema de SSP de equipamentos. Após a aplicação destas simulações, foi possível identificar as vantagens e desvantagens de cada método frente ao problema, o que serviu de base para a criação do sistema. Dessa forma, os gerentes que realizarem aplicações de MCDM em problemas de fornecedores de equipamentos já poderão identificar, dentre aqueles abordados neste estudo, o método que mais se adeque às características de seu problema específico.

Os métodos multicritério aplicados nesta dissertação (SMARTS, SMARTER, Trade-off, FITradeoff, AHP, ELECTRE e PROMETHEE) foram escolhidos a partir da revisão da literatura, porém outros podem ser aplicados e testados neste sistema específico. As simulações aplicadas, são importantes para detectar quais os métodos MCDM que conseguem levar em consideração os testes de especificações técnicas e quais não. O sistema criado, teve como referência o procedimento baseado no modelo de aplicação de métodos MCDM proposto por Almeida (2013) e na metodologia Pugh de decisão aplicada por Thakker *et al.* (2009). A metodologia aplicada para auxiliar na construção deste sistema pode ser entendida na Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Metodologia utilizada na criação do sistema SCMM



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

É importante destacar que a comparação dentre simulações, realizada para escolha de método a ser aplicado, não tem como objetivo comparar os resultados obtidos pelos métodos em um determinado problema, mas sim comparar os pontos pelos quais cada método se adequa à um determinado problema, a fim de auxiliar gerentes na escolha de um MCDM que melhor atenda às suas necessidades. As características dos problemas como, por exemplo, a racionalidade do decisor, o tempo disponibilizado por ele, a importância do problema para a empresa, a possibilidade de utilização de um software, dentre outros, são pontos que auxiliam na realização destas comparações e conseqüentemente na construção do sistema.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo em vista a elevada aplicação de métodos multicritério em problemas de seleção de fornecedores (CHAI; LIU; NGAI, 2013), esta dissertação tem como objetivo geral conectar um problema específico de seleção de fornecedores (de equipamentos) com os métodos MCDM, utilizando os testes de especificações técnicas como critérios, Além de criar um sistema que auxilie gerentes na escolha de métodos que se adequem a seus problemas específicos.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Introduzir uma base teórica sobre os critérios de especificações de equipamentos e sobre os métodos MCDM.

- Abordar testes específicos, como os testes de qualificação técnica e testes de vida acelerada, que foram previamente definidos;
- Abordar a utilização de dados históricos das experiências de fornecedores com as empresas, por meio de métodos MCDM.
- Estruturar a utilização destes testes em SSP, avaliando na literatura os métodos MCDM que são mais aplicados neste tipo de problema, como por exemplo o AHP, *trade-off*, SMARTS, dentre outros;
- Avaliar vantagens e desvantagens da aplicação desses métodos MCDM no problema de seleção de fornecedores de equipamentos, por meio da aplicação de simulações.
- Por meio dos *insights* obtidos com as simulações, criar sistema que auxilie na escolha de um MCDM adequado às características específicas de um problema real.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação é composta por mais 4 capítulos. O Capítulo 2, Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura, apresenta estudo bibliográfico demonstrando quais são os métodos multicritério mais abordados na seleção de fornecedores, além de apresentar a base teórica para os critérios de estudo específicos deste trabalho. O Capítulo 3, Metodologia e Simulações, apresenta a problemática de interesse desse estudo, o procedimento de tratamento e aplicações de simulações em métodos MCDM para obtenção de *insights* por meio das aplicações dos métodos citados no Capítulo 2. Além disso, avalia os resultados obtidos nas simulações, as implicações na escolha de fornecedores de equipamentos e quais os benefícios para os gestores a partir deste estudo. O Capítulo 4, Sistema de Escolha do Método Multicritério (SCMM), explica o sistema de escolha do método multicritério (SCMM), criado para auxiliar os gestores na escolha de um método que melhor se adeque as especificações de cada problema. O Capítulo 5, Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros, finaliza este trabalho, mostrando os pontos abordados e quais aplicações podem ser sugeridas para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

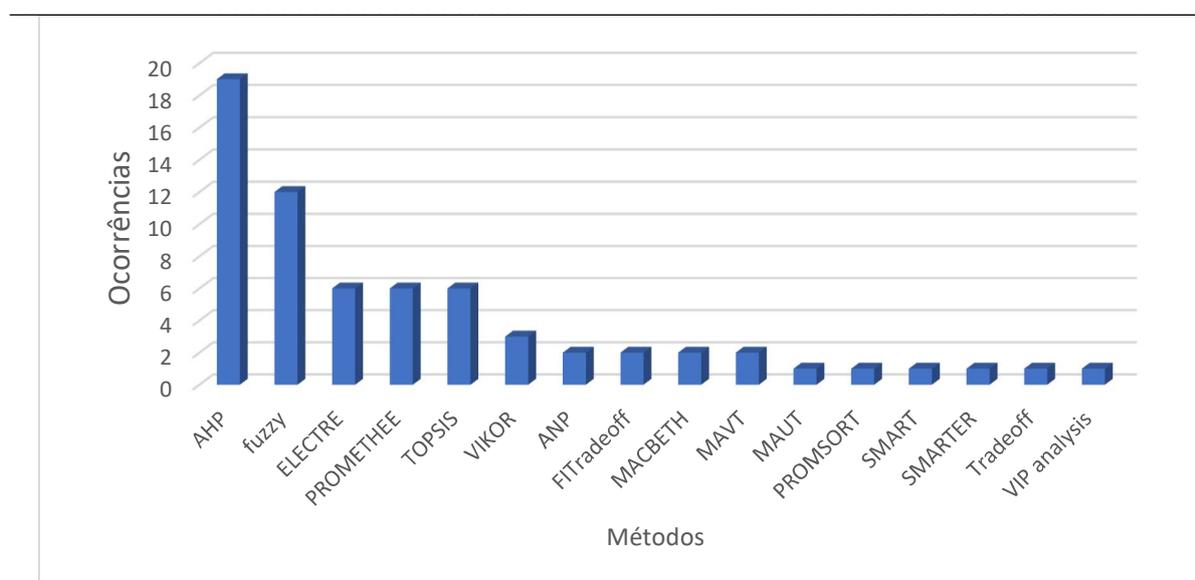
2.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES

Como já mencionado, a seleção de fornecedores é uma atividade complexa, que depende da avaliação de múltiplos critérios, sendo identificada, na literatura, a aplicação de diversos métodos MCDM. O problema de seleção de fornecedores (SSP), por ser vastamente aplicado, também é objeto de várias revisões da literatura, como o estudo de Junior, Osiro e Carpinetti (2012), que realizaram uma análise de 120 artigos sobre o tema, publicados entre 2000 e 2008. Viana e Alencar (2012) analisaram 56 artigos publicados entre 1998 e 2011, Guarnieri (2015) analisou 45 artigos publicados entre 2001 e 2012, além de Moliné e Coves (2013), que analisaram 39 artigos entre 2007 e 2013.

Uma busca na literatura por aplicações de métodos multicritério em problemas de SSP foi realizada, onde 51 estudos encontrados apontaram a utilização dos métodos apresentados na Gráfico 1, esta busca foi realizada com o auxílio das palavras chave “supplier selection problem”, “supplier selection and evaluation problem” e “multicriteria supplier selection problem”, em sites de dados nacionais e internacionais. Estes estudos são apresentados por meio de artigos, dissertações ou teses, onde se pode verificar uma maior aplicação dos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ANP (*Analytic Network Process*), PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution*), ELECTRE (*Elimination and Choice Translating Algorithm*), SMART (*Simple Multicriteria-Attribute Rating Technique*), PROMSORT (PROMETHEE *Sorting*), VIKOR (*Visekriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje*), VIP *analysis* (*Variable Interdependent Parameters*), além de outros métodos identificados e que podem ser vistos no (APÊNDICE A), juntamente com seus autores e ano de publicação.

Observou-se também, a grande aplicação de métodos *fuzzy* híbridos, confirmando a tendência pela busca de técnicas com aplicações em situações de incerteza já mostrada nas revisões da literatura realizadas por Chai, Liu e Ngai (2013) e por Simié *et al.* (2017).

Gráfico 1 – Número de aplicações de cada MCDM em SSP



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

O SSP recebe aplicações de metodologias não só multicritério, mas também de programação matemática e inteligência artificial. Um destaque das aplicações em SSP é a utilização da lógica *fuzzy*, que é baseada na teoria dos conjuntos difusos de Zadeh (1965), apropriada para lidar com ambientes de incerteza (GANGA *et al.*, 2016). Inúmeros métodos híbridos como *fuzzy-AHP*, *fuzzy-TOPSIS*, *fuzzy-ELECTRE* podem ser facilmente identificados nas revisões, sendo considerados por Junior, Osiro e Carpinetti (2012) como a metodologia mais adequada de lidar com imprecisões.

Dentre os estudos supracitados, 78% são aplicações em casos reais e apenas dois deles são problemas de seleção de fornecedores de equipamentos, mostrando uma maior tendência nos estudos com fornecedores de matérias-primas. Isso pode ser explicado pela necessidade da compra de materiais de forma mais contínua em relação às compras de maquinários. Além disso, existe uma indisponibilidade de dados históricos dos fornecedores de maquinários tendo em vista que o contato com estes seja apenas uma vez e/ou em manutenções casuais. Um procedimento de compartilhamento de dados pode ser apontado como um estudo futuro, visando diminuir este problema de escassez de informações. Entretanto, o tratamento de fornecedores de equipamentos é de extrema importância por motivos como o grande capital investido em maquinários, além da importância desses equipamentos em setores específicos como na saúde, agropecuária, elétrica, petróleo e gás, dentre outros.

Alguns autores apresentam estudos, em que se menciona a obtenção de dados históricos da experiência dos fornecedores. Porém, estes dados não são demonstrados de forma explícita para o leitor, ou seja, na aplicação de um MCDM, é realizada a elicitación para a obtenção das constantes dos critérios, a função valor é normalizada e se aplica o método de avaliação sem a explicação de como estes dados foram obtidos e/ou como foram tratados. Alguns critérios quantitativos como preço, tempo de espera e localização geográfica são postos na função valor

de forma simples. Porém, critérios como confiabilidade e especificações técnicas de equipamentos necessitam de avaliações que, em sua maioria, não são estruturadas e/ou demonstradas nos estudos.

Além disso, variadas abordagens de critérios de confiabilidade foram encontradas na literatura. Porém, estes critérios são em sua maioria relacionados à confiança que as empresas possuem nos fornecedores que já possuem experiência. O mesmo ocorre com os testes de qualificações, que são realizados e tratados como critérios ou subcritérios de qualidade, sem citar como foram realizados. Por exemplo, Souza e Carmo (2015) realizaram uma avaliação de fornecedores de chapa de aço e citaram a resistência do material e a flexibilidade da chapa como aspectos elementares da qualidade. Porém, ao citar critérios de confiabilidade, levam em consideração prazos de entrega e capacidade de atendimento de demanda, que são, em verdade, pontos de confiança, tendo em vista que não se mostram dados históricos tratados estatisticamente.

2.2 CRITÉRIOS QUALIFICADORES

Temperaturas, medidas, cores, precisão, força, energia, podem ser algumas das necessidades técnicas que uma máquina deve atender na produção a que foi destinada. Para cada ramo industrial diferentes especificações podem ser necessitadas e, portanto, é importante para as empresas conhecer seus fornecedores de equipamentos e as garantias atribuídas a estas aquisições, tendo em vista o alto valor associado. Para isto, testes técnicos podem ser utilizados com o objetivo de se obter conhecimento prévio das capacidades destes maquinários. Estes testes serão tratados, nesta dissertação, como critérios e podem ser classificados como se segue:

2.2.1 Testes de qualificação

Assim como diplomas e certificados podem servir de base para contratação de profissionais em diversos ramos do mercado, os fornecedores também podem se utilizar de certificações, que asseguram a qualidade de seus equipamentos em determinadas características tomadas como essenciais para a empresa produtora/cliente. Algumas organizações com certificações para máquinas e ferramentas, que podem ser citadas são a *International Organization for Standardization (ISO)*, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *British Standards Institution (BSI)*, dentre outras, que normalizam diversos procedimentos. Estas certificações, contudo, muitas vezes não são obrigatórias e geram custos às empresas que as obtêm.

Como mencionado anteriormente, máquinas e equipamentos são utilizadas por diversos setores com inúmeras necessidades particulares que podem ser tratadas por meio de testes específicos como os de força de tensão (ASTM F2079), energia (ISO 14955-1), adesão (ISO

2411), resistência (ASTM F88), acurácia geométrica (ISO 230-1), dentre outros que melhor certifiquem as necessidades de produção das máquinas, dos seus tipos de materiais compostos e de suas peças de testes produzidas. Além das características dos produtos, estes testes podem atender ainda às exigências e preocupações da sociedade como um todo. Por exemplo, a norma ISO 14955-1 trata de uma avaliação ambiental de máquinas visando economia de energia (TRANCHARD, 2018), atendendo assim exigências ambientais de clientes preocupados com a sustentabilidade. No Brasil, as empresas têm como auxílio o centro de informação tecnológica e para negócios (CIT), que tem como foco o conhecimento das normas técnicas e que fornece serviços como, por exemplo, a indicação de normas aplicáveis em determinadas necessidades ou sobre o conteúdo específico de uma norma.

As especificações dos produtos podem influenciar os custos dispendidos com estas certificações. Produtos com grandes dimensões, por exemplo, podem necessitar de máquinas/robôs também com grandes dimensões e, conseqüentemente, maiores gastos com material para teste, energia e tempo. Ibaraki, Yosshida e Asano (2019) mostraram que, se tratando de produtos com grandes dimensões, uma das preocupações está na eliminação de erros geométricos das peças, que geralmente são usinadas por máquinas com eixos rotativos. Afirmaram ainda que a causa destes erros pode estar na montagem da máquina, necessitando, portanto, de testes após a montagem da estrutura. Uma outra causa de erros geométricos nas peças foi apontada por Wiessner *et al.* (2018), afirmando que 75% destes são causados por erros termicamente induzidos das máquinas.

Ferramentas e determinados instrumentos de precisão necessitam de acompanhamentos contínuos, o que também deve ser observado pelas indústrias na hora de realizar compras destes equipamentos. Liu *et al.* (2019) descreveram um método que determina erros de coaxialidade por meio da utilização de três sensores capacitivos, que pode ser aplicado em ferramentas de precisão, levando conseqüentemente a uma avaliação constante da ferramenta em questão. Como se observa, diversos testes de qualificação podem ser aplicados, nas mais diversas áreas, avaliando sistemas como um todo, a qualidade de peças testes que ajudam na identificação de erros em máquinas, além de testes de resistência, fadiga e desempenho de materiais específicos como por exemplo o aço, o metal ou a cerâmica. A utilização de materiais compósitos em estruturas aeroespaciais, naval ou automotiva, aumentou a necessidade de pesquisas e criação de projetos para avaliações da qualidade de cada novo material, assim como fizeram Kulkarni, Sawant e Kulkarni (2017) desenvolvendo máquinas de teste de fadiga de flexão plana para estes materiais compósitos.

Testes de qualificação em máquinas podem ser realizados em diversos momentos, desde a sua fabricação, em materiais específicos, processos para diminuição de mortalidade infantil (*burn-in*), ainda nas dependências do fornecedor, até a instalação nas dependências das

indústrias, exemplo disto são os estudos realizados por Ibaraki, Yosshida e Asano (2019) e por Liu *et al.* (2019). Logo, o acompanhamento do fornecedor em toda a vida dos seus maquinários, por meio de realização de testes, auxílio na instalação, oferecimento de treinamento e até em serviços de manutenção, são critérios chaves que influenciam, ou deveriam influenciar na decisão de compra de máquinas por parte das indústrias.

É importante destacar, que os testes de qualificação são caracterizados como verificadores de sistemas, ou seja, eles verificam se o maquinário/equipamento está funcionando de acordo com o que foi projetado, por exemplo, Liu *et al.* (2019) utilizaram sensores para esta verificação de forma constante. Eles não são responsáveis pela obtenção de dados históricos para se processar informações de confiabilidade do maquinário, que também são importantes para avaliação de fornecedores desse tipo. O critério de histórico de dados será mais bem explicado na seção 2.2.3.

2.2.2 Testes de vida acelerada

Uma outra forma de avaliação da qualificação dos equipamentos é por meio de testes de vida acelerada, importante principalmente nas avaliações de compras B2B (*business to business*), tendo em vista a necessidade de eficiência no contexto mercadológico atual, especificamente em se tratando de tecnologias. Regattieri *et al.* (2017) mostram a importância da introdução de produtos no mercado de forma inovadora, eficiente e com altos graus de confiabilidade. Esta informação de confiabilidade é dependente de dados, que não estão disponíveis quando se trata de produtos novos. É principalmente nestes casos, que se necessita aplicar os testes de vida acelerada, pois possibilitam avaliar as funcionalidades do produto ainda em fábrica, antes de ser utilizado por qualquer usuário, possibilitando assim identificar, por exemplo, pontos de melhoria, segurança do usuário e vida útil.

Como mencionado anteriormente, os testes de vida acelerada são outro meio de qualificação dos equipamentos, que, de modo geral, leva o equipamento a condições extremas de uso, para que se possa verificar o seu desempenho de forma rápida podendo assim inferir características de durabilidade e vida útil em condições normais de uso. É, por meio destes testes, que, na compra de determinados materiais ou produtos, estima-se o seu tempo médio de vida. O estudo recente de Stamminger *et al.* (2018) teve como objetivo a construção de um procedimento para realização de testes de durabilidade em máquinas de lavar, que pode ser utilizado, num futuro próximo, com o objetivo de fiscalizar e incentivar a construção de produtos mais duráveis. Desse estudo, são retirados vários pontos da importância da realização desses testes, como a preocupação com a redução do consumo de matérias-primas e minimização de resíduos, levando conseqüentemente a um menor impacto ambiental.

Testes de vida acelerados também foram estudados por Paraforos, Griepentrog e Vougioukas (2016) em que, por meio de estudos em máquinas agrícolas, construíram uma metodologia estruturada para aplicação desses testes. Assim como no estudo de Stamminger *et al.* (2018) citado anteriormente, estes autores se preocuparam com a adequação de seus testes com a utilização dos maquinários por seus usuários na vida real. Esta preocupação é importante para identificar quais são os fatores que vão influenciar a simulação de uso da máquina durante o teste, de forma que se possa acelerar seu uso sem influenciar nos resultados almejados. Variações de carga, de pressão, temperatura e simulações de chuva e solavancos são alguns dos muitos pontos que devem ser estudados para aplicação de cada teste específico.

Assim como cada equipamento possui a necessidade de testes de qualificação específicos, os testes de vida acelerada também devem ser avaliados de acordo com cada função do equipamento. Isso acontece, porque os tipos de dados utilizados em cada aplicação são variáveis, podendo ser estudadas por meio de diferentes funções de distribuição de probabilidade, onde de acordo com Regattieri *et al.* (2017) as mais utilizadas são a Weibull, a Exponencial e a Log-normal.

Paraforos, Griepentrog e Vougioukas (2016), Borgia *et al.* (2013) e Mattetti *et al.* (2019) também comentam sobre desvantagens relacionadas aos custos financeiros de recursos e tempo para realização destes testes, sendo este um dos grandes pontos que influenciam os fornecedores a não realizarem. Cabendo assim aos consumidores impor seu poder de barganha, na exigência de equipamentos com funcionamento eficiente a longo prazo, influenciando conseqüentemente os fornecedores a realizarem testes de vida acelerada, que verificam a degradação dos equipamentos ao longo do tempo. Ademais, Borgia *et al.* (2013) mostram que a aplicação destes testes pode levar a identificação de peças críticas no produto, auxiliando na melhoria da qualidade oferecida ao cliente ou até mesmo em maior prazo de garantia o que conseqüentemente gera uma vantagem competitiva.

2.2.3 Histórico de dados

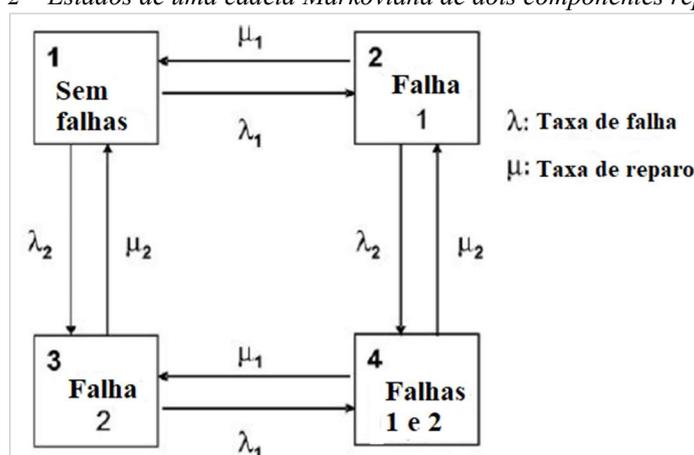
Tendo em vista a complexidade dos problemas reais e a possibilidade da existência de empresas que já possuem experiência com fornecedores de equipamentos, um terceiro critério é o tratamento de dados históricos da utilização de maquinários, onde diversas informações relevantes para a classificação dos fornecedores podem ser identificadas. Diferentemente dos testes anteriores, realizados com os equipamentos/maquinários ainda sob responsabilidade dos seus fornecedores, este critério é de responsabilidade das empresas compradoras, onde por meio de uma adequada observação e obtenção de dados de uso, podem tomar decisões de forma a minimizar custos no curto e longo prazo.

É importante frisar que cada caso pode abordar a análise de confiabilidade de forma específica. Máquinas de grande porte, por exemplo, podem ser tratadas como sistemas com possível realização de manutenções em determinados componentes reparáveis, mas as empresas podem recolher dados apenas de determinados componentes não reparáveis. O recolhimento destes dados, como já citado por Hu *et al.* (2012), não possui um procedimento padrão global, o que torna o problema complexo. Entretanto, normas de determinadas áreas específicas podem servir como base para a coleta de dados, como por exemplo a ISO 14224 destinada à indústria de petróleo e gás natural.

Cadeias de Markov são frequentemente utilizadas em análises de confiabilidade (BILLINTON; ALLAN, 1992), em se tratando de sistemas com componentes reparáveis. Como máquinas de médio e/ou grande porte, que não são trocadas em curtos prazos, estas análises podem auxiliar na identificação, por exemplo, do tempo médio entre falhas, auxiliando no estudo de manutenções preventivas. O estudo recente de Ye *et al.* (2019) utiliza cadeia de Markov como base para otimização da confiabilidade de projeto e manutenção de sistemas, ou seja, otimizar a disponibilidade de sistemas de modo a maximizar o lucro.

Como pode ser visualizado na Figura 2, estas cadeias Markovianas consideram que estes sistemas podem estar em um estado, dentre vários, que caracterizam o funcionamento, quando os componentes críticos do sistema estão funcionando, ou a falha, quando falha todos (sistema em paralelo) ou pelo menos um (sistema em série) componente crítico do sistema. Du *et al.* (2017) afirmaram ainda, que existem estados em que algum componente pode estar em falha negligenciada, porém o sistema permanece em funcionamento.

Figura 2 – Estados de uma cadeia Markoviana de dois componentes reparáveis



Fonte – Adaptado de Ye *et al.* (2019)

Para melhor entendimento da aplicação de cadeia de Markov nos casos de sistemas de componentes reparáveis em paralelo, o exemplo da Figura 2 é interpretado de forma que o maquinário funciona no estado 1, onde os dois componentes trabalham sem falhas, no estado 2

onde apenas o componente 1 falha e no estado 3, onde apenas o componente 2 falha. Neste caso, o maquinário para seu funcionamento apenas no estado 4, onde os dois componentes estão em falha. Uma outra forma de interpretação deste sistema seria, com componentes em série, onde com a falha de pelo menos um componente, o sistema para de funcionar, ocorrendo conseqüentemente uma maior probabilidade de parada do sistema como um todo. Com esse exemplo, pode-se perceber, que quanto maior o maquinário em observação, maior a quantidade de componentes reparáveis existentes nele e, conseqüentemente, maior a complexidade e tipos de interpretações da cadeia de Markov resultante.

Um exemplo atual de aplicação de análise Markoviana em um maquinário de grande porte pode ser dado pelo estudo de Agrawal, Murthy e Chattopadhyaya (2019), que analisaram a confiabilidade, manutenção e disponibilidade de uma máquina de perfuração de túnel, utilizada para irrigação, drenagem, defesa ou construção de linha de metrô. Este estudo serve de exemplo para demonstrar a importância destas análises, tendo em vista o alto custo de manutenção e assistência de maquinários nestas condições, tendo sido possível chegar a uma indicação de manutenções preventivas de forma a aumentar a disponibilidade da máquina e conseqüentemente diminuir os custos e tempo com manutenções corretivas.

Pode-se destacar que a possibilidade de aplicação de análises Markovianas para estimar a confiabilidade de funcionamento de um maquinário em um tempo pré-determinado, pode ser um ponto importante que agrega na avaliação de fornecedores. Como já citado, existe uma negativa na aplicação de testes de especificações técnicas, por causa dos custos acarretados. Porém, todos os argumentos acima ajudam a explicar a necessidade de aplicação de todos os critérios em conjunto, não apenas aqueles obtidos por parte dos fornecedores de equipamentos, como também pelas empresas usuárias.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Os métodos de agregação aditiva determinísticos são muito utilizados em problemas de seleção de fornecedores e a sua parametrização pode ser realizada por métodos como *trade-off*, SMART, MACBETH, AHP, TOPSIS, dentre outros, que se diferenciam pela forma de elicitação dos parâmetros do modelo junto aos decisores (ALMEIDA, 2013). A obtenção desses parâmetros permite a realização de uma ponderação aditiva que resulta em um único critério de síntese para cada alternativa. Os métodos de sobreclassificação, como ELECTRE, PROMETHEE, também são bastante aplicados em SSP, diferenciando-se dos métodos de agregação, principalmente, por realizarem comparações pareadas.

A utilização destes métodos está exposta a vários tipos de erros tanto de modelagem quanto de elicitação. De fato, problemas na escolha do procedimento de normalização alinhados com o estabelecimento das constantes de escala podem ocasionar mudanças na ordenação final

das alternativas. Portanto, cuidados na estruturação dos problemas devem ser tomados para a eliminação desses erros.

A apresentação e aplicação de cada método abordado nesta dissertação tem como base a revisão demonstrada na Gráfico 1. Além disso, foram escolhidos métodos de forma a abranger abordagens da agregação única de síntese e da sobreclassificação. A seguir, alguns destes métodos serão apresentados e os principais pontos, não apenas os que levam a erros, mas também de comparação com outros métodos, são elencados para que possam ser levados em consideração no momento de escolha pelos decisores.

2.3.1 *Simple Multicriteria-Attribute Rating Technique (SMART)*

O *Simple Multicriteria-Attribute Rating Technique (SMART)* é um dos métodos que utiliza a agregação aditiva em avaliações intercritério. Foi proposto por Edwards (1977), que defendeu a realização de eliciações dos pesos com avaliações mais diretas, argumentando que os julgamentos de indiferença propostos por modelos como o *trade-off* pareciam difíceis, instáveis e que, conseqüentemente, o julgamento dos decisores não representava as suas preferências reais.

O SMART não foi, inicialmente, aceito, devido a erros na proposta de eliciação dos pesos. Este método ignora o fato que o grau de importância dos critérios (pesos) depende da dispersão de cada critério com relação à todas as alternativas (intracritério). Edwards e Barron (1994) apresentaram dois métodos derivados do SMART, que corrigem esse erro. São eles o SMARTS (SMART using swings) e o SMARTER (SMART Exploiting Ranks). O SMARTS possui as seguintes etapas (EDWARDS e BARRON, 1994):

- I. Identificação dos propósitos do problema e do(s) decisor(es) que o represente;
- II. Identificação e estruturação do problema e seus atributos;
- III. Estabelecimento das alternativas;
- IV. Construção da matriz de consequências;
- V. Eliminação das alternativas dominadas;
- VI. Construção da matriz de avaliação;
- VII. Ordenação dos critérios (Parte 1 do Swing);
- VIII. Obtenção dos pesos (Parte 2 do Swing);
- IX. Efetuar a agregação aditiva e escolha.

O SMARTER possui os mesmos passos supracitados diferenciando-se apenas na etapa VIII, onde os pesos são obtidos por meio da metodologia ROC (*Rank Order Centroid*), introduzida por Barron e Barrett (1996). Tanto o SMARTS quanto o SMARTER diminuem a quantidade de perguntas feitas ao decisor e o stress intelectual provocados pelo processo de

obtenção dos pesos, em comparação com outros métodos. Essa característica diminui erros na elicitação. Porém, pode possibilitar erros na modelagem. Este balanço entre erros de elicitação e erros de modelagem são consequências da complexidade de se representar o mundo real.

Uma terceira forma de uso do SMART foi identificada no modelo híbrido *fuzzy*-SMART proposto por Chou e Chang (2008) para o apoio à decisão no problema de escolha de fornecedores. Este modelo objetivou uma abordagem, que suportasse a estratégia da empresa por meio de critérios não só quantitativos, mas também qualitativos, lidando com a imprecisão de avaliações linguísticas. Esse modelo foi aplicado em um problema com múltiplos decisores (GDM - *group decision-making*) e apresenta vantagens na aplicação em SSP.

As avaliações *fuzzy* mostraram-se intuitivas aos decisores e os critérios quantitativos foram transformados em classificações *fuzzy*, para se tornarem compatíveis com os critérios qualitativos. Além disso, o sistema proposto permite que um decisor final considere os riscos de fornecimento de fornecedores individuais usando um coeficiente de risco α . Este risco de fornecimento avalia a confiança que o decisor final tem em cada fornecedor na entrega do produto requerido, na quantidade necessária e na data exigida.

Salminen, Hokkanen e Lahdelma (1998) realizaram uma comparação dos métodos SMART, ELECTRE III e PROMETHEE I, II no contexto de problemas ambientais. Este estudo permite a obtenção de características da aplicação do SMART, que, dentre elas, estão a possibilidade de aplicação em problemas com grande número de decisores (GDM), o contato com os decisores limitado à ponderação dos critérios e a equivalência dos *rankings* obtidos com o SMART e o PROMETHEE II nas funções lineares, pois este se difere do SMART apenas por um termo constante do fluxo líquido. Além disso, o SMART possibilita uma relação de ordem completa entre as alternativas devido a relações de preferência estrita e indiferença entre os critérios.

2.3.2 *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma abordagem aplicada a problemas MCDM, criado por Thomas L. Saaty no início da década de 1970 (R. W. SAATY, 1987). Assim como no SMART definido anteriormente, também realiza agregação aditiva compensatória e se diferencia dos outros métodos multicritério por possuir uma estrutura própria de elicitação da função valor, onde os objetivos, critérios, subcritérios e alternativas são sucessivamente hierarquizados e o tomador de decisão responde a uma série de comparações par a par. Saaty (1983) definiu os seguintes passos para utilização do AHP:

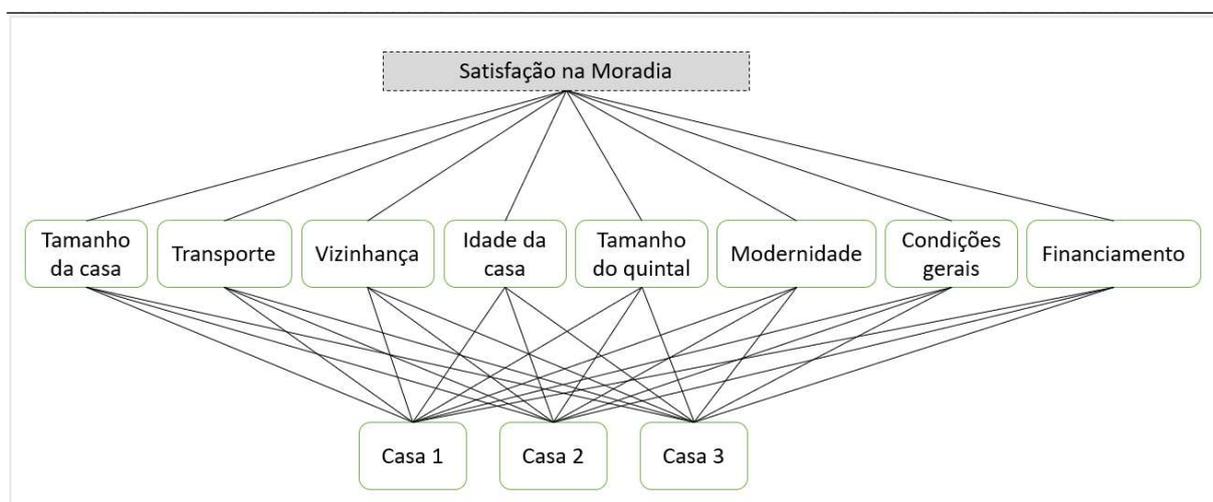
- I. Definir o problema e especificar a solução desejada;
- II. Estruturar a hierarquia dos níveis de objetivos mais altos, passando pelos critérios até as alternativas disponíveis;

- III. Construir matrizes de comparação par a par entre todas as alternativas com relação a cada critério (ou subcritérios) de nível superior. Estas comparações seguem a escala fundamental de Saaty com 1-9 pontos;
- IV. Obtêm-se todos os $(n(n - 1) / 2)$ julgamentos especificados para cada matriz desenvolvida em III;
- V. O autovalor é verificado ($Aw = \lambda_{\max}w$) e a consistência é testada;
- VI. Os passos III, IV e V são repetidos para todos os níveis e clusters na hierarquia;
- VII. A composição hierárquica é utilizada para ponderar os autovetores pelos pesos dos critérios;
- VIII. A consistência (IC) é avaliada para toda a hierarquia. A razão de consistência deve ser menor ou igual a 10% para ser aceitável, caso contrário a qualidade dos dados deve ser melhorada.

A sua facilidade de compreensão e aplicação se mostram atrativas, podendo ser aplicado a problemas com critérios qualitativos e quantitativos (BASSET *et al.*, 2018), tornando, portanto, muito utilizado, como se pode observar no resultado da pesquisa mostrado na Gráfico 1. Porém, sua aplicação, em problemas com um grande número de decisores, pode se tornar complexa, tendo em vista que o número de comparações aumenta proporcionalmente ao número de decisores. Saaty (1986) afirmou que a maneira de agregar o julgamento de um grupo é tomando a média geométrica das comparações. Além disso, Krejčí e Stoklasa (2018) mostram a superioridade da utilização da média geométrica em comparação com a média aritmética para obtenção dos pesos em AHP.

A etapa VII do AHP, onde a consistência da avaliação pareada é avaliada, também é outro ponto que pode levar a uma necessidade de nova avaliação pelo decisor e, conseqüentemente, a um maior estresse psicológico deste. Além disso, como todos os critérios, sejam eles quantitativos ou qualitativos, são avaliados segundo a escala fundamental de Saaty (1990), leva-se a uma avaliação numérica implícita das alternativas de acordo com cada critério. Ou seja, a função valor normalizada não está relacionada aos valores reais dos critérios quantitativos, o que pode levar a uma pequena perda da informação dos dados reais, tendo em vista que estes valores podem variar de acordo com cada decisor que possa realizar as comparações pareadas. A Figura 3 mostra um exemplo de representação da hierarquia de um problema apresentado por Saaty (1990), onde o principal objetivo do problema era obter satisfação da moradia, por meio da decisão de escolha entre três casas (alternativas), avaliadas por oito critérios, sendo eles o tamanho, transporte, vizinhança, idade da casa, quintal, modernidade condições gerais e financiamento.

Figura 3 – Representação de um problema por hierarquia



Fonte – Adaptado de Saaty (1990)

A escala fundamental de nove pontos de Saaty avalia os julgamentos pareados sobre uma escala de razão, que tem como pressuposto a existência de um zero absoluto. Essa característica deve ser avaliada para cada critério específico, tendo em vista que nem todos os critérios podem possuir essa característica.

2.3.3 Trade-off

Um outro procedimento de avaliação intercritério do modelo aditivo é o *trade-off* que foi apresentado por Keeney e Raiffa (1976) e é considerado um dos procedimentos de elicitação mais rígidos (WEBER e BORCHERDING, 1993), levando o decisor a apontar relações de indiferenças entre as consequências dos atributos, possibilitando assim a obtenção das constantes de escala de cada critério.

Keeney (1982) afirma que esta etapa de avaliação envolve uma discussão entre analista e decisor para quantificar as possíveis consequências do problema. Além disso, avaliações adicionais são necessárias em problemas com múltiplos decisores, onde a importância relativa de cada um deve ser determinada e integrada em uma utilidade geral. Keeney e Raiffa (1976) apresentam um diálogo imaginário entre um interrogador e um respondente, mostrando como as perguntas devem ser realizadas de forma a não usar medidas inadequadas nesse processo e evitar erros de elicitação. Além disso, o entendimento do contexto e a obtenção das medidas de consequências são de extrema importância.

2.3.3.1 Flexible and Interactive Tradeoff elicitation method (FITradeoff)

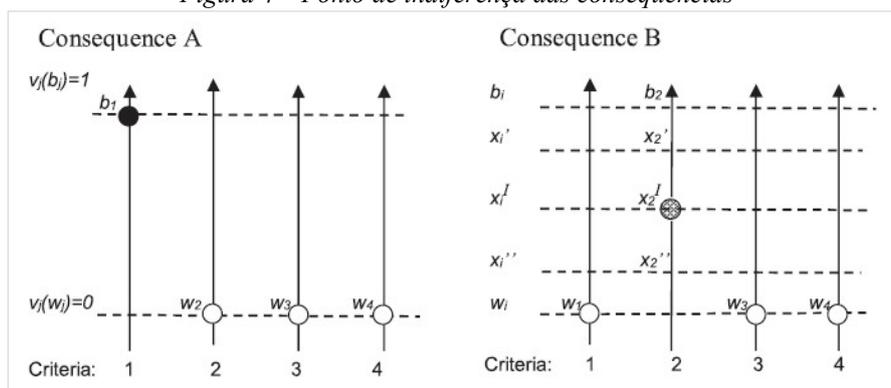
O grande esforço psicológico causado nos decisores e, conseqüentemente, as inconsistências possíveis pelo método *trade-off*, são alguns dos pontos que se busca evitar no método *Flexible and Interactive Tradeoff (FITradeoff)* proposto por Almeida *et al.* (2016). Diferentemente do *trade-off*, que leva o decisor a indicar pontos de indiferenças entre as

consequências, o *FITradeoff* busca informações parciais das preferências estritas dos decisores, levando a um menor esforço cognitivo.

É um método flexível, onde os passos do procedimento podem mudar de acordo com as diferentes condições de cada elicitación específica, possibilitando encontrar a solução com informações parciais dadas pelo decisor, encerrando o procedimento de elicitación, tão cedo quanto for possível encontrar a solução do problema com estas informações (ALMEIDA *et al.*, 2016). Ou seja, após o ranqueamento dos critérios, dependendo da complexidade do problema, do tempo fornecido pelo decisor, da necessidade e também do valor que este dá ao tipo de decisão em questão, o procedimento do *FITradeoff* pode adaptar-se pedindo mais informações ao decision maker (DM), aproximando-se mais do método *trade-off* ou pode, por exemplo, em problemas simples, encerrar a elicitación com apenas uma pergunta feita ao DM.

Na Figura 4, Almeida *et al.* (2016) mostram os pontos em que as consequências A e B se tornam indiferentes para um decisor. Tendo como pressuposto o ranqueamento de todos os atributos/critérios(k) e sendo $k_2 > k_1$ (onde k pode ser entendido como constante de escala da consequência que está sendo avaliada), o método *trade-off* busca exatamente o ponto de indiferença x_2^I necessitando, portanto, de n-1 equações de indiferenças para que os valores das constantes de escala sejam determinados. Em contrapartida, o *FITradeoff* busca pelos limites máximo x_2' e mínimo x_2'' por meio das relações de preferências, obtendo-se inequações que determinam uma faixa de valores, onde se tem certeza que o ponto de indiferença está. Cada nova informação obtida é utilizada para implementar uma restrição de um modelo de programação linear apresentado por Almeida *et al.* (2016) verificando se já é possível encontrar uma solução.

Figura 4 – Ponto de indiferença das consequências



Fonte – Almeida *et al.* (2016)

2.3.4 Métodos de Sobreclassificação

A partir da Gráfico 1, onde métodos multicritério aplicados em problemas de seleção de fornecedores foram identificados, pode-se também visualizar dois métodos de sobreclassificação entre os mais aplicados a este problema: o ELECTRE (*Elimination and*

Choice Translating Algorithm) e o PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*).

Estes dois métodos diferenciam-se dos métodos de agregação única de síntese em diversas características, como o fato de não serem compensatórios, realizarem comparações pareadas e seus pesos possuírem noção de grau de importância tendo em vista que a agregação não é realizada (ALMEIDA, 2013). É por isso que, em determinados momentos aparece no texto o termo constantes de escala, tendo em vista a abordagem de métodos compensatórios, o que não é o caso do PROMETHEE e do ELECTRE. Apesar de o método AHP também possuir comparação pareada, ele realiza uma agregação única, diferenciando-o dos métodos de sobreclassificação.

2.3.4.1 ELECTRE (*Elimination and Choice Translating Algorithm*)

O artigo mais antigo encontrado, que explica em detalhes a aplicação do ELECTRE foi publicado por Roy (1968). Porém, este artigo cita mais duas publicações de 1966 com notas de trabalho sobre este método com a participação de mais dois autores, R. Benayoun e B. Sussman. Após esta publicação original do ELECTRE, várias outras abordagens foram criadas ao longo dos anos, para problemas de escolha, ordenação e classificação. Govindan e Jepsen (2016) realizaram uma revisão da literatura com 544 artigos, que incluíam a utilização do ELECTRE em diversas áreas como engenharia química e bioquímica, saúde, agricultura, além da seleção de fornecedores.

Este método é baseado em comparações pareadas, que avaliam se uma alternativa prevalece ou é pelo menos tão boa quanto outra em todos os critérios. A sua aplicação é baseada em fases de construção e exploração destas comparações, realizados por meio de índices de concordância e discordância de cada sobreclassificação, onde cada método específico da família (Electre I, IS, II, III, IV ou TRI) se distingue pela forma de cálculo destes índices e na forma como os exploram na segunda fase (GOVINDAN E JEPSEN, 2016).

2.3.4.2 PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*)

Por sua vez, o PROMETHEE também realiza comparações pareadas entre as alternativas. Porém, diferencia-se do ELECTRE, pois nenhum conceito de discordância é posto neste método. No PROMETHEE, uma função de diferença é calculada com o intuito de identificar a intensidade de preferência entre as alternativas nos diferentes critérios. Esta função pode ser obtida de várias formas e os limiares de indiferença, preferência e incomparabilidade auxiliam na construção das ordens e/ou escolhas das alternativas.

A aplicação, tanto do ELECTRE como do PROMETHEE, é realizada após a construção da matriz de consequências normalizada e da definição de todos os pesos dos critérios, ou seja,

diferentemente do AHP que calcula internamente os pesos de cada critérios, nestes métodos de sobreclassificação, estes pesos já devem ser previamente elicitados junto com os decisores. Jati e Dominic (2017) utilizam um método de entropia para calcular os pesos dos critérios de um problema de *ranking* de universidades da Indonésia e, posteriormente, aplicam o PROMETHEE II com o objetivo de medir a visibilidade destas universidades na web. Vulevié e Dragović (2017), por sua vez, realizaram uma análise de sub-bacias hidrográficas com o objetivo de identificação dos pontos com maior risco de erosão do solo. Para isso, aplicaram o AHP para obtenção dos pesos dos critérios e, posteriormente, adotaram o PROMETHEE II, obtendo assim uma ordem completa das bacias e priorizando as medidas e obras apropriadas nos pontos de maior risco.

A utilização do PROMETHEE II, em maior número, pode ser entendida devido à obtenção de uma ordem completa e por ser de fácil entendimento. A facilidade de seus cálculos auxilia aplicações computacionais, como por exemplo o GAIA que é uma ferramenta de auxílio visual do PROMETHEE (ZINDANI e KUMAR, 2018).

2.4 SÍNTESE CONCLUSIVA DO CAPÍTULO

A partir da revisão da literatura apresentada neste capítulo, foi possível identificar quais são os métodos MCDM mais aplicados na literatura em problemas de seleção de fornecedores, possibilitando, assim, a realização da fundamentação teórica de alguns destes métodos. Tendo em vista o objetivo de conectar a seleção de fornecedores de equipamentos com os métodos MCDM, foram apresentadas também referências que tratam dos testes de qualificação técnica, vida acelerada e históricos de dados, sendo estes identificados como critérios fundamentais na escolha destes fornecedores. O próximo capítulo descreverá o problema como um todo e aplicará simulações dos métodos MCDM supracitados em um caso fictício, com o intuito de identificar vantagens e desvantagens da aplicação de determinados métodos, além de identificar *gaps* para auxiliar na construção de um sistema que auxiliará gerentes na escolha do método mais adequado a um problema específico.

3 METODOLOGIA E SIMULAÇÕES

3.1 DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA

Todos os produtos possuem características que visam atender a determinadas necessidades dos clientes. Os equipamentos, por exemplo, necessitam atender às especificações para garantir a qualidade no processo produtivo, também precisam atender às exigências de segurança, para garantir um trabalho adequado e seguro aos profissionais que irão manuseá-lo. Todas estas características são identificadas e abordadas pelas empresas em projetos que idealizam tanto estes produtos como os tipos específicos de público que irão atender. Pensando na necessidade de produção seja em massa, por lotes, *jobbing*, dentre outras, e na necessidade de que todos possam obter produtos com as mesmas especificações, as empresas buscam equipamentos que possam auxiliá-las nessa difícil missão de produzir em acordo com as especificações e no longo prazo.

Para a obtenção de equipamentos, ou de matéria-prima, que atenda às exigências dos clientes, é necessário escolher um fornecedor que tenha interesses e características em comum com a empresa ou cadeia de suprimento. Para isso, Almeida (2013) propôs um procedimento de aplicação para modelos de decisão multicritério, composto por três fases. Cada uma delas caracteriza o problema proposto e influencia na aplicação dos métodos multicritério, são elas:

- I. Fase preliminar: onde os elementos básicos de estruturação do problema são identificados, elementos esses que influenciam no modelo utilizado;
- II. Avaliação: modelagem de preferências e escolha do método;
- III. Finalização: onde as alternativas são avaliadas, para posterior análises de sensibilidade e recomendação.

Dentre os elementos básicos da fase preliminar de construção do modelo, está a identificação dos critérios, também chamados de atributos, que têm a função de caracterizar cada objetivo preestabelecido. Assim como existem diferenças nas características que são avaliadas na compra de um carro, de um eletrodoméstico ou na escolha de alimentos no mercado, também devem existir critérios que atendam aos interesses estratégicos dos decisores na escolha de fornecedores específicos. Por exemplo, Souza e Carmo (2015) utilizaram como critérios específicos a flexibilidade e a dureza para a escolha de chapas de aço, Aharonovitz e Vieira (2014) utilizaram como critérios a garantia de veículos adequados e a experiência em otimizar redes para escolha de fornecedores logísticos e Memari *et al.* (2019) adotaram critérios como imagem verde e redução da poluição para uma seleção sustentável de fornecedores. Desta forma, os critérios específicos desse estudo estão submetidos as seguintes avaliações:

1. Testes de qualificação ou funcionais: buscam avaliar os objetivos definidos em especificações técnicas dos equipamentos, ou seja, são testes que qualificam os equipamentos de cada fornecedor verificando se estes atendem às especificações necessárias para desenvolvimento dos processos produtivos da empresa;
2. Testes de vida acelerada: verificam o desempenho dos equipamentos submetendo-os a situações extremas de uso com o objetivo de estimar métricas de confiabilidade deles;
3. Histórico de dados: dados históricos de equipamentos dos fornecedores que já possuem experiência de venda com a empresa que irá adquirir (ou não) novos equipamentos, destes dados podem ser obtidas diversas informações referentes a manutenções preventivas ou até sobre a confiabilidade de funcionamento ao longo do tempo.

Os testes (1) e (2), além de todos requisitos de segurança e qualidade, também são uma possibilidade de dar meios aos fornecedores com nenhuma experiência anterior na empresa, de apresentar documentos que atestem a qualidade de seus equipamentos. As empresas com experiências anteriores, também podem apresentar estes. Apesar de os critérios anteriores serem específicos do problema e objeto de estudo deste trabalho, critérios gerais como preço, tempo de entrega, condições de pagamentos, dentre outros, também são levados em consideração nas aplicações.

Espera-se que, com o desenvolvimento deste trabalho, haja um estímulo, por parte dos fornecedores, para a execução dos testes de especificações técnicas e de vida acelerada. De fato, além de toda base introdutória e referências supracitadas, este trabalho ainda avalia as formas de penalizações dos fornecedores que não realizam os testes requeridos pelas indústrias. Para isso, os critérios referentes aos testes tanto de qualificação quanto de vida acelerada serão avaliados quanto a cada fornecedor como realizados (1) ou não realizados (0). Desta forma, os fornecedores que não realizam um determinado teste não recebem a ponderação referente ao peso deste teste específico. Logo, quanto maior for a importância deste teste para a empresa, maior será o seu peso e, conseqüentemente, os fornecedores que não realizam este teste deixam de pontuar, o que pode impactar na sua posição no *ranking* final. Aliado a esta penalidade, ainda podem ser impostos vetos, propostos por Almeida (2013) em cada critério, quando a empresa compradora indicar índices mínimos de aceitação para cada critério. A Tabela 1 Exemplifica a avaliação dos testes de qualificação (TQ), onde quanto mais testes foram realizados (1) melhor será a avaliação deste fornecedor.

Tabela 1 – Exemplo de penalização

Fornecedor	Qualificação			Vida Acelerada			Avaliação
	TQ 1	TQ 2	TQ 3	TVA 1	TVA 2	TVA 3	
1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	Boa
2	(0)	(1)	(1)	(0)	(1)	(1)	Média

3	(0)	(0)	(1)	(0)	(0)	(1)	Ruim
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Já para a avaliação da confiabilidade dos equipamentos, é indicada a utilização de análises Markovianas, onde devem ser identificados os componentes reparáveis, construir a cadeia e, por meio dos dados disponíveis, serem identificadas as taxas de falha e reparo de cada componente. A obtenção destes dados permite calcular a confiabilidade do sistema estar em funcionamento em um tempo pré-determinado, assim como foi realizado no estudo de Agrawal, Murthy e Chattopadhyaya (2019). Percebe-se que o tratamento deste estudo leva em consideração equipamentos que possuem variadas peças, que podem ser reparáveis ou não. As peças que são reparáveis são avaliadas para formular os níveis de confiabilidade do equipamento, pois não é esperado que um maquinário seja construído apenas com peças irreparáveis. Caso esse tipo de equipamento existir, o fornecedor pode ser vetado, devido o grande risco de perda do capital investido no maquinário.

O primeiro passo de definição dos elementos básicos de estruturação do problema: está diretamente ligado ao modelo de Almeida (2013), nesta etapa, são identificados elementos como, quem são os decisores, qual o tempo disponível para realização de todo processo de análise, a racionalidade do problema, dentre outros. Aqui, devem ser determinados todos os objetivos esperados na compra do maquinário. Dessa forma, a empresa pode determinar quais são os testes indispensáveis que serão tratados como critérios da análise de decisão, além de outros critérios como preço, garantia, condições de pagamento, dentre outros. As empresas podem avaliar, no mercado, os fornecedores que já possuem as qualificações desejadas, ou podem ainda informar aos fornecedores que não possuem estas qualificações, de forma a consultar sobre a disponibilidade do fornecedor de realizar os testes necessários.

Tendo em vista que a escolha de um método MCDM pode ser uma dificuldade devido ao grande número de métodos existentes e aos vários pontos que devem ser considerados. Foi então criado um sistema que auxilia esta escolha, sistema esse baseado na aplicação da matriz Pugh de decisão, assim foi aplicada por Thakker *et al.* (2009), para que se possa realizar a escolha de um método multicritério de forma a atender vários critérios específicos de cada problema. Este sistema é estruturado no Capítulo 4, porém o desenvolvimento desse sistema dependeu da aplicação de simulações em métodos MCDM, objetivando o conhecimento do comportamento de cada método em problemas de seleção de fornecedores de equipamentos.

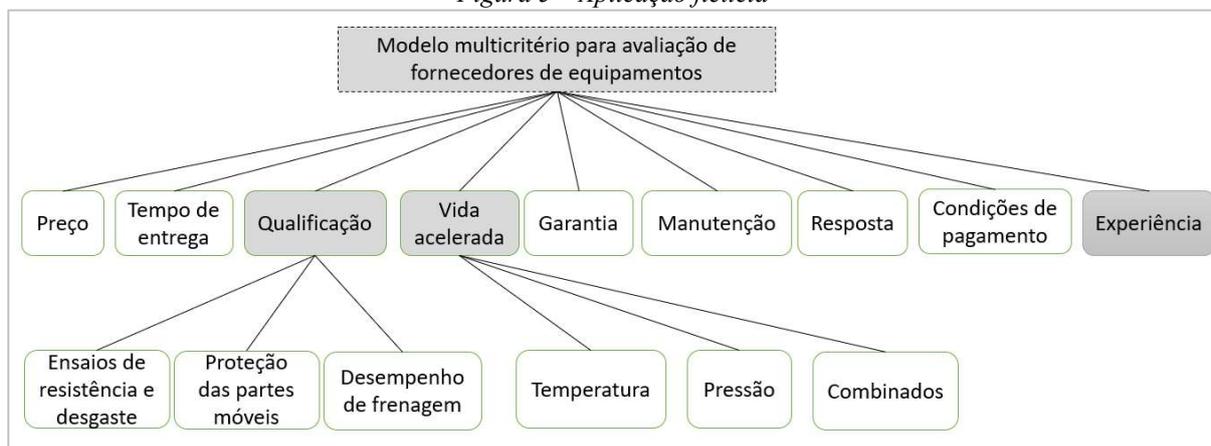
Para possibilitar a obtenção desse conhecimento, a próxima seção apresentará um problema fictício e a este problema foram aplicadas simulações de métodos MCDM. Todas estas simulações possibilitaram conhecer o comportamento de cada método diante o problema e obter *insights* que auxiliaram na construção do sistema de escolha (SCMM).

3.2 SIMULAÇÕES

A partir do entendimento da problemática, aplicações de diferentes métodos MCDM fazem-se necessárias para que sejam extraídos *insights* que possibilitem a identificação de quais métodos podem atender aos requisitos do problema de seleção de fornecedores de equipamentos da forma mais adequada possível. O objetivo é identificar quais as dificuldades, pontos positivos, relação com os decisores, dentre outras características que podem inferir quais métodos mais apropriados, ou que atendem mais requisitos, para um problema específico. Por isso, métodos MCDM foram aplicados em um exemplo fictício, baseado em um estudo de Rodriguez (2017), onde foram realizadas aplicações dos métodos *trade-off* e *FITradeoff* a um problema de seleção de fornecedores de equipamentos, em uma empresa de pesquisa agropecuária.

A empresa do referido estudo necessitava escolher, dentre sete fornecedores, aquele com melhor avaliação segundo os critérios preço, tempo de entrega, capacidade técnica, garantia, manutenção, resposta a chamado técnico, condições de pagamento e experiência. A necessidade de estruturação de problemas SSP e o objetivo específico deste trabalho em estimular aplicações de testes de especificações técnicas dos equipamentos, provocaram uma adaptação do estudo, pela troca do critério capacidade técnica, por critérios que avaliam testes de qualificação e de vida acelerada, resultando na estrutura da Figura 5.

Figura 5 – Aplicação fictícia



Fonte – Esta Pesquisa (2019).

Para a aplicação da maioria dos métodos MCDM, como por exemplo o SMARTS, ELECTRE e *trade-off*, é necessária a obtenção da matriz de consequências do problema, esta matriz possui dados fixos, que são fornecidos como *input* e cada método a utiliza de forma específica. Para a obtenção desta matriz, foram seguidos os seguintes passos:

I. Ranqueamento de critérios e subcritérios:

O *ranking* das constantes de escala utilizado neste estudo seguiu a mesma referência do *ranking* do estudo de Rodriguez (2017), para não se perder a avaliação total dos especialistas

do problema real, porém com a adaptação dos critérios(k) de testes de qualificação e vida acelerada. Assim este *ranking* foi determinado como se segue: $k_4 > k_5 > k_3 > k_9 > k_7 > k_6 > k_1 > k_2 > k_8$, onde, estes critérios podem ser entendidos como:

- K1 – Preço (milhares R\$): relacionado ao preço do equipamento;
- K2 – Tempo de entrega (dias): quantos dias um fornecedor leva para entregar o equipamento;
- K3 – Qualificação (testes): referente aos testes de qualificação de equipamentos;
- K4 – Vida acelerada (testes): referente aos testes de vida acelerada dos equipamentos;
- K5 – Garantia (meses): quanto tempo cada fornecedor oferece de garantia de seu produto;
- K6 – Manutenção (quantidade): quantas manutenções foram realizadas em um determinado tempo de utilização de cada equipamento de cada fornecedor;
- K7 – Resposta à chamado técnico (horas): quantas horas um fornecedor leva para atender a uma emergência de manutenção do equipamento;
- K8 – Condições de pagamento (tipos): quais as formas possíveis de pagamento;
- K9 – Experiência (dados históricos): probabilidade de funcionamento do equipamento em um tempo determinado, obtido por meio dos dados de experiência com os equipamentos.

Como supracitado, o *ranking* de todos os critérios foi obtido do estudo real de Rodriguez (2017). Porém, os subcritérios dos testes de qualificação e vida acelerada também necessitavam ser ranqueados. Assim, foi atribuído a cada fornecedor fictício um *ranking* de preferência entre os subcritérios, este *ranking* foi obtido por meio de variável aleatória discreta, ou seja, cada um dos três subcritérios, tanto de qualificação, quanto de vida acelerada, recebeu um grau de importância de cada fornecedor, com espaço amostral $\Omega = (1,2,3)$ e probabilidades iguais. A partir disso, o *ranking* geral dos subcritérios foi agregado pelo método de Borda (1781).

II. Obtenção da função valor

A obtenção dos dados dos critérios de k3 (qualificação), k4 (vida acelerada) e k9 (experiência), será explanada nos próximos parágrafos. Já para os demais critérios, foram visualizados os limites inferiores e superiores do estudo de Rodriguez (2017) e dados aleatoriamente respeitando-se esses limites.

III. Obtenção dos pesos dos subcritérios

Com o *ranking* dos subcritérios de qualificação e vida acelerada em mãos, foi possível obter os pesos dos subcritérios por meio do programa de simulação Crystall Ball, utilizado como um suplemento do Excel, que possui o método de Monte Carlo como base. Assim, foi possível obter a matriz de consequências.

Os testes, tanto de qualificação quanto de vida acelerada, podem ser realizados por diversos procedimentos, que resultam em índices qualitativos ou quantitativos. Estes testes são escolhidos de acordo com as características que a empresa espera de seus equipamentos. Como este estudo trata de uma avaliação fictícia, foram buscados na literatura testes de especificações técnicas que melhor poderiam avaliar os tipos de equipamentos tratados no problema real.

Desta forma, os ensaios de resistência e desgaste, proteção das partes móveis e desempenho de frenagem, foram identificados como exemplos de especificações dos referidos equipamentos, podendo ter como referências normas específicas como a ABNT NBR ISO 5674:2017 (Proteção para eixos de transmissão da tomada de potência), ABNT NBR ISO/TS 28924:2016 (Proteções para partes móveis de transmissão de potência) e ABNT NBR ISO 5697:2016 (Determinação do desempenho de frenagem), respectivamente. Estes subcritérios de qualificação e vida acelerada também passam por elicitação para que se obtenham constantes de escala, realizando os procedimentos de normalização e agregação de todos os subcritérios em um único *range* de consequências.

A partir da identificação das normas técnicas que melhor se adaptam aos maquinários e as necessidades da empresa, deve-se verificar quais são os ensaios e requisitos necessários em cada uma para que sua aplicação seja válida e conte na avaliação de cada fornecedor. A norma ABNT NBR ISO 5674:2017, por exemplo, especifica ensaios de avaliação da proteção para eixos de transmissão da tomada de potência. Esta norma é composta por vários ensaios de desgaste, corrosão, resistência e temperatura. Porém, a proteção do eixo só é aceita se todos os ensaios, sem exceção, forem realizados, além de outros requisitos de funcionamento, após a realização dos ensaios. Em um caso real, todos os fornecedores receberiam uma classificação quanto a realização (1) ou não realização (0) (ver Tabela 1).

Como este estudo é um exemplo fictício, esta classificação quanto a realização ou não (1 ou 0) dos testes foi realizada randomicamente para cada fornecedor, e pode ser visualizada na Tabela 2. Além disso, os subcritérios dos testes de qualificação e vida acelerada também necessitavam ser ranqueados. Para tal, foi atribuído aleatoriamente a cada fornecedor fictício um *ranking* de preferência entre os subcritérios. A partir disso, o *ranking* geral foi obtido pelo método de Borda (1781).

Tabela 2 – Análise de adequação dos subcritérios

	Testes de Qualificação				Testes de vida acelerada				
	Resistên cia	Proteç ão das partes	Desempen ho de frenagem	Agregação	Temperat ura	Press ão	Combinad os	Agregaçã o	
F1	1	0	1	0,788877	F1	0	1	1	0,640001
F2	0	1	1	0,594113	F2	1	0	1	0,670021
F3	0	1	0	0,211123	F3	1	0	0	0,359999
F4	1	0	0	0,405887	F4	1	1	1	1
F5	1	1	0	0,61701	F5	1	1	0	0,689978

F6	0	0	1	0,38299	F6	0	0	1	0,310022
F7	1	0	1	0,788877	F7	1	1	0	0,689978

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A coluna de agregação mencionada na Tabela 2 se trata de uma agregação aditiva, onde caso o determinado teste de qualificação fosse realizado (1), o peso referente ao subcritério era somado à avaliação global, da mesma forma que é realizada nos métodos de agregação aditivo determinísticos como, por exemplo, o SMARTS e o *trade-off*. Estas agregações globais dos subcritérios, foram adicionadas na função valor dos critérios de qualificação e vida acelerada na matriz de consequências conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de consequências

	Preço (milhar es R\$)	entrega(d)	Qualificaç ão	Vida acelera da	Garanti a (meses)	Manutenç ão (qtd)	chamad o técnico (h)	Condiçõe s de pagamen to	Experiênc ia
F1	223,485	87	0,788	0,640	3	1	39	2	0,262
F2	375,239	65	0,594	0,670	3	0	38	3	0,003
F3	416,538	77	0,211	0,359	1	0	33	1	0,262
F4	236,469	107	0,406	1	2	2	39	1	0,223
F5	401,459	118	0,617	0,689	2	0	25	2	0,875
F6	411,599	110	0,383	0,310	2	0	56	1	0,0345
F7	276,237	111	0,788	0,689	1	2	28	2	0,0535

Fonte – Adaptado de Rodriguez (2017)

Por sua vez, a importância do critério de experiência é aplicada na utilização dos dados históricos da empresa. Por isso, tomando como pressuposto o já conhecimento dos fornecedores, foi realizada uma análise de confiabilidade de dois componentes reparáveis e em paralelo do equipamento do exemplo, por meio de uma análise de Markov, que resulta no diagrama da Figura 6, onde o sistema é considerado falho quando os dois componentes reparáveis estão em modo falho simultaneamente. A partir dos dados destes componentes, é possível realizar o cálculo da probabilidade de funcionamento deste sistema em qualquer tempo requerido pela empresa de acordo com a equação (1), neste exemplo, foi considerado uma probabilidade de funcionamento de quinze anos(t).

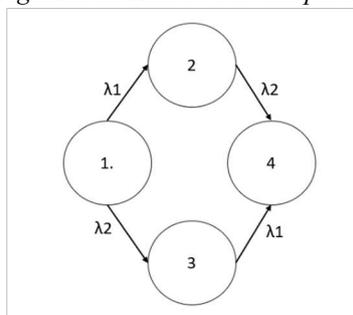
$$R(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t} - e^{(\sum_i -\lambda_i)t} \quad (1)$$

Estes dois componentes reparáveis, em uma situação real podem ser, por exemplo, peças responsáveis pela frenagem do equipamento ou até mesmo pela proteção do usuário. Cada equipamento possui suas especificidades e necessidades de armazenamento de dados de peças chaves, responsáveis pelo funcionamento do equipamento como um todo. Cabe aos usuários destes equipamentos a determinação de quais peças serão estudadas e quais serão os dados coletados sobre elas.

É importante destacar que os fornecedores, neste estudo, são avaliados para a compra de equipamentos com um alto custo associado, ou seja, maior valor é dado para critérios como

qualificação, vida acelerada e experiência, devido à busca de um alto retorno em médio e longo prazo, como já foi notado por Rodriguez (2017). Por isso, não seria interessante tratar a ordem de preferência dos critérios do problema de forma aleatória, pois acabaria não tratando uma característica importante do problema.

Figura 6 – Diagrama de Markov dos componentes avaliados



Fonte – Adaptado de Ye et al. (2019)

Cada método multicritério possui uma necessidade diferente de interação com o(s) tomador(es) de decisão para a obtenção das constantes de escala (para métodos compensatórios) ou dos pesos (para métodos não compensatórios), sendo essa diferença facilmente notada, por exemplo, ao se comparar os processos de elicitação dos métodos SMARTS e AHP. Por se tratar de um estudo fictício, em todos os processos onde era necessária a interação com tomadores de decisão, foram utilizadas simulações, para imitar o comportamento de trinta decisores.

Para a realização destas simulações, foi utilizado o método Monte Carlo como base, que segundo Pop *et al.* (2013), é capaz de produzir resultados realistas a partir da amostragem repetida de eventos por meio de algoritmos aleatórios. Por isso, para cada simulação que visava imitar o comportamento dos decisores, foi construído um algoritmo utilizando um EDI (*Electronic Data Interchange*) denominado Code::Blocks. Tal software é gratuito e pode ser moldado e configurado para as necessidades dos usuários, por meio da linguagem de programação C++ (Code::Blocks, 2019). A lógica destes algoritmos é explicada em cada aplicação das próximas seções.

A aplicação de vários modelos distintos em um mesmo problema pode facilitar a visualização de pontos positivos e negativos para a problemática de seleção de fornecedores de equipamentos. Para isso, os métodos identificados na revisão da literatura, que já foram aplicados em problemas deste tipo, servem de base para a escolha das aplicações a seguir. É importante frisar que todos os dados utilizados como *input* destas aplicações poderiam ser outros, pois um problema MCDM é baseado nos critérios dos decisores e esta característica é abordada em cada aplicação.

3.2.1 Aplicação no SMART

A partir da obtenção das características do problema, foram aplicados os métodos SMARTS e SMARTER, que se diferenciam na elicitação das constantes de escala. No SMARTS, os decisores, além de indicar a ordenação dos critérios, necessitam responder a um número (número de critérios-1) de perguntas, com o objetivo de identificar os pontos de indiferença entre os critérios, enquanto, no método SMARTER, o swing é necessário apenas para a obtenção da ordenação dos critérios e aplicação do procedimento ROC (*ranking ordered centroid*).

Uma vez obtidos os critérios, as alternativas do problema, além dos outros passos iniciais expostos na seção 2.3.1, a aplicação do SMARTS seguiu as etapas de ordenação dos critérios (Parte 1 do Swing), onde, como exposto anteriormente, o *ranking* de todos os critérios foi obtido do estudo real de Rodriguez (2017). E obtenção dos pesos (Parte 2 do Swing), para isso, foi construído o algoritmo de simulação ilustrado na Figura 7, que recebeu como *input* o *ranking* dos critérios e conseqüentemente simulou dez mil vezes (N) o comportamento dos decisores para o problema. O *output* deste algoritmo foi um arquivo de texto com os pesos referentes a todas estas simulações.

Como esta aplicação não se trata de um problema real, a simulação foi necessária, para se avaliar os possíveis comportamentos de decisores. O número elevado de simulações é explicado pelo teorema do limite central apresentado por Doane e Seward (2014), onde quanto maior o número de simulações realizadas, a distribuição da média amostral se torna convergente. As variáveis do algoritmo podem ser entendidas como:

- Número total de simulações = (N);
- Constantes dos critérios = {K_i};
- Variáveis auxiliares = {A_i, m, x, n};

Figura 7 – Lógica do algoritmo de simulação (SMARTS)

```

N = total number of events to simulate;
Ki = Weights;

for (n=0; n<N; n++){
  while (m<x) do{
    Generate Ai Random Numbers between 0 and 100;
    if (A4 > A5 > A3 > A9 > A7 > A6 > A1 > A2 > A8){
      Ki = (Ai/(∑Ai)), ∀ i
      Print Ki to file;
      m>x;
    }
  }
}

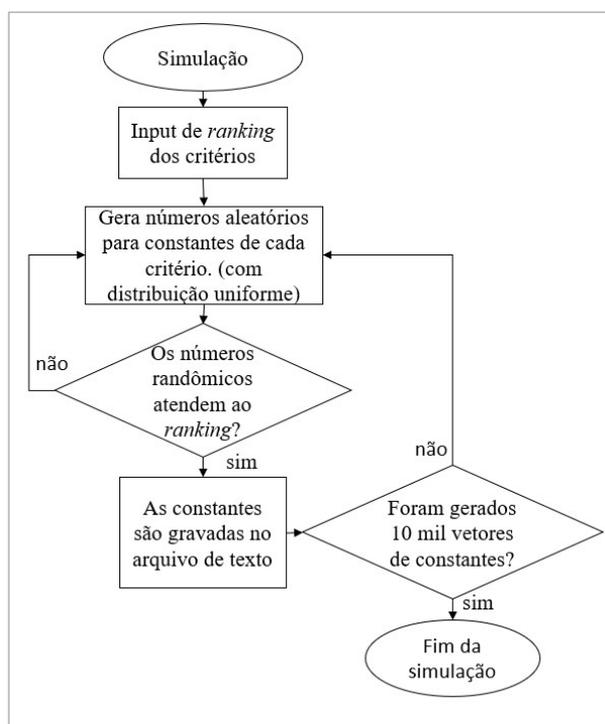
```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Para melhor entendimento desta simulação, o fluxograma da Fluxograma 1 mostra o passo a passo seguido pelo algoritmo do SMARTS, onde os números randômicos do algoritmo possuem um espaço amostral $\Omega = \{0 \text{ a } 100\}$ de números inteiros e foram gerados seguindo uma

distribuição de probabilidade uniforme, ou seja todos os valores do espaço amostral tinham a mesma probabilidade de serem atribuídas no algoritmo.

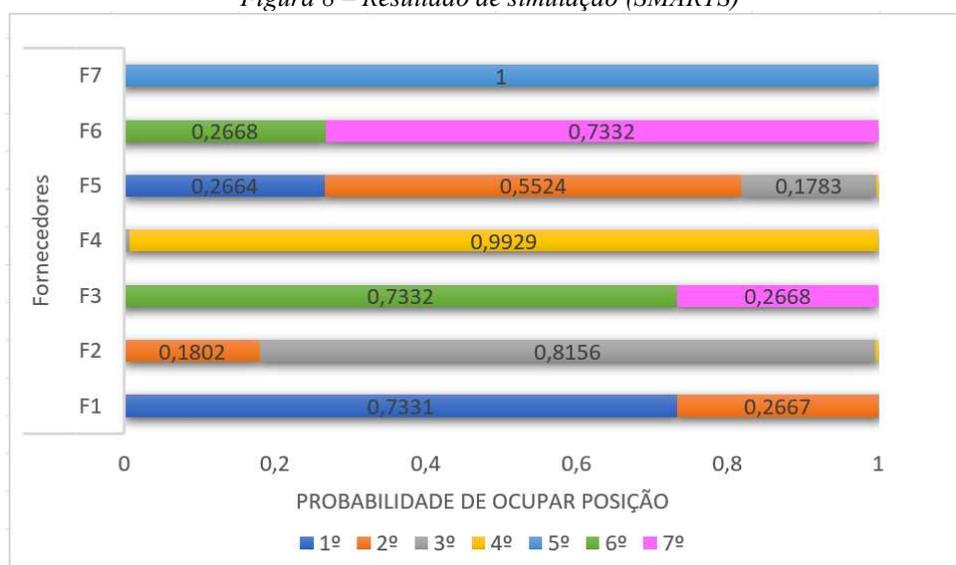
Fluxograma 1 – Fluxograma de simulação do SMARTS



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A partir da simulação do SMARTS, foi possível aplicar, com o auxílio do Excel, todos estes pesos à matriz de consequência normalizada linearmente, obtendo-se assim, dez mil *rankings* dos sete fornecedores. Estes dados possibilitam avaliar com maior robustez a relação de cada fornecedor com cada posição que este poderia ser posicionado em um problema real. As relações de probabilidade de cada fornecedor com cada posição podem ser visualizadas na Figura 8, onde, de acordo com estas simulações, o fornecedor 1 e 5, por exemplo, possuem as maiores probabilidades de ocuparem o primeiro lugar no *ranking*.

Figura 8 – Resultado de simulação (SMARTS)



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A aplicação do SMARTER, por sua vez, não recebe aplicação de simulações, tendo em vista que a única informação que é obtida do(s) decisor(es) é a ordenação dos critérios, e, como esta já foi determinada, a aplicação do método ROC, gera apenas um *ranking* possível, que foi calculado e é demonstrado na Tabela 4. Pode ser verificado que este *ranking* obtido pelo SMARTER é uma das possibilidades dadas no resultado da simulação do *Trade-off*, visualizado na próxima seção. É importante destacar que levando em consideração que o ranking dos critérios deste exemplo seguiu o ranking do estudo real de Rodriguez (2017), apenas com uma adaptação dos critérios de qualificação e vida acelerada, este método possui uma maior adequação ao problema real em comparação com os outros MCDM's aplicados neste estudo.

Tabela 4 – Resultado do SMARTER

Fornecedor	Posição
F1	3°
F2	5°
F3	7°
F4	2°
F5	1°
F6	6°
F7	4°

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Percebe-se que os dois métodos podem indicar os mesmos fornecedores como primeira opção para compra de equipamentos, onde no SMARTS a simulação indica uma maior probabilidade dos fornecedores 1 ou 5 para primeira colocação, e o SMARTER indica o fornecedor 5. Realizando-se uma comparação entre a ordenação completa dos dois métodos, podem ser percebidas variações em algumas colocações. Em se tratando de casos reais, a quantidade total de perguntas que seriam feitas a cada decisor, contando apenas a elicitação das constantes pelo método SMARTS seriam 12 perguntas (Parte 2 do *Swing*), levando em consideração critérios e subcritérios. Já para a aplicação do método SMARTER nenhuma pergunta seria necessária.

Assim, percebe-se a eficiência do método SMARTER em situações onde os decisores não fornecem muito tempo para a elicitação das constantes. Por outro lado, erros na modelagem podem acontecer, por ser um método simples e com cálculo de pesos fixo para qualquer problema, este método pode, por exemplo, atribuir pesos mais exponenciais aos critérios, ou seja, quanto maior for a posição do critério no ranking, maior será seu peso. Isto não é ideal, se o decisor preferir uma distribuição de pesos mais uniforme.

A disponibilidade de tempo dos decisores pode estar ligada a variados critérios, desde custo do equipamento até utilização deste no setor de atuação de cada um. Além disso, cada decisor pode disponibilizar um tempo diferente para elicitação das constantes, o que também pode influenciar na escolha do método a ser utilizado.

A partir da definição e aplicações das variações do SMART citadas anteriormente, é possível identificar alguns pontos, que devem ser verificados por especialistas e/ou decisores que queiram avaliar se este método se adapta às características de um problema multicritério específico, são eles:

- A possibilidade de aplicação em problemas com GDM e um fácil entendimento do método pelos decisores;
- Os decisores não são expostos a estresse na elicitação dos pesos. Porém, erros de modelagem se tornam possíveis;
- Permite relação de ordem completa entre as alternativas.

3.2.2 Aplicações no *trade-off* e *FITradeoff*

A aplicação destes métodos se diferencia no grau de esforço cognitivo necessário. No *trade-off*, após a elicitação e indicação dos pontos de indiferença, é aplicado um sistema de equações para obtenção das constantes de escala, composto por (n-1) equações de indiferença, onde (n) se refere ao número de critérios do problema e a equação que garante o somatório das constantes de escala serem uma unidade, conforme equação (2).

$$\sum_{i=1}^n ki = 1 \quad (2)$$

Nesta aplicação fictícia, as constantes que seriam calculadas a partir dos pontos de indiferença definidos pelos decisores, foram simuladas pelo algoritmo demonstrado na Figura 9, onde números aleatórios, correspondentes as constantes de cada critério, são gerados e gravados em um arquivo de texto, se atenderem aos critérios do problema que são o ranking e o somatório. O algoritmo encerra a simulação apenas quando as constantes dos critérios são geradas dez mil vezes, conforme teorema do limite central e disponibilidade de tempo computacional.

Os requisitos, que deveriam ser atendidos para aceitação de cada linha de constantes, foram o *ranking* dos critérios e a somatória igual a 1. Diferentemente do algoritmo do SMARTS, onde as constantes recebiam valores inteiros entre 0 e 100 e, posteriormente, normalizadas obtendo assim uma função linear, neste algoritmo, as constantes recebem qualquer valor contínuo entre 0 e 1 e são avaliadas segundo o *ranking* e a somatória. Esta característica possibilita um número muito maior de possibilidades de combinação das constantes. Com exceção do espaço amostral, o entendimento do algoritmo do *trade-off* segue o mesmo que o da Figura 7.

Figura 9 – Lógica do algoritmo de simulação (*trade-off*)

```

N = total number of events to simulate;

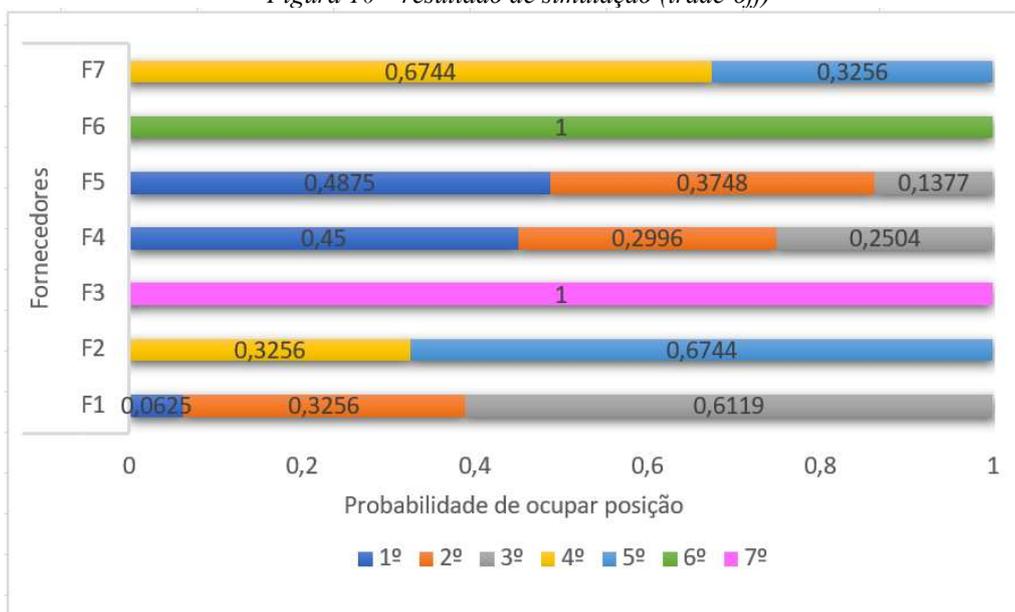
for (n=0; n<N; n++){
  while (m<x) do{
    Generate Ki Random Weights;
    if ((K4 > K5 > K3 > K9 > K7 > K6 > K1 > K2 > K8) and ( $\sum k_i = 1$ )){
      Print Ki to file;
      m>x;
    }
  }
end while
end for

```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Após a obtenção do arquivo de texto da simulação das constantes, estas constantes foram aplicadas à matriz de consequência e da mesma forma como no SMARTS, foram obtidas dez mil possibilidades de *rankings*, que podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10 – resultado de simulação (trade-off)



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A aplicação no *trade-off* foi simulada e, posteriormente, foram obtidos seus *rankings* com o auxílio do Excel. Porém, para a aplicação do *FITradeoff*, tendo em vista que este é estruturado em uma complexa heurística, foi necessário solicitar o *download* do *software* no site fitradeoff.obg, disponibilizado pelo CDSID (*Center for Decision Systems and Information Development*), tanto para a problemática de escolha, quanto para ordenação. A facilidade de importação dos dados, ranqueamento e elicitação das preferências com a utilização de um *software* específico é um grande ponto facilitador em comparação com as outras aplicações.

O grande ponto, que diferenciou a aplicação do *FITradeoff* dos outros métodos, foi a inviabilidade de aplicação de uma simulação para geração de milhares de *rankings*. Por isso, foram simuladas apenas as respostas de cada um dos trinta decisores por meio da problemática

de ordenação e, posteriormente, os limites inferiores e superiores das constantes foram dados pela média geométrica destas simulações.

Trinta simulações foram feitas para este método. Porém, cada simulação possui diferentes números de perguntas necessárias e vários ciclos internos. Desta forma, a quantidade de perguntas feitas pelo método depende da complexidade do problema e das respostas de cada decisor. Após a obtenção da média geométrica, as constantes do limite máximo do *FITradeoff* foram aplicadas na matriz de consequências, resultando no ordenamento visualizado na Tabela 5.

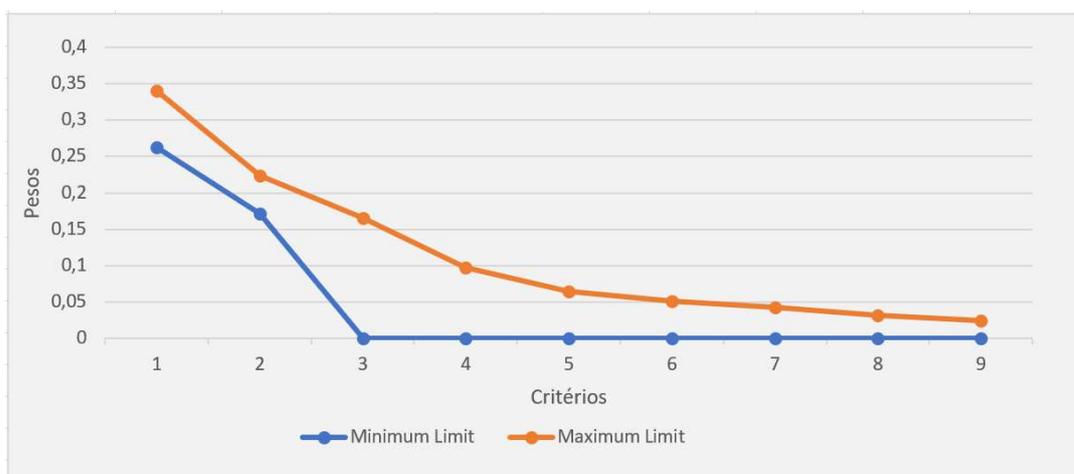
Tabela 5 – ranking da simulação (*FITradeoff*)

Fornecedor	Posição
F1	1º
F2	2º
F3	6º
F4	3º
F5	5º
F6	7º
F7	4º

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

As simulações apresentadas até este momento mostram uma consistência na ordenação dos fornecedores 3 e 6 nas últimas colocações. Esta consistência pode ser explicada pela característica mais quantitativa dos dados do estudo. Os limites mínimos e máximos fornecidos pela média geométrica das simulações do *FITradeoff* podem ser verificados na Gráfico 2, como já mencionado, no *trade-off* é elicitado junto ao decisor o ponto exato de indiferença entre os critério, porém no *FITradeoff* são fornecidos os pontos máximos e mínimos, onde se tem certeza que o ponto de indiferença está.

Gráfico 2 – Limites do *FITradeoff*



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Pontos positivos e negativos importantes, que devem ser verificados sobre os métodos são:

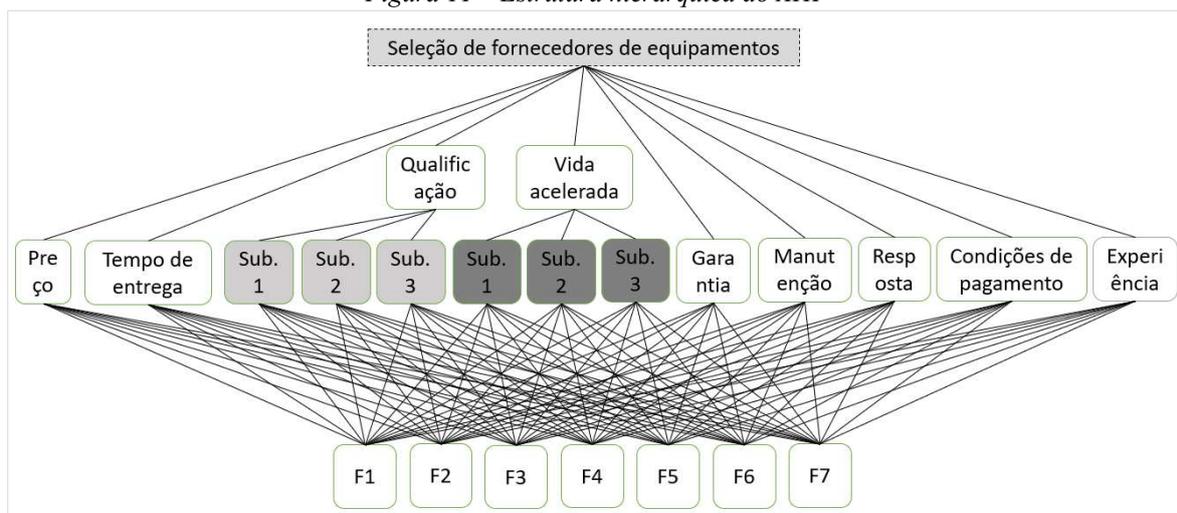
- A possibilidade de aplicação em problemas com GDM, porém causando maior esforço cognitivo;

- Os decisores são expostos a estresse na elicitação dos pesos, o que pode influenciar nas respostas dos decisores e possibilitar erros nessa elicitação, por pressa ou cansaço por exemplo;
- Possibilidade de aplicação do FITradeoff em software específico, facilitando aplicação com relação a compreensão e agilidade. Porém dificuldade quanto a possibilidade de simulações, neste trabalho especificamente.
- Permite relação de ordem completa entre as alternativas.

3.2.3 Aplicação no AHP

Uma simulação também foi aplicada com o AHP e a estrutura hierárquica dessa aplicação pode ser verificada na Figura 11, onde são identificados o objetivo geral, critérios, subcritérios e alternativas do problema. Esta estrutura é típica do método AHP e serve como base para a realização das comparações pareadas requeridas pelo método. No AHP, para cada nível hierárquico relacionado a um nível inferior é formada uma tabela de comparação.

Figura 11 – Estrutura hierárquica do AHP



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

As relações entre os níveis de hierarquia já demonstram a grande quantidade de comparações que foram simuladas para aplicação do AHP neste estudo, o que resulta em um total de dezesseis matrizes de comparações pareadas. Caso este problema fosse real, dependendo do procedimento adotado, cada decisor teria que responder um total de 315 comparações. Além disso, a geração de inconsistências nas primeiras tentativas de resposta poderia aumentar ainda mais esse número de comparações necessárias.

Como mencionado na seção 3.2, grande parte dos métodos MCDM utilizam a matriz de consequências da Tabela 3, porém o método AHP, em especial, não utiliza esta matriz. O AHP realiza uma série de comparações pareadas entre os seus níveis hierárquicos que resultam em vetores. Estes vetores formam uma matriz de consequência própria do AHP.

Por isso, diferentemente dos algoritmos anteriores que geravam dez mil vetores de constantes para que fossem aplicados na matriz de consequência da Tabela 3, o algoritmo criado para simulação do AHP (Figura 12) já realizava internamente todas as comparações, construindo as dez mil matrizes de consequências e retornava como *output* todos os dez mil *rankings* possíveis da simulação. Neste algoritmo, a simulação é referente às respostas possíveis de decisores. Logo, as comparações randômicas possuíram um espaço amostral constituído de qualquer número dentro da escala fundamental de Saaty (1990), com distribuição de probabilidade uniforme.

Figura 12 – Lógica do algoritmo de simulação (AHP)

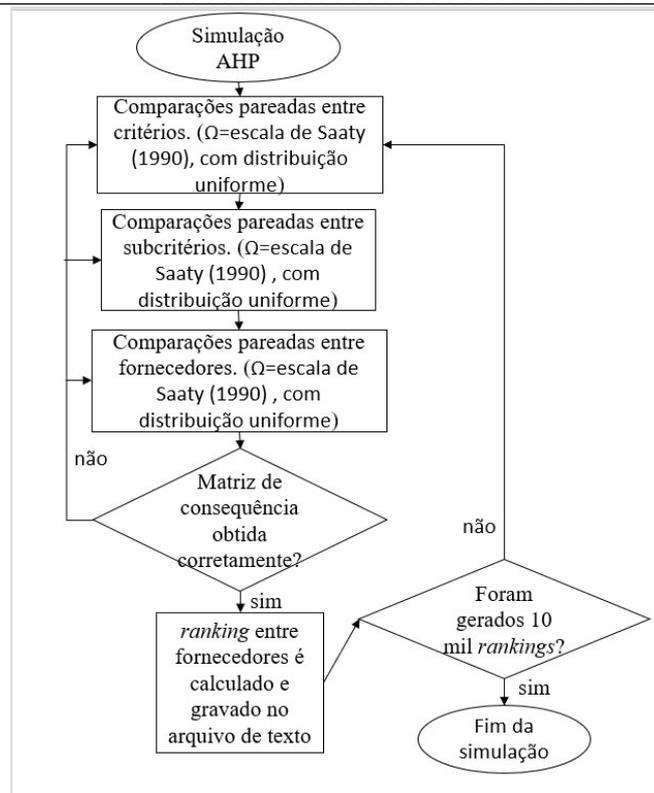
```
N = total number of events to simulate;
M = total number of comparisons matrices;

for (n=0; n<N; n++){
  for(m=0; m<M; m++){
    Generate Pij Random Paired Comparisons;
    if (Consistency <= máx){
      Print to final matrix;
    }
  }
  end if
  end for
  if (final matriz == full){
    do weighted sum;
    Print ranking to file;
  }
  end if
end for
```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Caso as matrizes de comparações obtivessem o mínimo de consistência, o autovetor gerado por cada matriz pareada era posto na matriz final, a razão de consistência era controlada pela constante ‘máx’. Assim que todas comparações foram realizadas, a soma ponderada era feita e seu *ranking* posto no arquivo de texto. O algoritmo de simulação do AHP pode ser melhor entendido pelo fluxograma da Fluxograma 2.

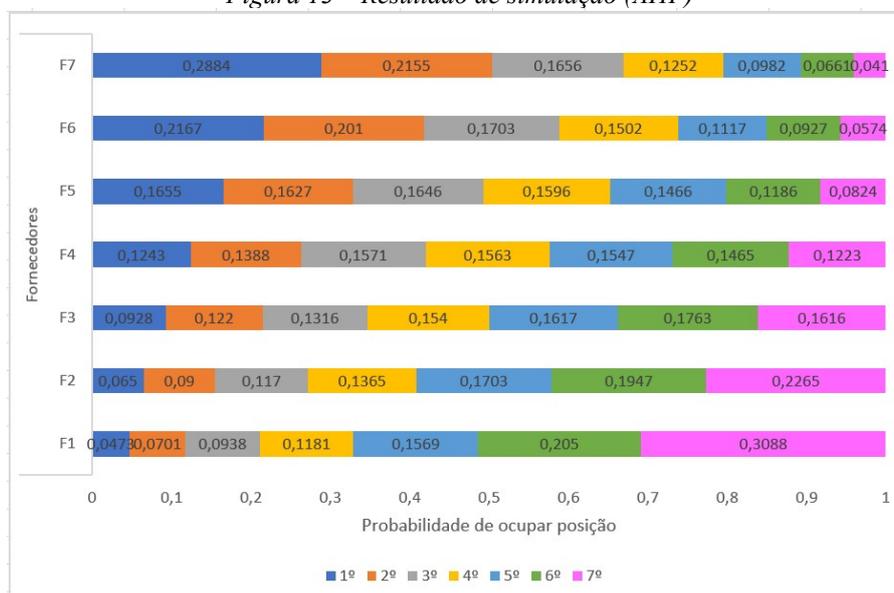
Fluxograma 2 – Fluxograma de simulação do AHP



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Este método cria sua própria estrutura de avaliação, não havendo nenhuma relação com a matriz de consequências que foi utilizada nas aplicações anteriores. Por isso, existe aqui uma grande dependência das respostas dos decisores, pois as aplicações anteriores utilizavam a matriz da Tabela 3 como base para cálculo dos *rankings* finais, já no AHP esta matriz é construída por meio dos conhecimentos empíricos dos decisores sobre os critérios a partir das comparações pareadas. Logo, os resultados simulados por este método foram os mais dispersos dentre os modelos analisados. Este resultado pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 – Resultado de simulação (AHP)



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

As características predominantes qualitativas ou quantitativas dos critérios devem ser bem estudadas tendo em vista que no AHP os decisores não têm acesso à matriz de consequências. Assim, em um caso com critérios mais quantitativos, essas informações podem ser perdidas e impactar no resultado. Enquanto os outros algoritmos eram moldados de forma que atendessem no mínimo ao *ranking* dos critérios, no AHP, o *ranking* também era aleatório, pois dependia da matriz de comparação pareada entre os critérios. Daí, esta característica explica a dispersão dos resultados.

Como o foco deste trabalho é a avaliação e aplicação dos testes de especificações técnicas, chega-se à conclusão de que, no AHP, a realização ou não destes testes pelos fornecedores não é levada em consideração, tendo em vista que as avaliações pareadas dependem dos conhecimentos implícitos dos decisores a respeito do problema como um todo.

Ou seja, no AHP são realizadas, por exemplo, perguntas ao decisor que comparam os critérios preço com relação ao critério vida acelerada, desta forma o decisor realizará uma comparação de acordo com o seu conhecimento implícito acerca do problema. Assim, não são feitas avaliações sobre quais foram os testes de vida acelerada feitos por um fornecedor determinado. Portanto, caso um decisor não tenha o conhecimento implícito sobre a realização destes testes por cada fornecedor, este decisor pode impactar no *ranking* final dos fornecedores.

A partir da definição do AHP, também é importante identificar pontos que devem ser verificados por especialistas e/ou decisores que queiram avaliar sua adequação às características de um problema multicritério específico, são eles:

- Indicado para problemas em que intuições subjetivas necessitam ser incorporadas;
- Mais trabalhoso em problemas com grande número de decisores, critérios e fornecedores;
- Decisores expostos a estresse psicológico para formação de matrizes pareadas;
- Resulta em *ranking* total das alternativas;
- Algumas críticas relacionadas à possibilidade de reversão de ordem pela inclusão de uma nova alternativa, ou exclusão de uma atual.
- O ponto mais importante, neste estudo específico, é que, diferentemente dos outros métodos, não leva em consideração a realização e/ou os resultados dos testes de especificações técnicas. Logo, não é visto como apropriado para este tipo específico de problema.

3.2.4 Aplicações no ELECTRE

Assim como o AHP, o ELECTRE é um método multicritério de comparações pareadas. Porém, como já mencionado na seção 2.3.4, este é um método de sobreclassificação e não realiza agregação aditiva. O ELECTRE utiliza a matriz de consequências e os pesos dos

critérios do problema, para cálculo dos índices de concordância e discordância que informam se uma determinada alternativa é melhor, ou pelo menos tão boa quanto uma outra. Consequentemente, é possível se chegar a uma escolha, *ranking* ou classificação das alternativas.

Para a realização da aplicação deste método, foi escolhido o ELECTRE I, que entregará como *output* um conjunto (*kernel*) com as alternativas que são classificadas como aptas para escolha. Para tanto, é necessário obter duas informações dos decisores: (i) a parametrização dos pesos dos critérios; e (ii) a identificação dos índices mínimos de concordância e discordância que serão base para a avaliação das comparações pareadas. Basicamente, estes índices informam quais são os limites de aceitação ou não de uma determinada alternativa sobre a outra. Então, foi construído um algoritmo baseado no ELECTRE I com lógica visualizável pela Figura 14.

Figura 14 – Lógica do algoritmo de simulação (ELECTRE I)

```

N = total number of events to simulate;

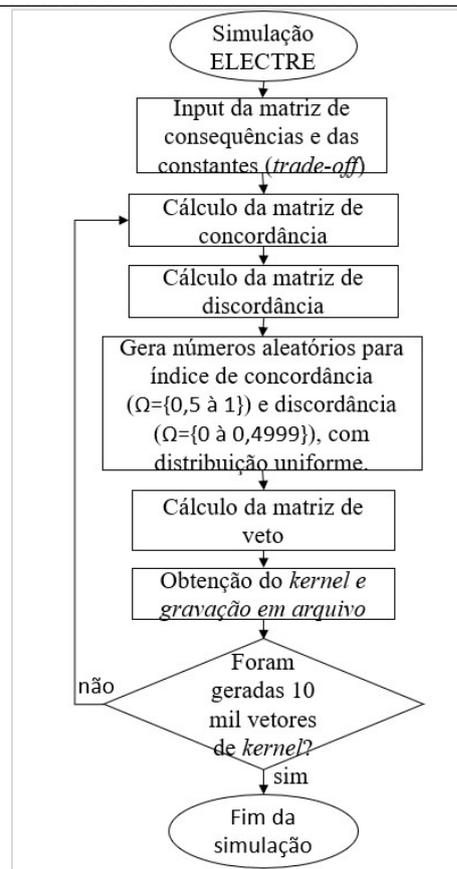
Read consequence matrix;
Read Weights;
for (n=0; n< N; n++)
  C(i, j)  $\forall$  i, j;
  D(i, j)  $\forall$  i, j;
  Generate Random c;
  Generate Random d;
  if (C(i, j) >= c && D(i, j) <= d)
    V(i, j) = 1;
  else
    V(i, j) = 0;
  Print Kernel to file;
end for

```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

As constantes utilizadas em cada simulação foram aquelas dadas como *output* do algoritmo do *Trade-off* (Figura 9), sendo C(i,j) referente à matriz de concordância, D(i,j) referente à matriz de discordância e os índices de concordância ($\Omega = \{0,5 \text{ à } 1\}$) e discordância ($\Omega = \{0 \text{ à } 0,4999\}$) atribuídos randomicamente em cada simulação com distribuição de probabilidade uniforme, obtendo-se de cada simulação um conjunto de fornecedores aptos a serem escolhidos. O fluxograma do algoritmo de simulação do ELECTRE I pode ser visualizado na Fluxograma 3.

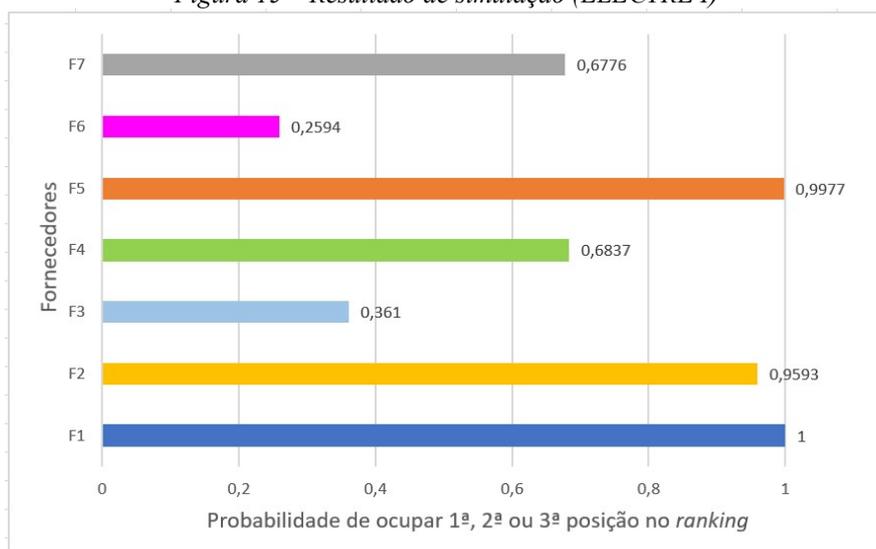
Fluxograma 3 – Fluxograma de simulação do ELECTRE I



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A Figura 15 mostra a frequência em que cada fornecedor esteve presente no *kernel* das simulações realizadas.

Figura 15 – Resultado de simulação (ELECTRE I)



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Pontos positivos e negativos importantes que devem ser verificados sobre esta aplicação são:

- A elicitação dos pesos gera os mesmos pontos negativos ou positivos da aplicação do *Trade-off* vistos anteriormente;

- Diferentemente dos casos anteriores, este método gera um conjunto (*kernel*) com as alternativas aptas para escolha;
- Diferentemente do AHP, a matriz de consequências é lida e os resultados dos testes de especificações técnicas são comparados par a par. Estas comparações pareadas podem ser um diferencial em comparação aos métodos aditivos.

3.2.5 Aplicações no PROMETHEE

Assim como o ELECTRE, o PROMETHEE é um método de sobreclassificação que necessita da matriz de consequências e dos pesos dos critérios como *inputs*. Desta forma, os pesos utilizados foram aqueles dados como *output* do algoritmo do *trade-off*. O algoritmo, visualizado na Figura 16, mostra a lógica utilizada para aplicação deste método. Uma matriz de intensidade de preferência é calculada e, a partir dela, os fluxos de sobreclassificação são gerados, obtendo, por meio do PROMETHEE II, dez mil ordens completas entre as alternativas.

Figura 16 – Lógica do algoritmo de simulação (PROMETHEE II)

```

N = total number of events to simulate;

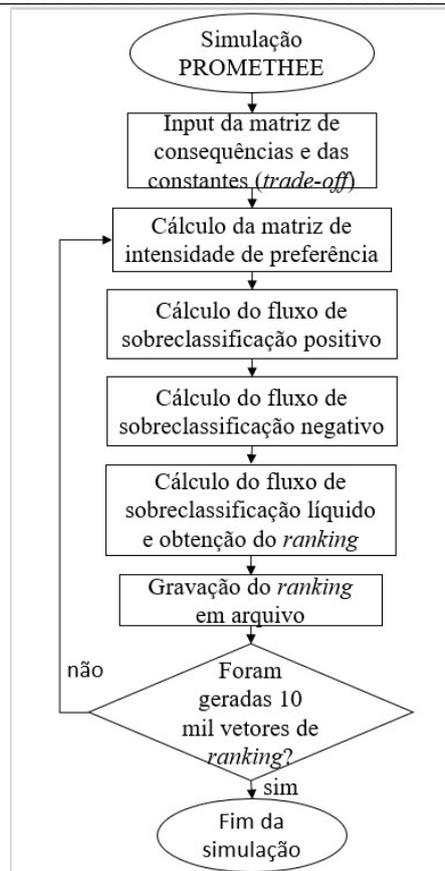
Read consequence matrix;
Read Weights;
for (n=0; n<N; n++)
   $\pi(i, j) = \sum p.F(i, j);$ 
   $\Phi+ = \sum \pi(i, j), \quad \forall j;$ 
   $\Phi- = \sum \pi(i, j), \quad \forall i;$ 
   $\Phi = (\Phi+) - (\Phi-);$ 
  Print  $\Phi$  to file;
end for

```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Diferentemente dos métodos anteriores, que necessitavam a geração de parâmetros randômicos, nenhum outro parâmetro foi necessário, tendo em vista que os pesos foram dados como *input*. Além disso, todas as preferências individuais estão bem definidas, então $F(i, j)$ é, simplesmente, a proporção de critérios em que i é preferível a j , o que é equivalente ao índice de concordância do ELECTRE I, ou seja, a função diferença foi calculada por meio do critério verdadeiro mostrado nas equações (3) e (4), assim como foi feito por Jati e Dominic (2017). A Fluxograma 4 mostra o fluxograma do algoritmo do PROMETHEE II.

Fluxograma 4 – Fluxograma de simulação do PROMETHEE II



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

$$gi(a) - gi(b) > 0, \text{ Então } F(a, b) = 1 \quad (3)$$

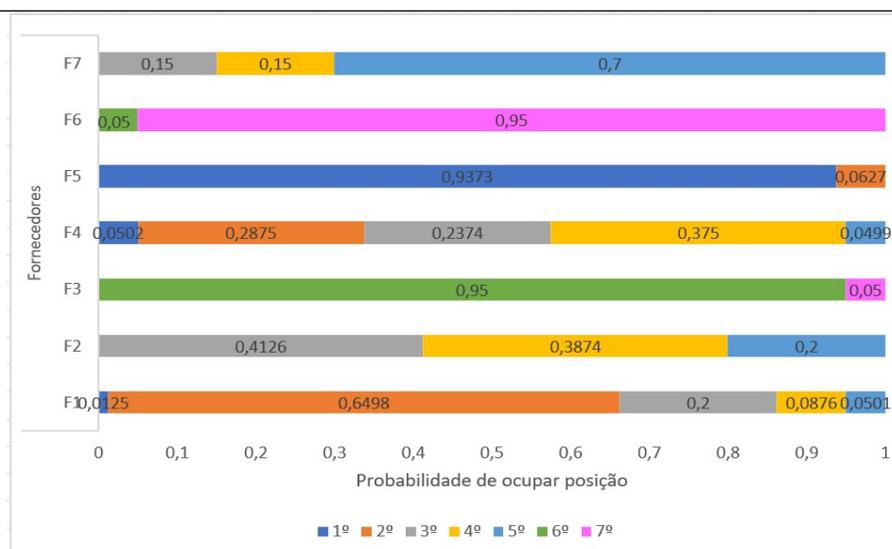
$$gi(a) - gi(b) \leq 0, \text{ Então } F(a, b) = 0 \quad (4)$$

Após a obtenção dos *rankings* e com o auxílio do Excel, pôde ser obtida a relação dos fornecedores com cada posição do *ranking* que este ficou em cada simulação, esta relação está na Figura 17.

Pontos positivos e negativos importantes que devem ser verificados sobre esta aplicação são:

- A elicitação dos pesos gera os mesmos pontos negativos ou positivos da aplicação do *Trade-off* vistos anteriormente;
- Gera ordem completa entre as alternativas;
- Diferentemente do AHP, a matriz de consequências é lida e os resultados dos testes de especificações técnicas são comparados par a par. Estas comparações pareadas podem ser um diferencial em comparação aos métodos aditivos.

Figura 17 – Resultado de simulação (PROMETHEE II)



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vários *insights* podem ser obtidos dos resultados das seções anteriores como, por exemplo, a quantidade de decisores e os tipos dos critérios que podem ser tratados em cada problema específico, sendo eles mais quantitativos ou mais qualitativos. Estes pontos são uns dos que mais impactam na escolha de um método para tratar o problema de seleção de fornecedores. Um exemplo é a maior tendência de utilização do método AHP em problemas com critérios mais qualitativos. Porém, à medida que o número de decisores aumenta, a aplicação deste se torna muito trabalhosa. O tempo que cada decisor pode dedicar ao processo, além da importância com a qual este o trata, também são pontos relevantes no caminho de escolha. E todos estes *insights* serviram de base para a construção do sistema demonstrado não Capítulo 4, que auxiliará na escolha de métodos MCDM neste problema específico.

O sistema criado para auxiliar na escolha do MCDM para problemas de seleção de fornecedores de equipamentos se mostra de fácil entendimento, e partir deste sistema, foi vista a possibilidade de aplicação dos métodos abordados em problemas que se adaptem as suas características. Desta forma, o MCDM escolhido dependerá, portanto, dos critérios que serão levados em consideração pelo sistema e das consecutivas respostas dos gerentes sobre elas. Como, por exemplo, o tempo que eles têm disponível para realização da elicitação, os custos de aplicação, a possibilidade de aplicação em grupos de decisores, a quantidade de testes realizados, dentre outros.

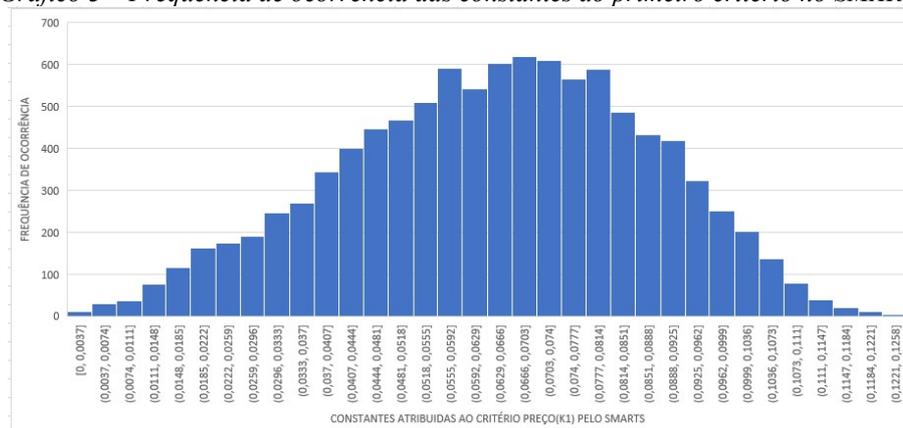
Além disso, tendo em vista os pontos citados anteriormente, pode-se concluir que, mesmo após a indicação pelo sistema do método a ser utilizado, os decisores responsáveis pelo processo de escolha de fornecedores devem ser previamente instruídos sobre a importância da sua participação no processo de elicitação e sobre os impactos provenientes de suas respostas. Especificamente sobre fornecedores de equipamentos e/ou máquinas, quanto mais qualitativos

forem os critérios, mais a resposta dos decisores pode influenciar tanto na escolha do método, quanto no *ranking* dos fornecedores, e a não importância dada a este processo aumenta o risco de escolha de fornecedor que leva a maiores riscos de segurança e altos custos.

Com relação aos algoritmos criados para realização das simulações, o *trade-off* apresentou um maior tempo de simulação, cerca de 6 horas, enquanto os outros métodos levaram menos de 5 minutos, tendo em vista que o método *trade-off* possui uma maior quantidade de números possíveis que poderiam ser combinados aleatoriamente para indicar um conjunto de pesos. Contudo, o método com maior complexidade de construção do algoritmo foi o AHP, devido ao tamanho de linhas de códigos, quantidade de comparações e verificação do índice de consistência. As aplicações das simulações apontaram uma convergência de escolha dos fornecedores como os aptos para escolha, com exceção do AHP, tendo em vista que sua simulação foi aquela com os resultados mais dispersos.

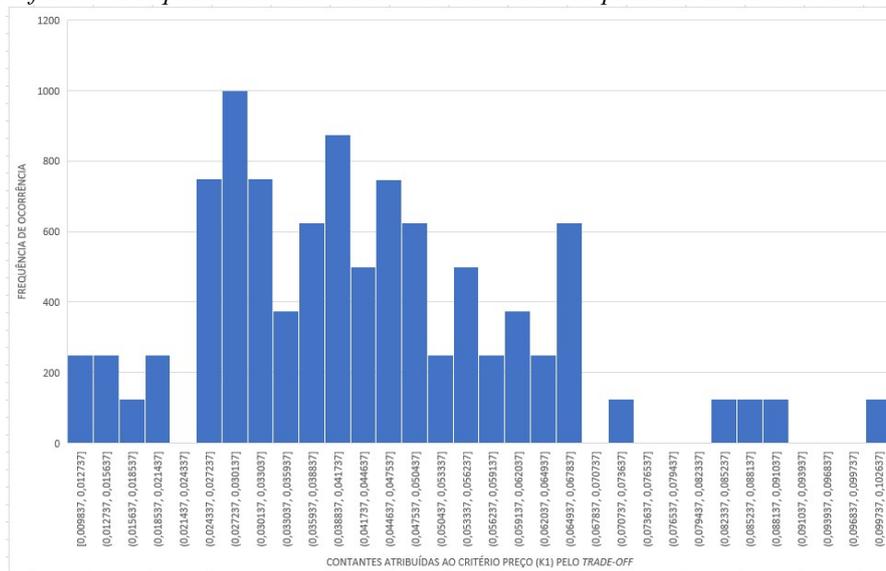
As Gráficos 3 e 4 a seguir mostram respectivamente, histogramas, que relacionam a frequência de ocorrência dos valores simulados do primeiro critério (Preço(k1)), pelos métodos SMARTS e *trade-off* respectivamente.

Gráfico 3 – Frequência de ocorrência das constantes do primeiro critério no SMARTS



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

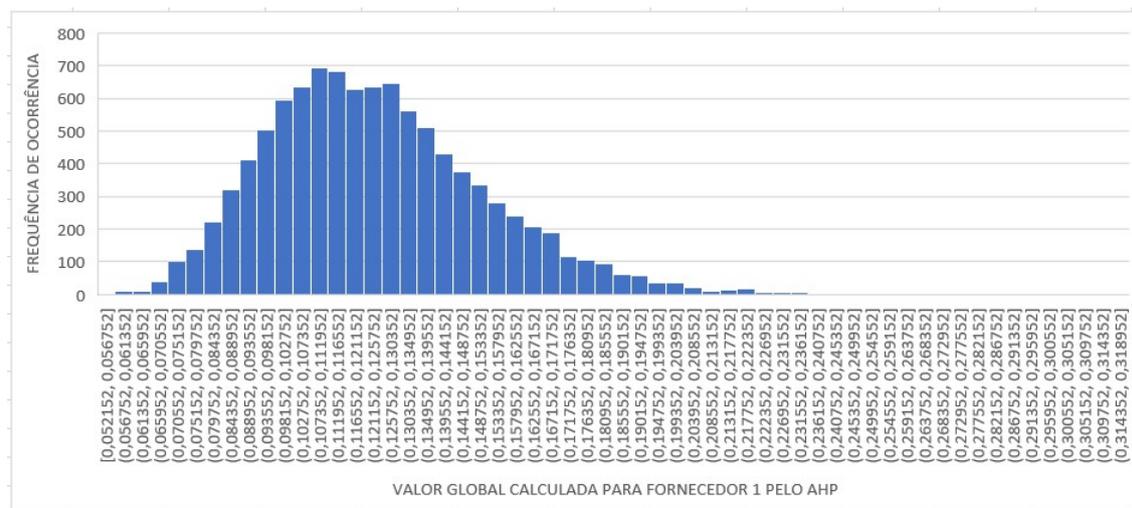
Gráfico 4 – Frequência de ocorrência das constantes do primeiro critério no trade-off



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Percebe-se que a distribuição da simulação do SMARTS tende a uma distribuição normal, e este critério possui uma média entre 0,066 e 0,0730. Com relação aos outros MCDM, tanto o ELECTRE, quanto o PROMETHEE utilizam como *input* as constantes de escala dadas pelo algoritmo do *trade-off*. O algoritmo do AHP por sua vez, já entrega como *output* o valor global de cada fornecedor, considerando o primeiro fornecedor a Gráfico 5 mostra este *output*.

Gráfico 5 – Frequência de ocorrência dos valores globais do primeiro fornecedor pelo AHP em cada simulação



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

As simulações deste capítulo não são capazes de tratar especificamente de um importante ponto, referente à obtenção dos dados históricos para avaliação do critério de experiência. Porém, pode-se identificar no estudo que a análise de confiabilidade do sistema de forma integrada pode ser complexa e, por isso, são avaliados dados de peças reparáveis das máquinas. Quanto maior e complexo for o equipamento, mais peças reparáveis podem haver e, consequentemente, mais dedicação deve ser dada à obtenção de dados históricos para uma correta avaliação deste critério. Um estudo prévio de cada maquinário deve ser realizado para que as peças chaves sejam levadas em consideração. Por isso, é importante criar nas empresas uma cultura de coleta de dados, tendo em vista a importância deles. Porém, a falta de padronização da obtenção destes dados pode dificultar este processo.

Além disso, pode ser raro uma empresa possuir dados históricos de todas as alternativas de fornecedores concorrentes no mercado. Uma boa tática para se contornar esta dificuldade seria um compartilhamento de dados das diferentes marcas no mercado por empresas que já as utilizaram ou pelos próprios fornecedores. Porém, o pensamento de concorrência, a variação da obtenção dos dados e armazenamento incorreto destes dificultam esta tática.

Com o auxílio deste capítulo e dos anteriores, gerentes e decisores podem entender as importâncias de avaliar especificações técnicas dos equipamentos e tomar conhecimento de um procedimento que permite realizar estas avaliações com o auxílio de métodos multicritério.

Além disso, toda teoria e explicação das lógicas dos métodos abordados servem de base para todos os facilitadores/decisores que ainda não tiveram nenhum contato com modelos multicritério. Ademais, os gestores podem conectar a realização dos testes de especificações técnicas com métodos multicritério que evitam escolher os fornecedores que não realizam estes testes, assim como:

- Visualizar qual o passo a passo para aplicação de métodos multicritério em problemas de seleção de fornecedores de equipamentos;
- Entender a importância que os testes de especificações técnicas têm no auxílio de compra de maquinários, minimização de custos, maximização de segurança, dentre outros;
- Obtenção dos algoritmos que possibilitam simular aplicações em métodos multicritérios.

Todos os *insights* anteriores, como já mencionado, serviram de base para a construção do sistema de escolha do método multicritério específico para um SSP de equipamentos que será abordado no capítulo a seguir. O sistema avaliará os métodos abordados neste capítulo, ou seja, seguindo a metodologia apresentada na Figura 1, após o conhecimento do método, por meio das simulações, as características de cada método serão avaliadas frente às necessidades de cada problema por meio deste sistema.

4 SISTEMA DE ESCOLHA DO MÉTODO MULTICRITÉRIO (SCMM)

Para se chegar ao objetivo deste trabalho, de conectar o uso de métodos MCDM com a escolha de fornecedores de equipamentos, foi criado um sistema para auxiliar na escolha do método a ser aplicado em cada problema específico. A metodologia de construção desse sistema pode ser entendida de acordo com os passos demonstrados na Figura 1, que possuem como referência o modelo base proposto por Almeida (2013), para o primeiro passo de estruturação, visto no Capítulo 3 e a matriz Pugh de decisão aplicada por Thakker *et al.* (2009) utilizada como base de cálculo para o último passo de formulação do algoritmo.

Após a estruturação do problema e conhecimento dos métodos, passos esses que foram vistos nos capítulos anteriores, foi possível obter *insights* para a realização de algumas comparações entre as características de aplicação dos métodos abordados, com o intuito de identificar aqueles que possuem maior compatibilidade com um problema específico de seleção dos fornecedores de equipamentos. Um exemplo que pode ser dado para entendimento desta comparação é por meio da quantidade de testes de especificações técnicas que são realizados em cada problema específico, onde quanto maior for este número de testes, mais inviável se torna a utilização do método AHP. Entretanto, o método SMARTS pode se adequar a esta necessidade de forma mais fácil.

Estas comparações servem de auxílio na estruturação do terceiro passo apontado na Figura 1, referente à identificação dos critérios que servirão de base para comparação das características dos métodos no algoritmo. Para a obtenção destas comparações e seleção entre métodos, foi utilizada como referência a matriz Pugh de decisão, da mesma forma em que foi utilizada nos estudos de Thakker *et al.* (2009) e de Seperamian, Jalil e Zulkefli (2017). Esta matriz tem como objetivo realizar a avaliação de abordagens/conceitos de acordo com vários critérios de avaliação.

Pensando nisto, foi criado um sistema com a utilização do software Code::Blocks, onde são feitas perguntas ao usuário sobre o seu problema específico, e a partir das respostas imputadas pelo usuário, o sistema retorna como *output* o método MCDM avaliado que mais se adapta às necessidades do problema. As perguntas implementadas no sistema como critérios, utilizados para comparação entre métodos, foram as seguintes: com relação à quantidade de testes realizados, sejam eles de qualificação ou de vida acelerada, obtenção de dados históricos dos fornecedores ou não, facilidade de entendimento pelos decisores, aplicabilidade em softwares, agilidade de aplicação, facilidade de cálculos e possibilidade de abordagem com múltiplos decisores. A Tabela 6 demonstra como estas perguntas são feitas aos usuários.

Tabela 6 – Perguntas feitas no sistema para escolha do método MCDM

<i>Pergunta</i>	<i>Exemplo de resposta</i>
<i>Você confirma que precisa de um MCDM para selecionar fornecedores de equipamentos? (1) Sim / (2) Não:</i>	<i>1</i>
<i>Tendo em vista a necessidade de aplicação de testes de especificações técnicas, quantos testes de QUALIFICAÇÃO são realizados?</i>	<i>10</i>
<i>Tendo em vista a necessidade de aplicação de testes de especificações técnicas, quantos testes de VIDA ACELERADA são realizados?</i>	<i>10</i>
<i>Tendo em vista a necessidade de avaliação de experiências com fornecedores, existem dados históricos destes fornecedores? (1) Sim / (2) Não:</i>	<i>1</i>
<i>Quantos componentes reparáveis foram estudados no equipamento em questão?</i>	<i>2</i>
<i>Qual o tempo disponibilizado pelos decisores (ou decisor) para a elicitação das constantes de escala do problema (em horas)?</i>	<i>5</i>
<i>Qual o tempo disponibilizado pelos decisores (ou decisor) para a resolução completa do problema (em dias)?</i>	<i>5</i>
<i>Os decisores já tiveram contato com problemas MCDM? (1) Não / (2) Sim / (3) Sim, com vários:</i>	<i>2</i>
<i>É preferível a escolha de método MCDM que possui software para aplicação? (1) Sim / (2) Não:</i>	<i>1</i>
<i>Quantos decisores possui o problema?</i>	<i>1</i>

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Cada pergunta é tratada como um critério de seleção e cada critério possui um peso diferente para cada método levado em consideração. Por exemplo, a quantidade de decisores no problema tem um peso maior para o método SMARTER e menor para o método AHP, tendo em vista que, no AHP, a quantidade de comparações é crescente à medida que o número de decisores aumenta. Logo, cada método MCDM levado em consideração no sistema recebe uma nota. Após todas as respostas do usuário, aquele método que recebe a maior nota é o mais indicado para a resolução do problema. A equação (3) demonstra como estas notas são atribuídas aos métodos.

$$N_i = \sum_{a=1}^n C_a * P_{ai} \quad (3)$$

Onde,

- (N) = a nota de cada método i;
- (C) = critério respondido;
- (P) = peso atribuído a cada critério de cada método;
- (n) = número total de critérios.

Os pesos atribuídos a cada critério de cada método são fixos no algoritmo e são inseridos pelo especialista que conhece a metodologia e que programará o algoritmo, logo o algoritmo segue o viés do especialista, porém é um viés único, ou seja, um único especialista criando o

sistema que poderá ser utilizado por qualquer empresa que necessite escolher um MCDM para este problema. Sendo assim, o algoritmo do sistema pode ser visualizado a Figura 18.

Figura 18 – Algoritmo do sistema SCMM

```
Pai = Weights  
CH = Choice  
Ni = Note of each method i;  
  
Read User answer for each criteria Ca;  
  
for (i=0; i< I; i++)  
  Ni =  $\sum_{a=1}^n C_a * P_{ai}$   
end for  
  
CH = {max Ni}
```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Esta metodologia tende a minimizar possíveis equívocos na escolha de métodos MCDM, tendo em vista que na literatura, a seleção de métodos não possui nenhum procedimento estruturado e são atribuídos pelos especialistas/facilitadores que auxiliam os decisores na tomada de decisão. Em outras palavras, qualquer empresa, que necessite aplicar um método MCDM em suas tomadas de decisão, escolhe o método de acordo com as experiências de seus facilitadores.

O espaço amostral dos pesos aplicados no procedimento sugerido neste trabalho também depende das experiências de um especialista. Porém, é sugerido aqui concentrar este procedimento apenas no sistema, ou seja, uma vez estruturada a forma de cálculo dos pesos, o sistema irá realizar a escolha do método de cada problema baseado nas características imputadas pelo usuário. Neste trabalho, os pesos utilizados no sistema foram atribuídos de forma que quanto maior a compatibilidade que a resposta do usuário tenha com o método maior é a nota atribuída a este método, por exemplo, quanto maior a quantidade de testes de qualificação ou vida acelerada a serem feitos, maior seriam as quantidades de critérios, logo, maior será a nota atribuída aos métodos como SMARTER e SMARTS.

As notas obtidas com as entradas mostradas na Tabela 6 são apresentadas na Figura 19, neste *output*, pode-se perceber que o método indicado para utilização no problema é o SMARTER, o que pode ser entendido pela grande quantidade de testes (que se tornam subcritérios) identificados no problema e a pouca disponibilidade de tempo do decisor. O tempo de aplicação do sistema criado para a escolha do método a ser aplicado depende do tempo que o usuário responde às perguntas iniciais, porém a Figura 19 demonstra que em segundos o sistema retorna a notas de cada método.

Figura 19 – Output do sistema para escolha do método MCDM

```

De acordo com as respostas dadas anteriormente, cada metodos possui uma compatibilidade
com o seu problema especifico, a seguir estao as notas da cada metodo:

SMARTS:40.9
SMARTER:43
TRADEOFF:32.5
FITRADEOFF:40.9
AHP:22.4
ELECTRE:30.6
PROMETHEE:33.7

O metodo MCDM que deve ser escolhido para resolucao do seu problema, eh aquele que possui maior nota!

Process returned 0 (0x0)   execution time : 18.735 s
Press any key to continue.

```

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de avaliar os resultados obtidos com o algoritmo frente a variação dos *inputs*. Para isso, cada variável do problema recebeu um valor inicial fixo, demonstrado na Tabela 7, para a realização das simulações. Posteriormente, foi escolhida apenas uma variável por vez para modificações dos seus valores aleatoriamente dez mil vezes. O espaço amostral destas simulações também pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7 – Espaço amostral das simulações dos parâmetros no sistema

	VALOR FIXO	ESPAÇO AMOSTRAL 1	ESPAÇO AMOSTRAL 2
Testes de qualificação	1	{0-100}	{0-1000}
Testes de vida acelerada	1	{0-100}	{0-1000}
Número de componentes reparáveis	2	{0-100}	{0-1000}
Tempo de elicitação (h)	2	{0-100}	{0-1000}
Tempo para resolução (d)	1	{0-100}	{0-1000}
Experiência com MCDM	Sim	{Não; Sim; sim, muitas}	{Não; Sim; sim, muitas}
Preferência por softwares	Sim	{sim, não}	{sim, não}
Número de decisores	2	{0-100}	{0-1000}

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A variação dos parâmetros das variáveis modifica o método MCDM escolhido em cada simulação. Nas Tabelas 8 e 9 pode ser visualizado o número de vezes em que um determinado método é escolhido em cada simulação.

Tabela 8 – Modificação dos parâmetros no sistema para escolha do método MCDM (espaço amostral 1)

ESPAÇO AMOSTRAL 1								
Variável	Tempo De simulação	SMARTS	SMARTER	TRADEOFF	FITRADEOFF	AHP	ELECTRE	PROMETHEE
Teste de qualificação	113,020 (s)	3971	5327	0	702	0	0	0
Teste de vida acelerada	101,530 (s)	3637	5748	0	615	0	0	0
Componentes reparáveis	111,953 (s)	3990	5328	0	682	0	0	0
Testes e componentes simultaneamente	109,034 (s)	238	9762	0	0	0	0	0
Tempo de elicitação (h)	68,910 (s)	496	203	0	651	0	0	8650
Tempo de resolução (dias) e Tempo de elicitação (h)	96,849 (s)	234	88	80	302	289	770	8237
Experiência dos decisores com MCDM	90,014 (s)	3331	3318	0	3351	0	0	0
Preferência por softwares	94,132 (s)	0	5037	0	4923	0	0	0
Número de decisores	64,599(s)	0	8571	0	1429	0	0	0
Variando todos menos os testes	77,793(s)	76	4343	795	4689	97	0	0

Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Foi possível verificar, que uma grande quantidade de testes, sejam eles de qualificação ou de vida acelerada, adicionados ao número de componentes do problema, assim como um alto número de decisores, provocam a escolha de um método com resolução mais simples, como o SMARTS e o SMARTER, principalmente em se tratando de simulações onde o tempo disponível para elicitação ou resolução é pequeno. Além disso, métodos como AHP e ELECTRE foram escolhidos apenas na medida que estes tempos cresciam. Da mesma forma, a maior dificuldade de entendimento do *tradeoff*, assim como a característica de sua aplicação, faz com que o algoritmo escolha-o apenas em problemas com maior disponibilidade de tempo e com decisores que já possuam certo conhecimento de métodos MCDM.

Tabela 9 – Modificação dos parâmetros no sistema para escolha do método MCDM (espaço amostral 2)

ESPAÇO AMOSTRAL 2								
Variável	Tempo De simulação	SMARTS	SMARTER	TRADEOFF	FITRADEOFF	AHP	ELECTRE	PROMETHEE
Teste de qualificação	76,425(s)	375	9615	0	10	0	0	0
Teste de vida acelerada	71,843(s)	375	9615	0	10	0	0	0
Componentes reparáveis	74,058(s)	387	9601	0	12	0	0	0
Testes e componentes simultaneamente	75,614(s)	0	10000	0	0	0	0	0
Tempo de elicitação (h)	79,987(s)	55	18	0	61	0	0	9866
Tempo de resolução (dias) e Tempo de elicitação (h)	95,582(s)	2	1	11	0	46	1226	8714
Experiência dos decisores com MCDM	67,068(s)	3331	3318	0	3351	0	0	0
Preferência por softwares	76,399(s)	0	515	0	9485	0	0	0
Número de decisores	74,450(s)	0	9859	0	141	0	0	0
Variando todos menos os testes	72,864(s)	0	3719	167	6112	2	0	0

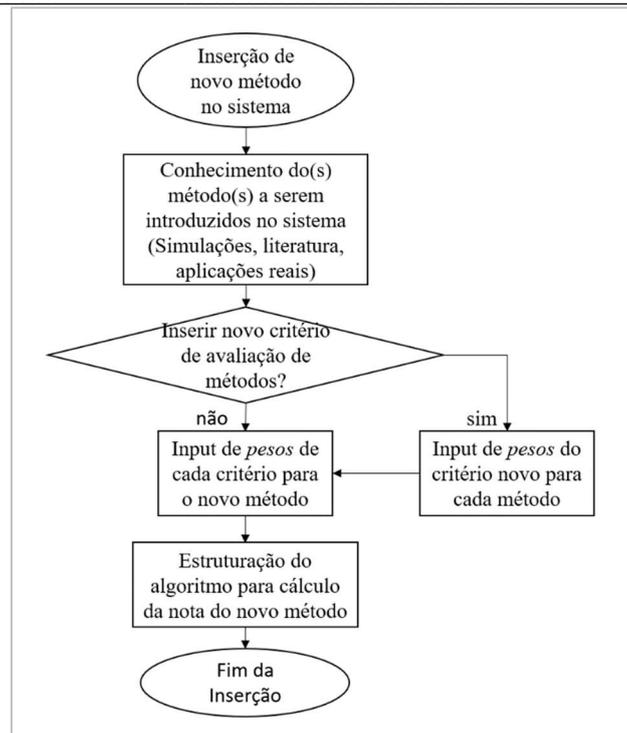
Fonte – Esta Pesquisa (2019)

A mudança do espaço amostral possibilita um número ainda maior de testes, consequentemente a escolha pelos métodos SMARTS e SMARTER também aumentam. A escolha do método Fittradeoff também aumentou consideravelmente em casos de preferência da resolução com *softwares*. É importante lembrar que a modificação das perguntas feitas pelo algoritmo, pode ocorrer à medida que mais métodos MCDM são estudados, modificando assim a forma de avaliação e até mesmo dos pesos de cada critério.

4.2 SÍNTESE CONCLUSIVA DO CAPÍTULO

O sistema criado tem o intuito de facilitar os processos de tomada de decisão dos gestores agilizando a identificação do método a ser utilizado em seus problemas. É de conhecimento que este sistema possui suas limitações como, por exemplo, levar em consideração apenas sete métodos MCDM, tendo em vista a existência de outros na literatura. Porém, este ponto é visto como uma oportunidade de continuação do trabalho. Além disso, os pesos e as perguntas postos no sistema também podem ser mudados e/ou acrescentados o que geraria *outputs* diferentes. A inserção de novos métodos no sistema pode ser estruturada e serem inseridos novos métodos de forma contínua, seguindo o fluxo do Fluxograma 5.

Fluxograma 5 – Fluxograma de inserção de novos métodos no sistema SCMM



Fonte – Esta Pesquisa (2019)

Este sistema é visto ainda como um grande diferencial deste trabalho, tendo em vista que não foram encontrados na literatura procedimentos ou sistemas que sugiram métodos MCDM para problemas específicos. Além disso, este sistema abre visões para criações de softwares que, além de indicar o melhor método de aplicação em um problema específico, poderiam ainda suportar a resolução do problema, e isto poderia ser feito com a adaptação dos algoritmos construídos na seção anterior. O sistema é voltado para seleção de fornecedores de equipamentos, porém poderia ser ajustado para seleção de fornecedores em geral, ou ainda outros tipos de problemas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Vários tipos de fornecedores estão presentes no mercado atual e diferentes métodos são utilizados para a seleção deles. Este trabalho tratou do problema de seleção de fornecedores, especificamente dos fornecedores de equipamentos. A importância desses fornecedores está ligada não apenas à capacidade de entrega de um bom produto ou serviço aos clientes finais, mas também à segurança dos operários que trabalham com estas máquinas, bem como dos custos a longo prazo despendidos pela empresa. A revisão da literatura comenta sobre vários estudos abordando métodos de seleção de fornecedores. Porém, nenhum demonstra um procedimento que auxilia na conexão entre a realização destes testes de especificações com os métodos de seleção, servindo de base para justificativa deste estudo.

Por isso, com os objetivos de estimular a execução de testes de especificações dos equipamentos, utilizar os *outputs* destes testes nos processos de seleção de fornecedores e avaliação inicial da utilização de métodos multicritério neste problema, esta dissertação realizou revisão da literatura, verificando quais os métodos MCDM mais utilizados para os SSP's, além da construção de um embasamento teórico mostrando a importância dos testes de especificação técnica.

Além da construção da base teórica, foi construída uma metodologia, apresentada na Figura 1, com o intuito de demonstrar o caminho da construção da conexão dos problemas SSP de equipamentos com os métodos MCDM, sendo esta conexão estruturada em um sistema que auxilie gestores na escolha do método que melhor se adequa a um problema específico.

A construção deste sistema só foi possível por meio da aplicação das simulações dos métodos abordados em um problema fictício. Estas simulações tiveram grande importância na obtenção de *insights* dos métodos, que por sua vez auxiliaram na construção do sistema que possui o objetivo de identificar qual o método MCDM mais indicado para cada problema específico de seleção de fornecedores de equipamentos. Este sistema pode ser identificado como o primeiro passo para a estruturação da escolha destes métodos, diminuindo erros que podem ser causados pela escolha de profissionais com pouca experiência com estes tipos de métodos como, por exemplo, gestores ou estudantes que ainda não obtiveram nenhum contato com os métodos abordados.

Com a estruturação deste problema, as empresas podem conectar a realização dos testes de especificações técnicas com modelos de seleção de fornecedores, auxiliando assim as empresas a utilizar seus poderes de barganha para induzir ou incentivar os fornecedores a realizarem estes testes.

Algumas limitações podem ser identificadas nesse problema, como a falta de informações de como as empresas realizam as compras de seus equipamentos, além da falta de padronização para obtenção de dados históricos e para a própria realização de testes de especificações que atestem a segurança e qualidade destes. Todos os argumentos tratados no texto devem servir de incentivo para estudo destas dificuldades. A indicação do centro de informações tecnológica e para negócios (CIT) já é um grande auxílio que deve ser conhecido pelas empresas brasileiras, para identificação de normas técnicas que se adaptem a cada ramo específico. A padronização da obtenção de dados para análises de confiabilidade também é um grande ponto que deve ser indicado para estudos futuros, tendo em vista a sua importância e grande complexidade por depender da cultura das empresas com relação à coleta, armazenamento e até de um possível compartilhamento destes dados com o mercado.

Outra limitação é relacionada a inserção dos pesos de cada critério, com relação a cada método. Estes pesos, podem seguir qualquer escala de acordo com o especialista que realizar a inserção de novos métodos. Logo, a definição de uma escala fixa, como por exemplo a de Saaty(1990) para o AHP, para a definição dos pesos no sistema pode ser visualizada como uma possibilidade de trabalhos futuros.

Com relação ao impacto gerencial, as empresas poderão utilizar este sistema como base para escolha do método para abordagem de problemas nesse contexto. Não dependerão, portanto, exclusivamente das experiências de seus colaboradores, ou da contratação de consultores para a análise e escolha do método MCDM. Além disso, existe a possibilidade de inserção de novos métodos no sistema, não ficando assim obsoleto. Os gestores poderão ainda, ser influenciados a utilizar o poder de barganha e incentivar fornecedores à aplicarem os testes de especificações técnicas, que darão maiores controles de qualidade, além de possibilitar maior segurança aos usuários dos equipamentos e aos clientes finais da cadeia de suprimentos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos sobre a possibilidade de criação de sistemas de intercâmbio de dados de manutenção e falhas poderiam ser realizados, possibilitando assim a avaliação da confiabilidade de fornecedores com os quais as indústrias ainda não possuem experiências. Esta sugestão de trabalho futuro é delicada e deve ser avaliada levando em consideração as especificações legais, pois a manipulação de dados de outras empresas ou pessoas necessita de autorização legal. Esta criação de sistema de intercâmbio pode ser crucial para a correta padronização dos dados, quanto as formas de sua obtenção, armazenamento e distribuição.

Podem ser realizadas ainda aplicações em problemas reais, que serviriam de base para confirmação dos *insights* retirados deste trabalho, além de possibilitar a obtenção de outras

dificuldades de aplicação e, conseqüentemente, novas possibilidades de estudos. Além disso, o limite de tempo torna inviável a avaliação de todos os métodos multicritério possíveis. Porém métodos híbridos com aplicações de lógica *fuzzy*, como proposto por Chou e Chang (2008), ou de programação matemática, podem aumentar o número de métodos aptos para avaliação deste problema. E podem ser inseridos no sistema conforme o Fluxograma 5.

A identificação de possibilidade de criação de um software que além de indicar o melhor método a ser utilizado em cada problema específico, possa ainda aplicar estes métodos em sua plataforma, também é uma possibilidade de estudo que impactaria e facilitaria diretamente as tomadas de decisões gerenciais.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, A. K.; MURTHY, V.M.S.R.; CHATTOPADHYAYA, S. Investigations into reliability, maintainability and availability of tunnel boring machine operating in mixed ground condition using Markov chains. *Engineering Failure Analysis*, vol. 105, pp. 477-489, 2019.
- AIRES, R.F.F.; NETO, J.C.S.; SALGADO, C.C.R.; ARAÚJO, A.G.; COLOMBO, C.R. Apoio à tomada de decisão multicritério ao processo de seleção de fornecedores de uma indústria do ramo de tintas do Rio Grande do Norte – UFRN. *Revista UNIABEU*. Vol. 6, n. 14, 2013.
- AHARONOVITZ, M.C.S.; VIEIRA, J.G.V. Proposta de modelo multicritério para seleção de fornecedores de serviços logísticos. *Gestão da produção, operações e sistemas (GEPROS)*. ano 9, n. 1, 2014.
- ALENCAR, L.H. *Modelo multicritério de decisão em grupo para seleção de fornecedores em gestão de projeto*. Recife, 2006. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2006.
- ALENCAR, L.H.; ALMEIDA, A.T.; MOTA, C.M.M. Sistemática proposta para seleção de fornecedores em gestão de projetos. *Gestão & Produção*. vol. 14, n. 3, 2007.
- ALIKHANI, R.; TORABI, S.A.; ALTAY, N. Strategic supplier selection under sustainability and risk criteria. *International Journal of Production Economics*. vol. 208, pp. 69-82, 2019.
- ALMEIDA, A. T. *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Editora Atlas S.A. ISBN 978-85-224-8011-1, 2013.
- ALMEIDA, A.T. Additive-veto models for choice and ranking multicriteria decision problems. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, vol. 30, No. 6, 2013.
- ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D.C.; COSTA, A.P.C.S.; ALENCAR, L.H.; DAHER, S.F.D. *Decisão em grupo e negociações: métodos e aplicações*. São Paulo: Atlas, 2015.
- ALMEIDA, A. T.; ALMEIDA, J. A.; COSTA, A. P. C. S.; ALMEIDA-FILHO, A. T.; A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interative tradeoff. *European Journal of Operational Research*, vol. 250, pp. 179-191, 2016.
- AMARO, G.D.; JUNIOR, F.R.L. *Aplicação de método fuzzy-TOPSIS no apoio à seleção de fornecedores “verdes”*. In: XVII Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, São Paulo - SP, 2015.
- AMID, A.; GHODSYPOUR, S.H.; O'BRIEN, C. A weighted additive fuzzy multiobjective model for the supplier selection problem under price breaks in a supply chain. *International Journal of Production Economics*, vol. 121, 2009.

ARABSHEYBANI, A.; PAYDAR, M. M.; SAFAEI, A. S. Na integrated fuzzy MOORA and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk. *Journal of Cleaner Production*, vol. 190, pp. 577-591, 2018.

ARAÚJO, M.C.B.; ALENCAR, L.H. Modelo multicritério para a seleção de fornecedores de produtos estratégicos. *Recent Advances in Theory, Methods, and Practice of Operations Research*, pp. 247-254, México, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 28924: *Máquinas agrícolas - Proteções para partes móveis de transmissão de potência - Abertura da proteção sem ferramenta*, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 5697: *Veículos agrícolas e florestais - Determinação do desempenho de frenagem*, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 5674: *Tratores e máquinas agrícolas e florestais: Proteções para eixos de transmissão da tomada de potência (TDP) - Ensaios de resistência e desgaste e critérios de aceitação*, 2017.

BARRON, F. H.; BARRETT, B. E. The efficacy of SMARTER – Simple multi-attribute rating technique extended to ranking. *Acta Psychologica*, vol. 93, pp. 23-36, 1996.

BASET, M.A.; CHANG, V.; GAMAL, A.; SMARANDACHE, F. An integrated neutrosophic ANP and VIKOR method for achieving sustainable supplier selection: a case study in importing field. *Computers in Industry*, vol. 106, pp. 94-110, 2019.

BASSET, M.A.; MANOGARAN, G.; MOHAMED, M.; CHILAMKURTI, N. Three-way decisions based on neutrosophic sets and AHP-QFD framework for supplier selection problem. *Future Generation Computer Systems*, vol. 89, pp. 19-30, 2018.

BASTOS, A.L.A.; MATIAS, K.E.; DAMM, H.; LUNA, M.M.M. *Modelo multicritério de apoio à decisão para seleção de fornecedores*. In: VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Rio de Janeiro – RJ, 2011.

BASTOS, R.O. *Proposta de aprimoramento do processo de avaliação e seleção de fornecedores: uma aplicação ao caso do Instituto Federal de Tocantins*. São Leopoldo, 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade do Vale do Rio dos Sinos- UNISINOS, 2016.

BERNIJAZOV, R.; HILLEBRAND, M.; BREMER, C.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R. Specification technique for virtual testbeds in space robotics. *Procedia Manufacturing*, vol. 24, pp. 271-277, 2018.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. *Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques*. New York: Springer Science+Business Media, LLC. ISBN 978-1-4899-0685-4, 1992.

BORGIA, O.; de CARLO, F.; FANCIULLACCI, N.; TUCCI, M. Accelerated life tests for new product qualification: a case study in the household appliance. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, pp. 269-274, 2013.

BRIASSOULIS, D.; HISKAKIS, M.; BABOU, E. Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste. *Waste Management*, vol. 33, pp. 1516-1530, 2013.

-
- CHAI, J.; LIU, J. N. K.; NGAI, E. W. T. Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications*, vol. 40, pp. 3872-3885, 2013.
- CHOU, S.Y.; CHANG, Y.H. A decision support system for supplier selection based on a strategy-aligned fuzzy SMART approach. *Expert Systems with Applications*, vol. 34, pp. 2241-2253, 2008.
- CODE::BLOCKS. *The open source, cross platform, free C, C++ and Fortran IDE* . <http://www.codeblocks.org/>, <Acesso em setembro de 2019>.
- de BORDA, J.-C. Mathematical derivation of an election system. *Isis*, vol. 44, pp. 42-51 (English translation by A. de Grazia 1953), 1781.
- DIAS, E.M.P.S. *Modelo de apoio à decisão multicritério para seleção de fornecedores de azeite*. Dissertação (Mestrado em Modelação, Análise de Dados e Sistemas de Apoio à Decisão). Universidade do Porto, 2015.
- DOANE, D.P.; SEWARD, L.E. *Estatística aplicada à administração e economia*. AMGH Editora Ltda, ISBN 978-85-8055-394-9, 2014.
- DU, S.; ZENG, Z.; CUI, L. KANG, R. Reliability analysis of Markov history-dependent repairable systems with neglected failures. *Reliability Engineering and Systems Safety*, vol. 159, pp. 134-142, 2017.
- EDWARDS, W. *How to use multi-attribute utility measurement for social decision-making*. Advanced Decision Technology Program. University of Southern California, Los Angeles, 1977.
- EDWARDS, W.; BARRON, F.H. SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 60, pp. 306-325, 1994.
- ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S.R.; ROCHA, R.; MARAFON, A.D.; MEDAGLIA, T.A. *Modelo multicritério de apoio à decisão construtivista no processo de avaliação de fornecedores*. Produção, Florianópolis, SC, 2011.
- FALCÃO, J.M.S.L. *Modelo multicritério para seleção de fornecedores na reciclagem de resíduo do óleo lubrificante*. Recife, 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2012.
- FERREIRA, L.; SANTI, E. *Um modelo multicritério Fuzzy-Electre para o problema de seleção de fornecedores*. In: XLIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, 2012.
- FRADE, M.R.M.G. *Seleção de fornecedores utilizando o método Analítico Hierárquico (AHP) e a análise de risco de fornecimento na indústria farmacêutica: caso de estudo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). 124 f. Universidade Nova de Lisboa, 2013.

- FREJ, E.A. *Modelo multicritério para seleção de fornecedores e análise da problemática com FITradeoff*. Recife, 2017. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2017.
- FU, Y.K. An integrated approach to catering supplier selection using AHP-ARAS-MCGP methodology. *Journal of Air Transport Management*, vol. 75, pp. 164-169, 2019.
- 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*, vol. 202, pp. 182-198, 2018.
- GALO, N.R.; PEDROSO, C.B.; CERVI, A.F.C.; CARPINETTI, L.C.R. *Inferência Fuzzy aplicada à seleção de fornecedores verdes*. In: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, João Pessoa – PB, 2016.
- GANGA, G.M.D.; RODRIGUES, L.R.; YOSHINO, R.T.; EULALLIA, L.A.S. Métodos quantitativos para seleção de fornecedores sustentáveis: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Produção Online*, vol. 16, n. 4, 2016.
- GIACON, J.C.R. *Seleção de fornecedores por análise de decisão multicritério e otimização combinatória considerando aspectos de logística e sustentabilidade*. São Paulo, 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.
- GONÇALO, T.E.E. *Modelo multicritério para seleção de fornecedores de serviços terceirizados: um estudo de caso para fornecedores de transporte em uma rede varejista*. Recife, 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2012.
- GONÇALO, T.E.E.; ALENCAR, L.H. *Seleção de fornecedores para um estaleiro brasileiro utilizando a metodologia ELECTRE III*. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Ubatuba-SP, 2011.
- GONÇALO, T.E.E.; MORAIS, D.C. Modelo multicritério de decisão em grupo para seleção de fornecedores em uma empresa petrolífera brasileira. *Recent Advances in Theory, Methods, and Practice of Operations Research*, pp. 255-262, México, 2014.
- GONÇALVES, C.; DIAS, J. *Seleção multicritério de fornecedores de serviços de manutenção: metodologia baseada no método ELECTRE I*. In: VII Encontro de Tróia-Qualidade, Investigação e Desenvolvimento, 2016.
- GOVINDAN, K.; JEPSEN, M. B. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, vol. 250, pp. 1-29, 2016.
- GUARNIERI, P. Síntese dos principais critérios, métodos e subproblemas da seleção de fornecedores multicritério. *Revista de Administração Contemporânea*, vol. 19, n. 1, 2015.
- HESS, S. M. Risk managed technical specifications. *Progress in Nuclear Energy*, vol. 51, pp. 393-400, 2009.

-
- HU, C.; HU, J.; ZHOU, Q.; YANG, Y. Primary discussion on standardized management of purchasing large equipments for measurement technology institution. *Physics Procedia*, vol. 25, pp. 1837-1844, 2012.
- HO, W.; XU, X.; DEY, P. K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: a literature review. *European Journal of Operational Research*, vol. 202, pp. 16-24, 2010.
- IBARAKI, S.; YOSHIDA, I.; ASANO, T. A machining test to identify rotary axis geometric errors on a five-axis machine tool with a swivelling rotary table for turning operations. *Precision Engineering*, vol. 55, pp. 22-32, 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 230-1: 2012 *Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 14224:2016 *Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 14955-1:2017 *Machine tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 1: Design methodology for energy – efficient machine tools*.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 2411:2017 *Rubber- or plastics -coated fabrics – Determination of coating adhesion*.
- JATI, H.; DOMINIC, D. D. A new approach of Indonesian university webometrics ranking using entropy and PROMETHEE II. *Procedia Computer Science*, vol. 124, pp. 444-451, 2017.
- JUNIOR, L.A.F.; BORGES, G.F. Seleção de fornecedores: uma abordagem pelo MAUT. *Brazilian Journal of Production Engineering*, vol. 4, n. 4, 2018.
- JUNIOR, F.R.L.; CARPINETTI, L.C.R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. *Gestão & Produção*, vol. 12, n. 1, 2015.
- JUNIOR, F.R.L.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L.C.R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. *Gestão & Produção*, 2012.
- KARA, K.; KOLEOGLU, N.; GUROL, P. Analytic Network Process (ANP) in supplier selection: a case study in textile sector. *International Journal of Business and Social Science*, vol. 7, n. 5, 2016.
- KEENEY, R. L. Decision analysis: An overview. *Operations Research*, vol. 30, pp. 803-838, 1982.
- KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. *Decision analysis with multiple conflicting objectives*. Wiley & Sons, New York, 1976.

- KREJCÍ, J.; STOKLASA, J. Aggregation in the analytic hierarchy process: why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean. *Expert Systems With Applications*, vol. 114, pp. 97-106, 2018.
- KULKARNI, P. V.; SAWANT, P. J.; KULKARNI, V. V. Design and development of plane bending fatigue testing machine for composite material. *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 11563-11568, 2018.
- KUMAR, S.; KUMAR, S.; BARMAN, A.G. Supplier selection using fuzzy TOPSIS multi criteria model for a small scale steel manufacturing unit. *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp. 905-912, 2018.
- KUMAR, R.; PADHI, S.S.; SARKAR, A. Supplier selection of an Indian heavy locomotive manufacturer: an integrated approach using Taguchi loss function, TOPSIS, and AHP. *IIMB Management Review*, pp. 1-13, 2019.
- LIU, Y.; WANG, D.; LI, Z.; BAI, Y.; SUN, C.; TAN, J. A coaxiality measurement method by using three capacitive sensors. *Precision Engineering*, vol. 55, pp. 127-136, 2019.
- LONGARAY, A.A.; BUCCO, G. *Emprego da análise hierárquica de processos no desenvolvimento de sistema de apoio à decisão para seleção de fornecedores de materiais de informática: o caso da FURG*. In: XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos-SP, 2010.
- LOURO, A.M.; SOBRINHO, E.V.L.; CONCEIÇÃO, J.V.S.; FIRME, P.T.P.; GONÇALVES, W. Escolha interativa no processo de seleção de fornecedores: uma abordagem por meio do *Analytic Hierarchy Process (AHP)*. *Brazilian Journal of Production Engineering*, vol. 3, n. 2, 2017.
- MAJOR, G.L.A.; BELDERRAIN, M.C.N. *Uma abordagem quantitativa para o problema de seleção de fornecedores*. In: XII Encontro de Iniciação Científica e Pós-graduação do ITA, 2007.
- MATTETTI, M.; MARALDI, M.; SEDONI, E.; MOLARI, G. Optimal criteria for durability test of stepped transmissions of agricultural tractors. *Biosystems Engineering*, vol. 178, pp. 145-155, 2019.
- MEMARI, A.; DARGI, A.; JOKAR, M.R.A.; AHMAD, R.; RAHIM, A.R.A. Sustainable supplier selection: a multi-criteria intuitionistic fuzzy TOPSIS method. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 50, pp. 9-24, 2019.
- MOLINÉ, J.I.; COVES, A.M. *Supplier evaluation and selection: a review of the literature since 2007*. In: XVII Congreso de Ingeniería de Organización, 2013.
- MORI, L.D.; JUNIOR, F.R.L.; CARPINETTI, L.C.R. *Uma metodologia Fuzzy QFD para apoiar a escolha de critérios de seleção de fornecedores*. In: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2014.
- MUTILBA, U.; ACEDO, E. G.; SANDÁ, A.; VEJA, I.; FABRA, J. A. Uncertainty assessment for on-machine tool measurement: An alternative approach to the ISO 15530-3 technical specification. *Precision Engineering*, vol. 57, pp. 45-53, 2019.

PACHECO, M.C.R.; GOLDMAN, F.L. Modelos multicriteriais de apoio à decisão: o modelo AHP como auxílio à seleção de fornecedores em uma confecção. *Revista de ciência, Tecnologia e Inovação*, n. 3, 2017.

PARAFOROS, D. S.; GRIEPENTROG, H. W.; VOUGIOUKAS, S. G. Methodology for designing accelerated structural durability tests on agricultural machinery. *Biosystems Engineering*, vol. 149, pp. 24-37, 2016.

PEREIRA, R.L. *Uso de método de decisão multi-critério para seleção de um fornecedor de moldes para fundição de autopeças*. Taubaté, 2011. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de Taubaté, 2011.

PEREZ, P.P.D. *Análise multicritério aplicada na seleção de fornecedores de sistemas ERP para um grupo de restaurantes*. Recife, 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco- UFPE, 2013.

PISHCHULOV, G.; TRAUTRIMS, A.; CHESNEY, T.; GOLD, S.; SCHWAB, L. The voting analytic hierarchy process revisited: a revised method with application to sustainable supplier selection. *International Journal of Production Economics*, vol. 211, pp. 166-179, 2019.

POP, S. C.; GLATARD, T.; SILVA, R. F.; GUETH, P.; SARNUT, D.; CATTIN, H. B. Monte Carlo simulation on heterogeneous distributed systems: A computing framework with parallel merging and checkpointing strategies. *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, pp. 728-738, 2013.

PRADO, A.A.A. *Análise de decisão multicritério aplicada na seleção de fornecedores de logística*. São Paulo, 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

REGATTIERI, A.; PIANA, F.; GAMBERI, M.; GALIZIA, G.; CASTRO, A. Reliability assessment of a packaging automatic machine by accelerated life testing approach. *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 2178-2186, 2017.

RODRIGUEZ, J.M.M. *Modelo de decisão multicritério para seleção de fornecedores de equipamentos laboratoriais para pesquisa agropecuária*. Recife, 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2017.

ROSA, E.P.S.; SELITTO, M.A.; MENDES, L.W. Avaliação multicriterial de desempenho e separação em aglomerados de fornecedores críticos de uma manufatura OKP. *Produção*, vol. 16, n. 3, 2006.

ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue Française d'informatique et de Recherche Opérationnelle*, tome 2, n° V1, p. 57-75, 1968.

SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process: what it is and how it is used. *Mathl Modelling*, vol. 9, n. 3-5, pp. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. Introduction to a modeling of social decision processes. *Mathematics and Computers in Simulation XXV*, pp. 105-107, 1983.

SAATY, T. L. Absolute and relative measurement with the AHP. The most livable cities in the United States. *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 20, pp. 327-331, 1986.

- SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, vol. 48, pp. 9-26, 1990.
- SALMINEN, P.; HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R. Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 104, pp. 485-496, 1998.
- SANTI, E.; ROCHA, L.F.C.T.M.; ALOISE, D. *Um modelo híbrido de seleção de fornecedores para cadeias de suprimentos*. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Ubatuba-SP, 2011.
- SANTOS, L.F.O.M.; OSIRO, L. Modelo de segmentação e avaliação multicritério de fornecedores para micro e pequena empresa. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Bauru, 2016.
- SCHRAMM, F. *Modelo de apoio a decisão para seleção e avaliação de fornecedores na cadeia de suprimentos da construção civil*. Recife, 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2008.
- SCHRAMM, F.; SILVA, V.B.S.; MORAIS, D.C. *O uso de análise multicritério na seleção de fornecedores: aplicação na indústria de construção civil*. In: XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto Seguro- BA, 2009.
- SEPERAMANIAM, T.; JALIL, N. A. A.; ZULKEFLI, Z. A. Hydrostatic bearing design selection for automotive application using Pugh controlled convergence method. *Procedia Engineering*, vol. 170, pp. 422-429, 2017.
- SILVA, A.C.S.; BELDERRAIN, M.C.N. *O problema de seleção de fornecedores: abordagem AHP com uso de ratings*. In: XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves-RS, 2010.
- SILVA, D.; DANI, A.C.; KROENKE, A.; HEIN, N. *Aplicação do método AHP no processo de seleção de fornecedores em uma empresa de Santa Catarina*. In: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Vitória -ES, 2016.
- SIMIÉ, D.; KOVACEVIÉ, I.; SVIRCEVIÉ, V.; SIMIÉ, S. 50 years of fuzzy set theory and models for supplier assessment and selection: A literature review. *Journal of Applied Logic*, vol. 24, pp. 85-96, 2017.
- SOUZA, E.P.M.; CARMO, B.B.T. Avaliação de fornecedores de chapa de aço em uma empresa de implementos rodoviários baseada na abordagem multicritério: um estudo de caso. *Production*, vol. 25, n. 3, 2015.
- STAMMINGER, R.; TECCHIO, P.; ARDENTE, F.; MATHIEUX, F.; NIESTRATH, P. Towards a durability test for washing-machines. *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 131, pp. 206-215, 2018.
- TEIXEIRA, J.M.M.B. *Estudo empírico da caracterização da seleção de fornecedores*. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, 2010.

THAKKER, A.; JARVIS, J.; BUGGY, M.; SAHED, A. 3DCAD conceptual design of the next-generation impulse turbine using the Pugh decision-matrix. *Materials and Design*, vol. 30, pp. 2676-2684, 2009.

TRANCHARD, S. *New ISO standards for greener machine tools*. 2018. In: <https://www.iso.org/news/ref2262.html>.

VIANA, J.C.; ALENCAR, L.H. Metodologias para seleção de fornecedores: uma revisão da literatura. *Production*, vol. 22, n. 4, 2012.

VULEVIĆ, T.; DRAGOVIĆ, N. Multi-criteria decision analysis for sub-watersheds ranking via the PROMETHEE method. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 5, pp. 50-55, 2017.

WEBER, M.; BORCHERDING, K. Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. *European Journal of Operational Research*, vol. 67, pp. 1-12, 1993.

WIESSNER, M.; BLASER, P.; BOHL, S.; MAYR, J.; KNAPP, W.; WEGENER, K. Thermal test piece for 5-axis machine tools. *Precision Engineering*, vol. 52, pp. 407-417, 2018.

YE, Y.; GROSSMANN, I. E.; PINTO, J. M.; RAMASWAMY, S. Modeling for reliability optimization of system design and maintenance based on Markov chain theory. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 124, pp. 381-404, 2019.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

ZINDANI, D.; KUMAR, K. Material selection for turbine seal strips using PROMETHEE-GAIS method. *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 17533-17539, 2018.

APÊNDICE A

AHP	ROSA, E.P.S.; SELITTO, M.A.; MENDES, L.W.	2006
AHP	MAJOR, G.L.A.; BELDERRAIN, M.C.N.	2007
AHP	SILVA, A.C.S.; BELDERRAIN, M.C.N.	2010
AHP	TEIXEIRA, J.M.M.B.	2010
AHP	LONGARAY, A.A.; BUCCO, G.	2010
AHP	BASTOS, A.L.A.; MATIAS, K.E.; DAMM, H.; LUNA, M.M.M.	2011
AHP	PEREIRA, R.L.	2011
AHP	FRADE, M.R.M.G.	2013
AHP	AHARONOVITZ, M.C.S.; VIEIRA, J.G.V.	2014
AHP	DIAS, E.M.P.S.	2015
AHP	SANTOS, L.F.O.M.; OSIRO, L.	2016
AHP	SILVA, D.; DANI, A.C.; KROENKE, A.; HEIN, N.	2016
AHP	PACHECO, M.C.R.; GOLDMAN, F.L.	2017
AHP	LOURO, A.M.; SOBRINHO, E.V.L.; CONCEIÇÃO, J.V.S.; FIRME, P.T.P.; GONÇALVES, W.	2017
AHP-ARAS-MCGP	FU, Y.K.	2019
AHP-QFD	BASSET, M.A.; MANOGARAN, G.; MOHAMED, M.; CHILAMKURTI, N.	2018
ANP	KARA, K.; KOLEOGLU, N.; GUROL, P.	2016
ANP-VIKOR	BASSET, M.A.; CHANG, V.; GAMAL, A.; SMARANDACHE, F.	2019
ELECTRE	GONÇALO, T.E.E.; ALENCAR, L.H.	2011
ELECTRE	AIRES, R.F.F.; NETO, J.C.S.; SALGADO, C.C.R.; ARAÚJO, A.G.; COLOMBO, C.R.	2013
ELECTRE	GONÇALVES, C.; DIAS, J.	2016
ELECTRE; PROMETHEE; VIP <i>analysis</i>	ALENCAR, L.H.	2006
FITradeoff	FREJ, E.A.	2017
FITradeoff; Tradeoff	RODRIGUEZ, J.M.M.	2017
<i>fuzzy</i>	GALO, N.R.; PEDROSO, C.B.; CERVI, A.F.C.; CARPINETTI, L.C.R.	2016
<i>fuzzy</i> - ELECTRE	FERREIRA, L.; SANTI, E.	2012
<i>fuzzy</i> - ELECTRE	GALO, N.R.; CALACHE, L.D.D.R.; CARPINETTI, L.C.R.	2018
<i>fuzzy</i> -GRASP	SANTI, E.; ROCHA, L.F.C.T.M.; ALOISE, D.	2011
<i>fuzzy</i> -MODM	AMID, A.; GHODSYPOUR, S.H.; O'BRIEN, C.	2009
<i>fuzzy</i> -QFD	MORI, L.D.; JUNIOR, F.R.L.; CARPINETTI, L.C.R.	2014
<i>fuzzy</i> -SMART	CHOU, S.Y.; CHANG, Y.H.	2008
<i>fuzzy</i> -TOPSIS	AMARO, G.D.; JUNIOR, F.R.L.	2015
<i>fuzzy</i> -TOPSIS	KUMAR, S.; KUMAR, S.; BARMAN, A.G.	2018
<i>fuzzy</i> -TOPSIS	MEMARI, A.; DARGI, A.; JOKAR, M.R.A.; AHMAD, R.; RAHIM, A.R.A.	2019
<i>fuzzy</i> -TOPSIS; TOPSIS	JUNIOR, F.R.L.; CARPINETTI, L.C.R.	2015
<i>fuzzy</i> -VIKOR- DEA	ALIKHANI, R.; TORABI, S.A.; ALTAY, N.	2019

MACBETH	ENSSLIN, L. <i>et al.</i>	2011
MACBETH	SOUZA, E.P.M.; CARMO, B.B.T.	2014
MAUT	JUNIOR, L.A.F.; BORGES, G.F.	2018
MAVT	PRADO, A.A.A.	2011
MAVT	GIACON, J.C.R.	2012
PROMETHEE	SCHRAMM, F.; SILVA, V.B.S.; MORAIS, D.C.	2009
PROMETHEE	FALCÃO, J.M.S.L.	2012
PROMETHEE	PEREZ, P.P.D.	2013
PROMETHEE	ARAÚJO, M.C.B.; ALENCAR, L.H.	2014
PROMETHEE	GONÇALO, T.E.E.; MORAIS, D.C.	2014
PROMSORT	GONÇALO, T.E.E.	2012
SMARTER	SCHRAMM, F.	2008
TOPSIS-AHP	KUMAR, R.; PADHI, S.S.; SARKAR, A.	2018
V-AHP	PISHCHULOV, G.; TRAUTRIMS, A.; CHESNEY, T.; GOLD, S.; SCHWAB, L.	2019
VIKOR; AHP	BASTOS, R.O.	2016

Apêndice A: 51 Estudos analisados