



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

CAIO SANTOS DE MIRANDA ARAÚJO

**MODELO DE AUXÍLIO À DECISÃO PARA SELEÇÃO DE SIMULADOR DE
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

TERESINA

2021

CAIO SANTOS DE MIRANDA ARAÚJO

MODELO DE AUXÍLIO À DECISÃO PARA SELEÇÃO DE SIMULADOR DE ANÁLISE
DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do diploma
do Curso de bacharelado em Engenharia Mecânica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí (Campus Teresina Central).

Orientador: Prof. Dr. Francisco Valdivino Rocha
Lima.

Coorientador: Prof. Me. Antônio Ítalo Rodrigues
Pedrosa

TERESINA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Araújo, Caio Santos de Miranda

A658m Modelo de auxílio à decisão para seleção de simulador de análise de vibrações mecânicas / Caio Santos de Miranda Araújo. - 2021.
64 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, 2021

Orientador : Prof. Dr. Francisco Valdivino Rocha Lima.

Coorientador : Prof. Me. Antônio Ítalo Rodrigues Pedrosa.

1. Tomada de decisão. 2. Modelo. 3. Seleção. 4. Simulador. I.

CDD - 620

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

CAIO SANTOS DE MIRANDA ARAÚJO

MODELO DE AUXÍLIO À DECISÃO PARA SELEÇÃO DE SIMULADOR DE ANÁLISE
DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do diploma
do Curso de bacharelado em Engenharia Mecânica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí (Campus Teresina Central).

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Valdivino Rocha Lima (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Antônio Ítalo Rodrigues Pedrosa (Coorientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Fabrício Carvalho da Silva
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Edilson Marinho da Silva Junior
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensuravelmente aos meus pais, Maria Francinete e Herbert Guida, pelo apoio necessário para chegar até aqui e a todos os meus amigos e familiares que estiveram presente nessa trajetória de vida.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Francisco Valdivino, e ao meu coorientador, Me. Antônio Ítalo, pela disponibilidade e colaboração. Agradeço também ao meu tio e engenheiro Jebert Miranda e a todas outras pessoas que puderam contribuir com o desenvolvimento desse trabalho.

“Tente mover o mundo – o primeiro passo será mover a si mesmo”.

Platão

RESUMO

O tema vibrações mecânicas é de extrema relevância na formação de engenheiros mecânicos e em áreas como física e matemática aplicada. Os sinais de vibração transportam informações importantes a respeito do funcionamento de uma máquina. Devido ao desenvolvimento de equipamentos, como os simuladores de análise de vibrações em máquinas rotativas, pode-se estudar as vibrações mecânicas nos laboratórios de ensino de engenharia, possibilitando desenvolver diversas aplicações e exteriorizar o estudo para o mundo real. Para cada tipo de equipamento necessário em um laboratório de vibrações mecânicas, existem diferentes alternativas disponíveis no mercado. Por essa razão, escolher a melhor opção de equipamento pode se tornar uma tarefa complexa, pois, além das diversas opções disponíveis, geralmente deve-se considerar múltiplos critérios na decisão. Selecionar os equipamentos de maneira inadequada pode ser prejudicial para organização e para o estudo das vibrações mecânicas. Diante da relevância em se tomar uma decisão adequada na seleção de equipamentos para o estudo de vibrações mecânicas em instituições de ensino de Engenharia Mecânica, este trabalho propõe um modelo de auxílio à decisão de múltiplos critérios que permite auxiliar no processo de escolha de simulador (bancada didática) de análise de vibrações em máquinas rotativas. Oito critérios de decisão para seleção do equipamento foram propostos e validados com auxílio do método *Fuzzy Delphi*, dos quais cinco foram aceitos. Os critérios aceitos foram ponderados (priorizados), a fim de obter a importância de cada um na seleção do equipamento e, para isso, utilizou-se o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*. O suporte técnico obteve maior peso na seleção do equipamento (44.8%), seguido de defeitos simuláveis (20.5%), garantia (15%), instrumentos inclusos (14.5%) e preço do equipamento (5.2%). Realizou-se também uma aplicação do modelo a fim de facilitar o entendimento de como utilizá-lo, em que, com auxílio do método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, mediu-se o desempenho de cinco alternativas de simuladores de análise de vibração, levando em consideração os critérios ponderados e as características de cada equipamento. O modelo será relevante para as instituições de maneira que possa ser utilizado para estruturar, facilitar e justificar a decisão de escolha dos simuladores de análise de vibrações.

Palavras-chave: Tomada de decisão. Modelo. Seleção. Simulador.

ABSTRACT

The subject of mechanical vibrations is extremely relevant in the training of mechanical engineers and in areas such as physics and applied mathematics. Vibration signals carry important information about the operation of a machine. Due to the development of equipment, such as vibration analysis simulators on rotating machines, mechanical vibrations can be studied in engineering teaching laboratories, making it possible to develop several applications and externalize the study to the real world. For each type of equipment needed in a mechanical vibration laboratory, there are different alternatives available on the market. For this reason, choosing the best equipment option can become a complex task, because, in addition to the various options available, you should generally consider multiple criteria in the decision. Selecting equipment inappropriately can be detrimental to organization and to the study of mechanical vibrations. In view of the relevance of making an appropriate decision in the selection of equipment for the study of mechanical vibrations in Mechanical Engineering teaching institutions, this work proposes a model to aid the decision of multiple criteria that allows to assist in the process of choosing a simulator (bench didactic) of vibration analysis in rotating machines. Eight decision criteria for selecting the equipment were proposed and validated with the aid of the Fuzzy Delphi method, of which five were accepted. The accepted criteria were weighted (prioritized), in order to obtain the importance of each one in the selection of the equipment and, for that, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was used. Technical support gained more weight in the selection of the equipment (44.8%), followed by simulated defects (20.5%), warranty (15%), instruments included (14.5%) and equipment price (5.2%). An application of the model was also carried out in order to facilitate the understanding of how to use it, in which, with the aid of the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method, the performance of five simulator alternatives was measured vibration analysis, taking into account the weighted criteria and the characteristics of each equipment. The model will be relevant for institutions so that it can be used to structure, facilitate and justify the decision to choose vibration analysis simulators.

Keywords: Decision making. Model. Selection. Simulator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desbalanceamento (a) Estático (b) Conjugado (c) Dinâmico.	19
Figura 2 - Assinatura típica de desbalanceamento.	19
Figura 3 - Desalinhamento (a) paralelo, (b) angular, e (c) misto	20
Figura 4 - Assinatura de vibração de desalinhamento: paralelo à esquerda e angular a direita.	20
Figura 5 - Rolamento de esferas	21
Figura 6 - Assinaturas de vibração de defeitos em rolamentos.	21
Figura 7 - Assinatura de vibração de uma folga mecânica.	22
Figura 8 - Assinatura de vibração de problema elétrico em rotor.	23
Figura 9 - Simulador de análise de vibrações em máquinas.	23
Figura 10 - (a) Acelerômetro (b) Analisador portátil (c) Tacômetro.....	24
Figura 11 - Fluxograma comum de um processo de tomada de decisão.	26
 Gráfico 1 - Desempenho das alternativas analisadas.....	 46

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Matriz de Julgamento (Método AHP).	33
Tabela 2 - Índices randômicos em função da ordem da matriz.	34
Tabela 3 - Grau de importância de cada critério em valores numéricos com base na opinião de cada especialista.	39
Tabela 4 - Coeficientes M_i , L_i , U_i , G_i , método Fuzzy-Delphi.	40
Tabela 5 - Matriz global com os julgamentos agregados.	41
Tabela 6 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz global.	42
Tabela 7 - Matriz de decisão, alternativas de equipamentos para o exemplo de aplicação.	42
Tabela 8 - Matriz de decisão normalizada e ponderada.	45
Tabela 9 - Solução ideal positiva (A^+) e solução ideal negativa A^-	45
Tabela 10 - Distâncias Euclidianas D_i^+ e D_i^- e proximidade relativa ξ_i	46
Tabela 11 - Matriz de julgamento 1, autovetor e pesos da avaliação.	55
Tabela 12 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 1.	55
Tabela 13 - Matriz de julgamento 2, autovetor e pesos da avaliação.	56
Tabela 14 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 2.	56
Tabela 15 - Matriz de julgamento 3, autovetor e pesos da avaliação.	57
Tabela 16 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 3.	57
Tabela 17 - Matriz de julgamento 4, autovetor e pesos da avaliação.	58
Tabela 18 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 4.	58
Tabela 19 - Matriz de julgamento 5, autovetor e pesos da avaliação.	59
Tabela 20 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 5.	59
Tabela 21 - Matriz de julgamento 6, autovetor e pesos da avaliação.	60
Tabela 22 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 6.	60
Tabela 23 - Matriz de julgamento 7, autovetor e pesos da avaliação.	61
Tabela 24 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 7.	61
Tabela 25 - Matriz de julgamento 8, autovetor e pesos da avaliação.	62
Tabela 26 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 8.	62
Tabela 27 - Matriz de julgamento 9, autovetor e pesos da avaliação.	63
Tabela 28 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 9.	63
Tabela 29 - Matriz de julgamento 10, autovetor e pesos da avaliação.	64
Tabela 30 - Coeficientes IR , λ_{max} , IC e RC para matriz de julgamento 10.	64

Quadro 1 - Escala fundamental de Saaty.	28
Quadro 2 - Etapas da pesquisa.....	31
Quadro 3 - Critérios de decisão propostos para seleção do equipamento.....	37
Quadro 4 - Escala de desempenho para pontuação do critério suporte técnico.	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS	16
2.2 MANUTENÇÃO	17
2.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	17
2.4 VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ROTATIVAS	18
2.4.1 Desbalanceamento	18
2.4.2 Desalinhamento	19
2.4.3 Falha de rolamento.	20
2.4.4 Folgas mecânicas	22
2.4.5 Defeitos elétricos	22
2.5 SIMULADOR DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	23
2.6 APOIO À DECISÃO	24
2.6.1 Método AHP	27
2.6.2 Método Fuzzy Delphi	29
2.6.3 Método TOPSIS	29
3 METODOLOGIA	31
3.1 PRIMEIRA ETAPA: ELABORAÇÃO DO MODELO TEÓRICO	31
3.2 SEGUNDA ETAPA: VALIDAÇÃO DOS ELEMENTOS DO MODELO	31
3.3 TERCEIRA ETAPA: PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO MODELO VALIDADO	33
3.4 QUARTA ETAPA: APLICAÇÃO	35

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 MODELO TEÓRICO	37
4.1.1 Rotação máxima.....	37
4.1.2 Consumo elétrico	37
4.1.3 Massa	38
4.1.4 Preço	38
4.1.5 Garantia	38
4.1.6 Defeitos simuláveis.....	38
4.1.7 Instrumentos inclusos	39
4.1.8 Suporte técnico	39
4.2 VALIDAÇÃO DOS ELEMENTOS DO MODELO	39
4.3 PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO MODELO VALIDADO	41
4.4 APLICAÇÃO	42
5 CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO (MÉTODO <i>FUZZY DELPHI</i>)	54
APÊNDICE B – TABELAS COM OS RESULTADOS DO MÉTODO AHP PARA CADA AVALIADOR.	55

1 INTRODUÇÃO

O tema vibrações mecânicas é de extrema importância na formação de engenheiros mecânicos e civis e até mesmo em alguns âmbitos da física e matemática aplicada (SAVI, 2017). O estudo de vibrações é bastante versátil em relação às máquinas em que pode ser aplicado e a tipologia de falhas ou anomalias que podem ser detectadas através de análise de vibração, tornaram este um método preditivo de manutenção bastante utilizado (CARNERO, 2016).

Um sinal de vibração transporta informações associadas à condição de funcionamento de uma máquina e pode servir como base indicativa da saúde e da necessidade de manutenção do sistema mecânico. Ao longo de vários anos, a identificação de problemas mecânicos e a determinação de seu grau de severidade foram função da experiência e do senso do responsável pela manutenção dos equipamentos (ANTONIOLLI, 1999).

Na tentativa de buscar aplicar conceitos e conhecimento, a utilização de bancadas experimentais que simulam sistemas reais, tornou-se uma opção bastante difundida nas universidades e em organizações de pesquisa espalhadas pelo mundo, sendo perfeitamente plausível a aplicação destes equipamentos em análise de vibrações mecânicas (LIMA, 2014).

As bancadas experimentais apresentam papel importante dentro das instituições de ensino de engenharia, uma vez que a utilização de ferramentas didáticas possibilita ao aluno verificar e comparar os diversos efeitos apresentados na teoria e fazer a aplicação do conhecimento teórico em atividades práticas de forma paralela (LIMA, 2014).

O aprendizado e as demonstrações em laboratório com práticas e compreensão dos conceitos de vibração são relevantes para a carreira e currículo profissional do estudante e, até os dias atuais, diversas instituições acadêmicas incluem apenas aulas teóricas, sem práticas de laboratório, em função da ausência de equipamentos ou dispositivos que contemplam o estudo (PEREIRA, 2013).

Para cada tipo de equipamento necessário em um laboratório existem geralmente diversas alternativas disponíveis no mercado (OLIVEIRA, 2018). Escolher a melhor opção de equipamento pode se tornar uma tarefa complexa, pois, além das diversas alternativas disponíveis, existem vários critérios de decisão a ser levados em consideração na seleção do equipamento. Além do mais, selecionar um equipamento

inadequado pode ser caro no que diz respeito à qualidade do produto ou produção, ao uso excessivo ou subutilização de recursos (HODGETT, 2016).

Diante da relevância em se tomar uma decisão adequada na seleção de equipamentos para o estudo de vibrações mecânicas em instituições de ensino, um modelo de auxílio à decisão é proposto nesta pesquisa. O trabalho permite auxiliar no processo de escolha de simulador de análise de vibrações em máquinas rotativas frente a múltiplos critérios de decisão e possibilidades de seleção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva propor um modelo multicritério de decisão que auxilie instituições de ensino superior de engenharia mecânica na tomada de decisão quanto à seleção de simulador de análise de vibrações em máquinas rotativas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Elaborar um modelo teórico, estruturado por múltiplos critérios, com foco na seleção de equipamento de simulação de análise de vibrações mecânicas;
- Validar os elementos do modelo proposto, através da avaliação dos critérios por um grupo de especialistas;
- Priorizar os critérios do modelo validado, por meio de um método multicritério de suporte à tomada de decisão;
- Aplicar o modelo em um exemplo para facilitar o entendimento de sua utilização.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha da equipamentos para uma organização pode envolver não somente

fatores econômicos, como também técnicos, ambientais e humanos. Muitas vezes a situação pode afetar diferentes partes interessadas e apresentar uma variedade de cenários e, em alguns casos, ser necessário avaliar alguns dos fatores de forma qualitativa (CARNERO, 2016).

O Apoio à Decisão Multicritério (AMD) pode considerar todos esses aspectos na decisão de escolha do equipamento e, além disso, garantir maior aceitação dos resultados por parte dos gestores (CARNERO, 2016).

Uma abordagem de decisão multicritério afeta positivamente o processo decisório nas organizações, podendo avaliar qualitativamente e quantitativamente as diversas alternativas, melhorar a decisão de consensualidade dos tomadores de decisão e levar em consideração os diversos critérios de decisão (LINS, 2009).

O Apoio à Decisão Multicritério (AMD) contribui para solucionar a seleção de alternativas, pois auxilia na estruturação do problema e possibilita incorporar na tomada de decisão aspectos de naturezas distintas, como econômicos, técnicos e pessoais (CAMPOS, 2011).

Quando o problema exige uma maior atenção, por envolver, por exemplo, custos ou situações com diversos critérios e envolvidos, a decisão não se torna simples, pelo contrário. Essas características podem defender mais ainda a necessidade de apresentar uma proposta de solução baseada em um método multicritério de auxílio à decisão (LINS, 2009).

Estes métodos são bastante relevantes para casos de decisões públicas, pois utilizam as informações de forma eficiente, promovendo o processo mais transparente e facilitando o questionamento. Isto é possível porque estes métodos consistem em modelos matemáticos estruturados e que integram valores e preferências (CAMPOS, 2011).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

As vibrações mecânicas podem ser entendidas como oscilações de um sistema mecânico ou estrutural em relação a uma posição de equilíbrio (KELLY, 2012). A utilização do conhecimento de vibração em projetos e manutenção de máquinas se tornou crucial hoje em dia (PEREIRA, 2013). Em áreas como mecânica e civil o conhecimento e estudo das vibrações mecânicas é de fundamental importância para formação de engenheiros (SAVI, 2017).

As vibrações têm origem quando um elemento de inércia é deslocado de sua posição de equilíbrio por causa de uma energia transmitida ao sistema por meio de fonte externa (CRISPIM, 2017). Os parâmetros de vibração relacionados com máquinas rotativas são geralmente estabelecidos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração (HOLANDA, 2016).

A frequência é também outra variável importante e auxilia a examinar a origem do que está provocando a vibração. Entende-se por frequência de um sistema em vibração, a quantidade de ciclos efetuados em um intervalo de tempo. Já o período de vibração é tempo necessário para se realizar uma vibração completa, isso significa que é o tempo gasto em apenas um ciclo (RAO, 2008).

Quando bombas, turbo máquinas e outros equipamentos industriais vibram em excesso, pode ocorrer da estrutura circundante vibrar demasiadamente, de maneira a provocar operação ineficiente do sistema e desconforto aos seres humanos pelo ruído gerado (CHIAD et al, 2020).

Uma forma de classificar as vibrações é quanto ao número de graus de liberdade necessários para modelagem. Os sistemas que apresentam quantidade finita de graus de liberdade podem ser chamados de discretos. Por sua vez, os sistemas com infinitos graus de liberdade são denominados sistemas contínuos (COLONA, 2018).

Quando um sistema vibra sem presença de nenhuma fonte de energia externa, estas vibrações são classificadas como livres. No entanto, se as vibrações são provocadas por força ou movimento externo, estas são chamadas de vibrações forçadas. Além disso, se a entrada externa for periódica, pode-se definir essas vibrações como harmônicas. Caso contrário, as vibrações são definidas como

transitórias (KELLY, 2012).

Quando se trata de vibrações em que não há dissipação de energia, elas são chamadas de não amortecidas e se uma fonte de dissipação de energia estiver presente, as vibrações são chamadas de amortecidas e são caracterizadas posteriormente pela maneira de amortecimento. Por exemplo, se tem viscosidade no amortecimento, estas são chamadas de amortecimento viscoso (MARTINS, 2017).

2.2 MANUTENÇÃO

A manutenção é o conjunto de todas as ações técnicas e administrativas realizadas para manter ou recolocar um item em estado na qual possa executar uma função requerida (NBR 5462, 1994).

A manutenção pode ser classificada em três tipos (LIMA, 2014):

- Preventiva: É realizada através de intervenções programadas, fundamentada em dados estatísticos ou mesmo em informações do próprio fabricante.
- Corretiva: Nesse tipo de manutenção, a intervenção ocorre somente após a avaria do equipamento, possibilitando que o mesmo volte a funcionar.
- Preditiva: Segundo a NBR 5462 (1994) a manutenção preditiva possibilita garantir qualidade do serviço baseando-se na aplicação de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

2.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

A análise de vibração foi uma das primeiras técnicas de manutenção que surgiu. Desde a origem da primeira máquina, o ser humano observou que a vibração fornecia sinais indicativos da situação do sistema. A partir da análise dos sinais vibratórios é possível tomar decisões de intervir ou não no funcionamento da máquina (LAGO, 2007).

Os fundamentos de análise das vibrações baseiam-se na ideia de que os sistemas mecânicos dão sinais vibratórios quando excitados por esforços dinâmicos. É possível, a partir da coleta de sinais de vibração em determinados pontos do

equipamento, identificar o aparecimento de novos esforços ou o aumento repentino da resposta em frequência, fornecendo indicativos do surgimento de defeitos ou degradação do dispositivo (LAGO, 2007).

A análise de vibração é uma técnica da manutenção preditiva e apresenta diversos benefícios ou alvos principais, dos quais podem-se destacar (MARÇAL; SANTOS, 2013):

- Aumentar a disponibilidade do equipamento;
- Redução de custos;
- Evitar desgastes prematuros de componentes;
- Evitar intervenções desnecessárias;
- Evitar riscos de acidentes.

2.4 VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ROTATIVAS

As diversas peças que compõem as máquinas em rotação sofrem excitação e podem vibrar de tal maneira que transmitam essa vibração aos demais elementos as quais estejam acopladas, provocando então um complexo de frequências que caracterizam o sistema. Qualquer máquina rotativa apresenta o que se pode chamar de assinatura vibracional, que é a vibração característica produzida quando a mesma opera em condições normais e não emitem sinais de defeitos (SILVA, 2018).

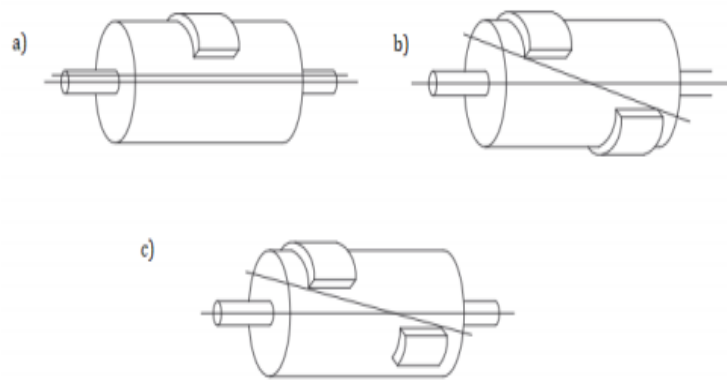
Uma parte das vibrações nestas máquinas pode ocorrer devido aos defeitos mecânicos ou excitações perturbadoras que interferem no funcionamento adequado do equipamento. Se houver qualquer aumento no nível de vibração, isso pode representar o agravamento de um defeito, seja de desbalanceamento, um rolamento em situação de falha ou uma folga mecânica acima da admissível (MENNA, 2007).

2.4.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento é um tipo de defeito comum em sistemas em rotação. É uma fonte de vibração diretamente associada ao desequilíbrio de massas, como assimetrias, deformações, imperfeições ou erros de montagem. O surgimento desse efeito vem a desarranjar a distribuição perfeita de massa em torno do eixo de giro, de

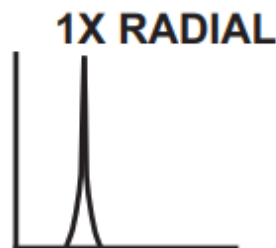
maneira a provocar o desbalanceamento (LIMA, 2014). A Fig. 1 representa esse tipo de defeito e a Fig. 2 representa a assinatura de vibração característica de um desbalanceamento em que a vibração é grande nas direções radiais em 1x rotação (LOUREIRO, 2009).

Figura 1 - Desbalanceamento (a) Estático (b) Conjugado (c) Dinâmico.



Fonte: KUHN (2019).

Figura 2 - Assinatura típica de desbalanceamento.



Fonte: LOUREIRO (2009).

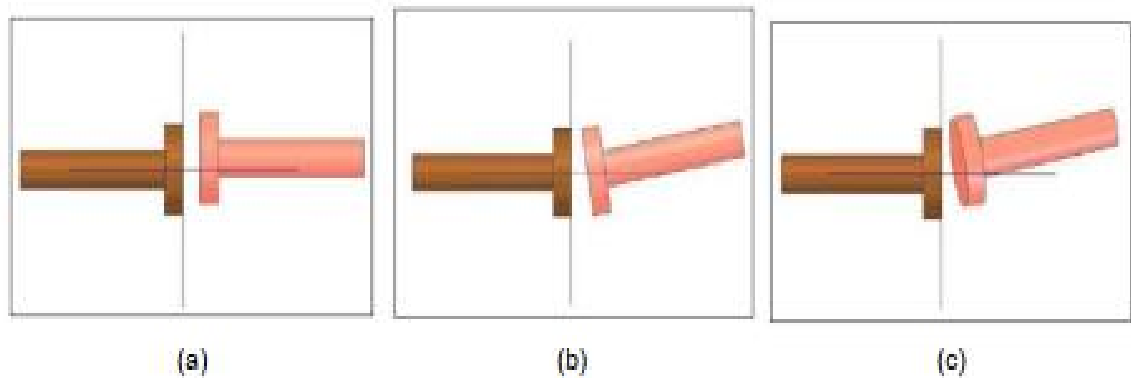
2.4.2 Desalinhamento

O desalinhamento de eixos é um efeito que ocorre quando os eixos de rotação das máquinas não estão concêntricos. Isso afeta o modo de funcionamento do mesmo podendo provocar prejuízo ao sistema. Alguns dos fatores que provocam esse defeito são montagens inadequadas, alinhamentos imprecisos, desgaste de mancais de rolamento e expansões térmicas ignoradas (LIMA, 2014).

A Fig. 3 representa esse tipo de defeito e a Fig. 4 mostra assinaturas de vibração característica em que um componente alto de 2x rotação na direção radial

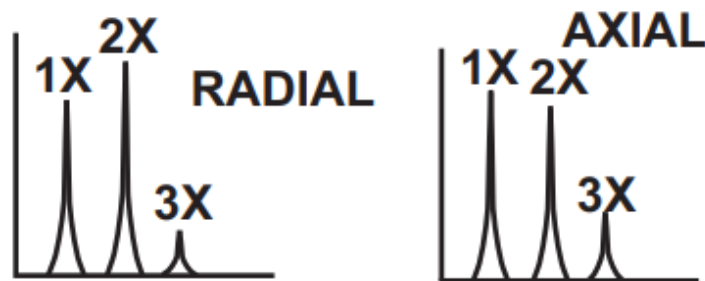
caracteriza desalinhamento paralelo e um componente alto de 1x rotação na direção axial caracteriza desalinhamento angular (LOUREIRO, 2009).

Figura 3 - Desalinhamento (a) paralelo, (b) angular, e (c) misto



Fonte: GERALDI (2015).

Figura 4 - Assinatura de vibração de desalinhamento: paralelo à esquerda e angular a direita.



Fonte: LOUREIRO (2009).

2.4.3 Falha de rolamento.

As máquinas que apresentam eixos de rotação para transmitir movimento podem apresentar defeitos nos rolamentos. Tal situação surge quando determinados componentes estão em condições de falha ou quando estão sob efeitos de carregamento excessivo (LIMA, 2014). A Fig. 5 mostra um exemplo de rolamento e os elementos que o compõem.

Figura 5 - Rolamento de esferas.

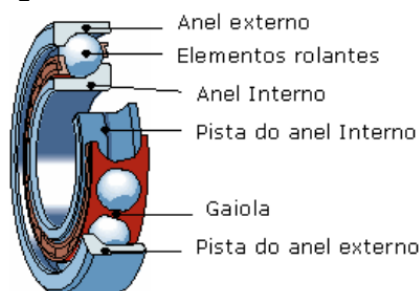


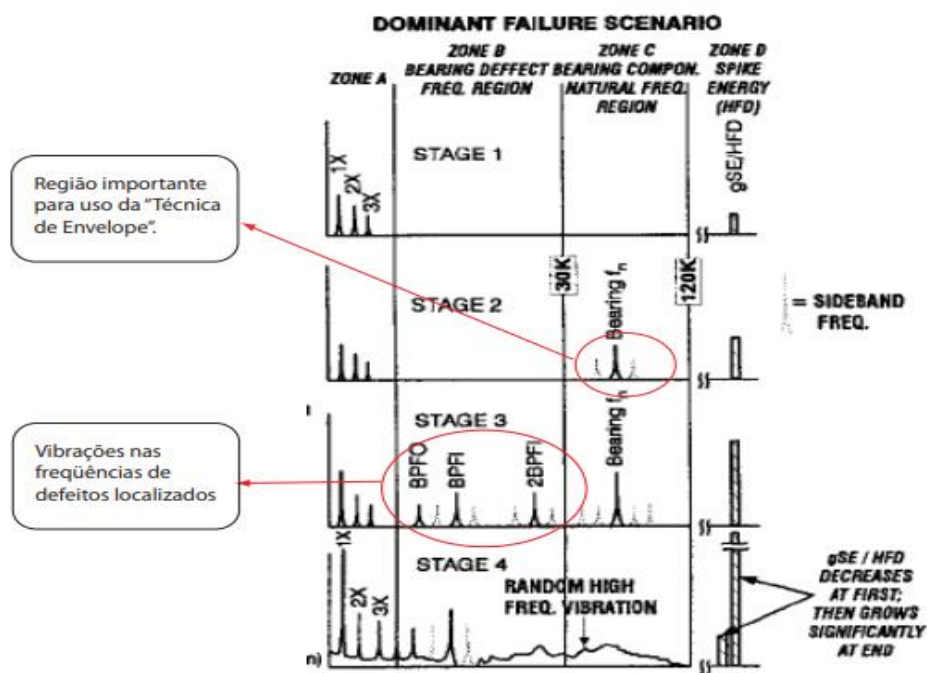
Figura: LIMA (2014).

Os elementos básicos de um rolamento, pista interna e a externa, os rolos ou esferas e a gaiola, apresentam comportamentos dinâmicos diversos, que geram as 4 diferentes frequências básicas de defeitos em rolamentos (JUNIOR, 2018).

- a) ball pass inner race (BPFI): frequência de passagem da pista interna;
- b) ball pass outer race (BPFO): frequência de passagem da pista externa;
- c) fundamental train (FTF): frequência fundamental (frequência de gaiola);
- d) ball spin (BSF): frequência de passagem do elemento rolante.

A Fig. 6 mostra as assinaturas de vibração características de defeitos em rolamentos.

Figura 6 - Assinaturas de vibração de defeitos em rolamentos.

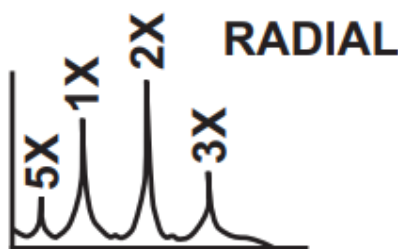


Fonte: LOUREIRO (2009).

2.4.4 Folgas mecânicas

As folgas mecânicas também geram vibrações no sistema e podem ser provocadas por diversos fatores dentre os quais podem ser parafusos frouxos, trinca na base de fixação da estrutura ou dos mancais ou até mesmo folgas excessivas nos mancais. As vibrações causadas por folgas no sistema, geralmente ocorrem na frequência de rotação da máquina, seguida de várias harmônicas, mais evidente na direção radial (MILANI, 2012). A Fig. 7 mostra um exemplo típico de assinatura de vibração de folga de mecânica.

Figura 7 - Assinatura de vibração de folga de base.



Fonte: LOUREIRO (2009).

2.4.5 Defeitos elétricos

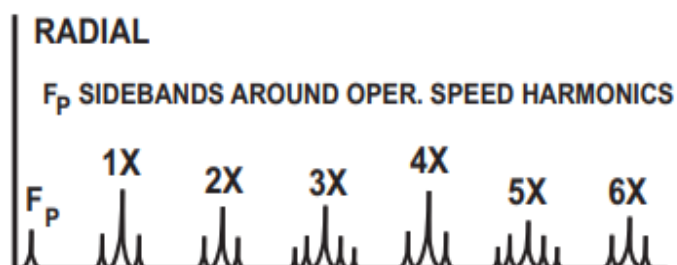
A vibração que é provocada por problemas elétricos geralmente ocorre devido forças magnéticas desequilibradas que atuam sobre o rotor ou estator. Estas forças desequilibradas podem ocorrer devido vários fatores, que podem ser (SILVA, 2012):

- Mancais do eixo do rotor excêntricos
- Rotor não centrado dentro do estator
- Furo do estator elíptico
- Barras da gaiola quebradas ou trincadas
- ventoinhas quebradas ou defeituosas

A Fig. 8 mostra um exemplo típico de assinatura de defeito elétrico. A frequência de vibração associada a problemas do rotor é geralmente de 1x rotação e na maioria das vezes ladeadas por bandas laterais com espaçamento igual a 2x frequência de

escorregamento do rotor. Os problemas relacionados com o estator produzem vibração na frequência de 2x frequência da rede (SPAMER, 2009).

Figura 8 - Assinatura de vibração de problema elétrico.



Fonte: LOUREIRO (2009).

2.5 SIMULADOR DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Um simulador de análise de vibração em máquinas rotativas é um equipamento em escala de laboratório que ajuda a compreender as assinaturas de vibrações das falhas comuns de maquinário. Compreende basicamente um conjunto de rotor de eixo acionado por motor AC e é importante para o estudo de disciplinas como vibrações e manutenção mecânica (GARDIM, 2018).

Este equipamento abrange instalações que podem reproduzir diversos defeitos como: desbalanceamento, folga mecânica, engrenagens danificadas e rolamentos defeituosos (NAYAK; PATHAK; KUMAR, 2015). A Fig. 9 mostra um exemplo de simulador de análise de vibração.

Figura 9 - Simulador de análise de vibrações em máquinas.



Fonte: PEREIRA (2013).

A medição de vibração é o primeiro nível da técnica de monitoramento de vibração utilizado em equipamentos desse tipo. Os instrumentos geralmente usados para estes fins são os acelerômetros. Estes dispositivos são transdutores utilizados para medir a aceleração dinâmica de partes físicas (AB GHANI et.al, 2016).

Os tacômetros, que também são instrumentos de medição, são utilizados para de medir a velocidade de rotação de eixos, que é geralmente é expressa na unidade rotações por minuto (RPM) (FRONER, 2015).

Já os analisadores portáteis, que também podem acompanhar essas bancadas, são dispositivos de operação simplificada que contém funções pré-programadas de armazenamento de rotas (que são caminhos, sequências de medição) e coleta rápida e análise de dados (CAVALCANTE; JESUS, 2011). A Fig. 10 mostra esses tipos de instrumentos.

Figura 10 - (a) Acelerômetro (b) Analisador portátil (c) Tacômetro.



Fonte: JUNIOR et.al (2018).

2.6 APOIO À DECISÃO

O ser humano toma decisões diariamente levando em conta seu conhecimento prévio e experiência. A necessidade de se avaliar bem um ato de decisão traz consequências que irão refletir no sucesso das suas escolhas (RIVAS, 2016).

Os problemas de tomada de decisão eram tratados até metade do século XX, utilizando basicamente matemática em condições tidas como aleatórias e com elevadas limitações e riscos associados. A partir da década de 50 a solução de problemas empregando-se a Pesquisa Operacional ganhou destaque, porém a eficiência dos seus modelos passou ser questionada por volta da década de 70 (WERNKE; BORNIA, 2001).

Passou-se então a refletir que não mais se deveria estudar os problemas buscando soluções ótimas, e sim procurar resultados de compromisso que possibilitem transcender a confusão que envolve as situações problemáticas no contexto empresarial. É nesse cenário que surgem as Metodologias de Apoio Multicritério à Decisão (MOREIRA, 2009).

Métodos de análise multicritério são utilizados quando é necessário selecionar, ordenar, classificar ou descrever alternativas em processos de decisão (DE SOUZA; DE BARROS; GOMES, 2016). Basicamente, constituem-se de um conjunto de técnicas que permitem auxiliar as pessoas ou organizações a estabelecerem suas decisões (BASTOS et al, 2001).

O processo de decisão baseia-se na análise de um conjunto de alternativas, visando atender aos requisitos e levando em consideração as variáveis qualitativas e quantitativas. A complexidade de tomar a decisão está neste ponto, na qual geralmente se deve atender a múltiplos critérios e restrições, e que essa decisão deverá implicar necessariamente em renúncias (RAMOS, 2010).

É através de métodos matemáticos que a abordagem multicritério dispõe-se a suportar o processo de decisão, incluindo em seu plano a importância relativa de cada variável (RAMOS, 2010). Estes métodos possibilitam utilizar grandes quantidades de dados, incertezas, relações ou aspectos que estão envolvidos nos problemas reais (CARNERO, 2016).

A metodologia é capaz de considerar diversos critérios, que podem ser ponderados para representar a hierarquia dos objetivos, além de, geralmente, envolver participação generalizada. Isso possibilita melhorar a responsabilidade e transparência das decisões alcançadas e proporciona maior propriedade sobre o processo de tomada de decisão e seus resultados (SOARES, 2018).

Alguns dos principais componentes envolvidos pelas decisões multicritério são (GOMES, 2006):

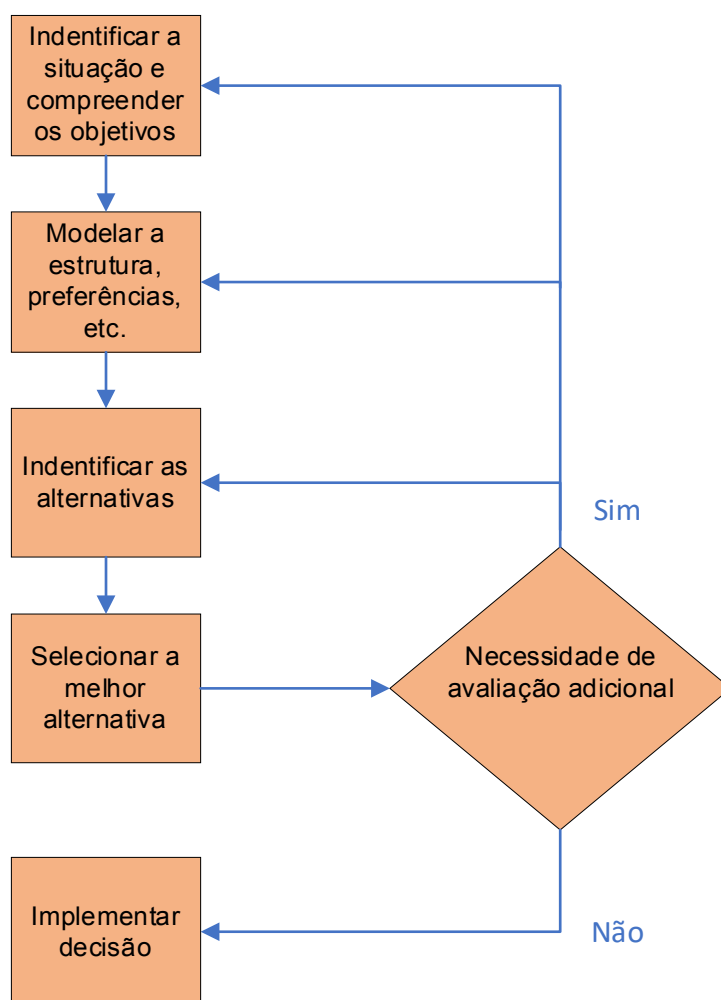
1. Objetivo;
2. Decisor(es);
3. Conjunto de critérios de decisão;
4. Conjunto de alternativas;
5. Consequência das decisões.

O objetivo caracteriza o que se deseja atingir com as ações (SANTOS; PONTE, 1998). Alternativas são as opções disponíveis de serem adotadas para solucionar o problema (LUCENA; DE MORI, 2018). Decisor(es) representam as pessoas que estabelecem preferências na tomada de decisão (BERTONCINI et al, 2013).

Critérios são os fatores que influem no problema de decisão com diferentes níveis de importância (LUCENA; DE MORI, 2018). Estes são utilizados como parâmetros de avaliação do conjunto de alternativas (CAMPOS, 2011). As consequências das decisões são os resultados de uma estratégia (BERTONCINI et al, 2013).

Um processo de tomada de decisão pode ser representado basicamente como mostrado na Fig. 11.

Figura 11 - Fluxograma comum de um processo de tomada de decisão.



Fonte: Adaptado de RAMOS (2010).

No contexto do apoio à decisão, o resultado a que se pretende chegar pode ser identificado de acordo com quatro tipos de problemáticas de referência, descritas a seguir (MOREIRA, 2009):

1. **Problemática P. α** (Problemática de seleção) – consiste em se encontrar a melhor alternativa em um conjunto de alternativas ou um subconjunto correspondente às melhores alternativas.
2. **Problemática P. β** (Problemática de Classificação) – consiste na alocação de cada alternativa em uma categoria ou classe com base em normas aplicadas as alternativas.
3. **Problemática P. γ** (Problemática de Ordenação) – associa a cada alternativa uma posição em um conjunto ou subconjunto de alternativas.
4. **Problemática P. δ** (Problemática de Descrição) – consiste em descrever em uma linguagem apropriada as alternativas e suas consequências.

2.6.1 Método AHP

Um dos principais e um dos primeiros métodos de apoio à decisão multicritério é o *Analytic Hierarchy Process (AHP)* (DA SILVA; NASCIMENTO; BELDERRAIN, 2007). O AHP é uma ferramenta que visa apoiar a tomada de decisão quando há múltiplos critérios e alternativas à disposição e já foi aplicado em diversos ambientes como em decisões militares, decisões de alta gerência em empresas, estudos de economia e até mesmo em conflitos entre nações (GOMES, 2007).

Esse método foi apresentado no artigo “A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures” (Método da Escala para Prioridades em Estruturas Hierárquicas) pelo matemático Thomas L. Saaty, em 1977, no qual, posteriormente foi nomeado de Método da Análise Hierárquica (DA COSTA, 2014).

Uma das principais características do AHP é a possibilidade de confrontar na análise aspectos quantitativos e qualitativos. Os aspectos quantitativos, tangíveis, são mais facilmente mensuráveis onde se pode considerar como exemplo fatores como redução de custos, capacidade de aumento da produção, dentre outros (DA COSTA, 2014).

Os elementos intangíveis ou qualitativos podem abranger aspectos de caráter psicológico, da percepção de cada indivíduo, como status, reputação, preferências

peçoais, dentre outros. O AHP permite confrontar estes aspectos, de maneira pautada em julgamentos e com emprego de uma escala fundamental (DA COSTA, 2014).

O AHP tem simplicidade no processo de modelagem da decisão e possibilita ao tomador de decisão maior compreensão do processo e participação na estruturação da situação (SILVA, 2016).

A utilização desse método pode ser defendida com base em alguns pontos levantados por Goodwin (2004).

- a) Capacidade de estruturação formal do problema;
- b) Simplicidade das comparações pareadas;
- c) Redundância de julgamentos permite que a consistência seja checada;
- d) Versatilidade: pode ser usado com outras metodologias e para uma ampla gama de problemas;
- e) Acrescentando-se a disponibilidade de ferramentas computacionais no mercado.

Saaty propôs uma escala fundamental para comparação pareada dos critérios. Nesta escala, mostrada no Quadro 1, os valores de comparação vão de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significa a importância extrema de um critério em relação ao outro, e os estágios intermediários de importância estão entre os níveis 1 e 9 (ROSSONI, 2011).

Quadro 1 - Escala fundamental de Saaty.

1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande de uma sobre a outra	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.

2,4, 6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
---------------------	------------------------	--

Fonte: ELLWANGER, SANTOS e LEVANDOWSKI (2013).

2.6.2 Método Fuzzy Delphi

Desenvolvido por Ishikawa et al. (1993), esse método é uma união da teoria dos conjuntos *fuzzy* com o método *Delphi* tradicional (LIMA; DOS SANTOS, 2020a). No método *Delphi* tradicional, o consenso é obtido através de até quatro rodadas de consultas, em que é possível obter informações, como medianas, médias e desvios das respostas dos especialistas (CERVI, 2017).

No entanto, o tradicional método *Delphi* sofre de baixa convergência quanto às opiniões dos especialistas e alto custo de execução. Para contornar esses problemas, a combinação desse método com a lógica *fuzzy* foi proposta (STEFANO et.al, 2014). Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, a função opinião dos especialistas (O_i) concede um grau de associação a cada objeto que varia entre zero e um. As funções mais comuns incluem a associação de triângulos, associação trapezoidal e associação de Gauss (CHANG; CHENG, 2019).

O método *Fuzzy Delphi* é útil para validar os critérios propostos para o modelo de avaliação (LIMA; DOS SANTOS, 2019). Esta técnica não requer várias rodadas de investigações dos especialistas, sendo que em apenas uma rodada é possível obter as informações necessárias e a lógica *fuzzy* já é própria para lidar com a imprecisão dos julgamentos dos avaliadores (IEPSEN, 2019).

O método apresenta a vantagem da simplicidade e as informações úteis não são perdidas, possibilitando que todas as opiniões de especialistas em relação à um determinado assunto seja considerado em um contexto global (STEFANO, 2016).

2.6.3 Método TOPSIS

Esta técnica foi originalmente desenvolvida por Hwang e Yoon em 1981, e aperfeiçoada por Yoon em 1987 e Hwang, Lai e Liu, em 1993. É uma técnica utilizada para avaliar o desempenho de alternativas por meio da similaridade com a solução ideal. Dois tipos de classificações para os critérios são definidos nesse método: “benefício” e “custo”. O critério benefício é aquele em que quanto maior seu valor,

melhor, enquanto que para o critério custo, quanto menor seu valor, melhor (KROHLING; SOUZA, 2011).

A alternativa com melhor desempenho é aquela que se encontra mais próxima da solução ideal positiva e a mais distante da solução ideal negativa. A solução ideal positiva é aquela que maximiza os critérios de benefício e minimiza os critérios de custo e a solução ideal negativa maximiza os critérios de custo e minimiza os critérios de benefício (DO CARMO, 2017).

O método *TOPSIS* é um bastante utilizado para ordenar as preferências e apresenta-se muito útil para aplicações que envolvem um grande número de alternativas e critérios (ADONIS; ROCHA, 2019).

3 METODOLOGIA

As etapas de elaboração deste trabalho são mostradas no Quadro 2.

Quadro 2 - Etapas da pesquisa.

Etapas da pesquisa	Método/Técnica
1ª Etapa: Elaboração do modelo teórico	Pesquisa bibliográfica
2ª Etapa: Validação dos elementos do modelo	Método <i>Fuzzy Delphi</i>
3ª Etapa: Priorização dos critérios do modelo validado	Método AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
4ª Etapa: Aplicação	Estudo de Caso/Método TOPSIS

Fonte: Autoria própria (2021).

3.1 PRIMEIRA ETAPA: ELABORAÇÃO DO MODELO TEÓRICO

Na 1ª Etapa, buscou-se definir os critérios que poderiam ser relevantes para seleção do simulador de análise de vibrações. Revisou-se a literatura em bancos de dados científicos (*Science Direct*, *Scielo*, *Google acadêmico*) na busca por trabalhos que pudessem auxiliar nesse desenvolvimento com assuntos voltados para seleção de equipamentos, análise de vibrações, simulador de análise de vibração em máquinas e apoio à decisão multicritério.

Procurou-se também por catálogos de fabricantes de simuladores de análise de vibração já que estes podem fornecer informações técnicas a respeito desse tipo de equipamento que poderiam ser levadas em consideração como critérios de seleção.

3.2 SEGUNDA ETAPA: VALIDAÇÃO DOS ELEMENTOS DO MODELO

Na 2ª Etapa validou-se os critérios propostos anteriormente, na qual aplicou-se o método *Fuzzy Delphi* com os dados coletados da opinião de 10 especialistas. O questionário foi enviado para pessoas com conhecimentos em vibrações mecânicas ou manutenção mecânica (engenheiros mecânicos, técnicos de mecânica e eletromecânica).

A aplicação do método *Fuzzy Delphi* foi dividida de acordo com os seguintes

passos (CHANG; WANG, 2006; KUO; CHEN, 2008; HSU; LEE; KRENG, 2010; WANG; DURUGBO, 2013):

Passo 1: Organizar um painel de especialistas e administrar um questionário para possibilitar que forneçam suas opiniões sobre a importância de cada critério em um conjunto S de critérios em um intervalo de 1 a 5 ou 1 a 7. Uma pontuação é então denominada como R_i , $i \in S$, onde o índice de i critérios é avaliado por k especialista.

Passo 2: Organizar as opiniões dos avaliadores com base no questionário e obter os números fuzzy triangular (NFTS) para o índice $O_i = (L_i, M_i, U_i)$ para cada critério i . L_i indica o valor mínimo da avaliação, ou seja:

$$L_i = \text{Min} (L_{ik}) \quad (3.1)$$

M_i é a média geométrica da avaliação para o critério i , que pode ser obtida por meio da Eq. 3.2.

$$M_i = (R_{i1} \times R_{i2} \times \dots \times R_{ik})^{1/k} \quad (3.2)$$

U_i representa o valor máximo da avaliação e é calculado pela Eq. 3.3.

$$U_i = \text{Máx} (L_{ik}) \quad (3.3)$$

Passo 3: Uma vez que os NFTS são determinados para todos os critérios, a abordagem do Centro da Área (CA) (HSIEH; LU; TZENG, 2004) é usada para defuzzificar os NFTs de cada critério de avaliação, definido pelo valor de G_i , isto é:

$$G_i = \frac{(U_i - L_i) + (M_i - L_i)}{3} + L_i \quad (3.4)$$

Passo 4: Filtrar os critérios de avaliação, utilizando-se um limite α . Dessa maneira, se $G_i \geq \alpha$, então o “ i ” critério é selecionado, caso contrário, se $G_i \leq \alpha$, o critério de avaliação é eliminado.

O modelo de questionário utilizado na avaliação é mostrado no APÊNDICE A.

3.3 TERCEIRA ETAPA: PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO MODELO VALIDADO

Para priorização dos critérios do modelo validado o método AHP foi utilizado, com base também na opinião de 10 avaliadores. A aplicação do método foi dividida de acordo com os seguintes passos:

Passo 1: Comparação par a par dos critérios pelos especialistas com base na escala fundamental de Saaty. Desse modo, montou-se uma matriz de julgamento no formato da Tab.1 (LUCENA; DE MORI, 2018).

Tabela 1 - Matriz de Julgamento (Método AHP).

Crítérios	Crit. 1	...	Crit . p	...	Crit. m
Crit. 1	1	...	a1p		a1m
...	...	...	...		...
Crit. p	ap1	...	1		Apm
...	...	...	...		...
Crit. m	am1	...	amp		1

Fonte: Adaptado de LUCENA e DE MORI (2018).

É importante ressaltar que se deve levar em consideração o princípio da reciprocidade no preenchimento dessa matriz. Dessa maneira, se o critério 1 é considerado três vezes mais importante que o critério 4, o critério 4 deverá ser três vezes menos importante que o critério 1 (atribuindo-se o nível de intensidade de '1/3'). Isso faz com que no preenchimento da matriz da Tab.1, os termos a_{ij} e a_{ji} recebem valores que são sempre o inverso um do outro (LUCENA; DE MORI, 2018).

Passo 2: Obtenção do vetor de pesos relacionado a matriz de julgamento. Inicialmente, calcula-se o autovetor da matriz de julgamento, que pode ser obtido através da média geométrica de cada linha da matriz. Posteriormente, normaliza-se este autovetor, dividindo o valor de cada componente pelo valor da soma de todos os elementos do vetor, obtendo-se então o vetor de pesos dos critérios associado à matriz de julgamento (LUCENA; DE MORI, 2018).

Passo 3: Verificar a consistência dos julgamentos proferidos pelos avaliadores. Primeiro, multiplica-se a matriz de julgamento pelo vetor de pesos e soma-se todos os valores do vetor resultante para obter o autovalor máximo $\lambda_{máx}$. A partir disso, determina-se o índice de consistência do julgamento (IC), por meio da Eq. 3.5 (LUCENA; DE MORI, 2018).

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (3.5)$$

Em que:

- $\lambda_{m\acute{a}x}$ é o autovalor máximo;
- IC é o índice de consistência do julgamento realizado;
- n é a ordem da Matriz de Julgamento.

Então, obtém-se a razão de consistência do julgamento RC:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3.6)$$

Em que:

- IR é o índice randômico em função da ordem da matriz, Tab. 2.

A razão (RC) manifesta o percentual de vezes que a opinião fornecida pelo avaliador foi aleatória (LUCENA; DE MORI, 2018). O nível aceitável de RC é abaixo de 10%, considerado geralmente valor máximo de inconsistência (DE SOUZA; DE BARROS; GOMES, 2016).

Tabela 2 - Índices randômicos em função da ordem da matriz.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,31	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Fonte: SAATY (1990).

Passo 4: Agregação dos julgamentos individuais dos especialistas. Os julgamentos de todos os avaliadores são agrupados para consolidação da análise e, para isso, optou-se pela técnica AIJ (Aggregation individual judgments). Nessa técnica, a agregação é feita por meio do cálculo da média geométrica de cada posição das matrizes de julgamento, obtendo-se uma nova matriz global (LIMA, DOS SANTOS, 2020b).

3.4 QUARTA ETAPA: APLICAÇÃO

Para exemplificar e facilitar o entendimento de como utilizar o modelo de auxílio à decisão, um exemplo de aplicação é mostrado. O desempenho das alternativas de bancadas de análise de vibração foi avaliado com base no método TOPSIS, seguindo os seguintes passos (HWANG; YOON, 1981):

a) Estruturar a matriz de decisão D , Eq. 3.7 e o vetor de pesos $\tilde{W}$, composto pelos pesos w_j de cada critério, Eq. 3.8. d_{ij} representa a pontuação da alternativa (A_i) no critério (C_j), em que $i = 1, 2, \dots, n$ indica o número das alternativas e $j = 1, 2, \dots, m$ o número de critérios de decisão.

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \dots \\ A_i \\ \dots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & d_{1j} & d_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{in} & d_{n2} & d_{1j} & d_{nj} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.7)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (3.8)$$

b) Normalizar e ponderar a matriz de decisão utilizando a Eq. 3.9, onde d_{ij} são os elementos da matriz de decisão.

$$p_{ij} = \frac{w_j d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad (3.9)$$

c) Obter as soluções ideais positiva (A^+) e negativa (A^-) de acordo com a Eq. 3.10 e a Eq. 3.11, respectivamente. Nessas equações, p_j^+ representa a melhor pontuação alcançada pelas alternativas no critério j e p_j^- representa a pior pontuação das alternativas neste critério.

$$A^+ = \{p_1^+, \dots, p_j^+, \dots, p_m^+\} \quad (3.10)$$

$$A^- = \{p_1^-, \dots, p_j^-, \dots, p_m^-\} \quad (3.11)$$

d) Calcular a distância (Di^+) entre os elementos da matriz de decisão normalizada e ponderada e a solução ideal positiva por meio da Eq. 3.12 e calcular a distância (Di^-) entre os elementos dessa matriz e a solução ideal negativa por meio da Eq. 3.13.

$$Di^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij} - p_j^+)^2} \text{ com } i = 1, \dots, m \quad (3.12)$$

$$Di^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij} - p_j^-)^2} \text{ com } i = 1, \dots, m \quad (3.13)$$

e) Por último, calcula-se o coeficiente de aproximação ξ_i de cada alternativa por meio da Eq. 3.14. Quanto mais próximo de 1 for o valor de ξ_i , melhor é o desempenho da alternativa.

$$\xi_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (3.14)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELO TEÓRICO

Os critérios de decisão propostos para compor este trabalho são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Critérios de decisão propostos para seleção do equipamento.

Critérios propostos	Representação
Rotação máxima	C1
Consumo elétrico	C2
Massa	C3
Preço do equipamento	C4
Garantia do fornecedor	C5
Defeitos simuláveis	C6
Instrumentos inclusos	C7
Suporte técnico	C8

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.1 Rotação máxima

A rotação dos sistemas e a configuração de seus componentes como eixos, rolamentos, discos, irão induzir aos problemas comuns que se relacionam com a vibração. Em diferentes rotações é possível observar diferentes condições de vibrações (AB GHANI et.al, 2016). A rotação máxima de um simulador análise de vibração está associado valor máximo de rotação que o acionador permite para realizar as simulações.

4.1.2 Consumo elétrico

A necessidade em diminuir o consumo de energia tornou-se algo relevante nos últimos anos, principalmente devido à crise que ocorreu no setor elétrico ocorrida no ano de 2001 (NETA et al., 2017). A economia de energia é um assunto relevante para

sociedade, tanto pelos aspectos econômicos, quanto pelos aspectos ambientais e necessidade de eficiência dos sistemas ou equipamentos elétricos promove a melhoria das transformações e do uso da energia elétrica (SILVA, 2015).

4.1.3 Massa

A massa é uma grandeza que representa a quantidade de matéria presente em um corpo (CASTELLANI, 2001). Em equipamentos, a preocupação com a massa pode estar relacionada com os custos de produção assim como em impactos ambientais. Uma quantidade menor de matéria prima faz com que haja menor necessidade de minério para a construção dos equipamentos (CARPENEDO, 2014).

4.1.4 Preço

Corresponde ao valor monetário de um item a ser fornecido (RODRIGUEZ; KANG; DE ALMEIDA, 2017). É resultado da interação do vendedor, comprador, mercado e da economia e, além disso, a concorrência é uma interferência forte na decisão de preços, ainda mais se a decisão de compra for orientada para o preço e existirem diversas alternativas disponíveis (RODRIGUEZ, 2017).

4.1.5 Garantia

É o período que o fornecedor está responsável pelo conserto e/ou devolução do item com defeito (CABRAL, 2020). Este será o responsável pelas eventuais falhas técnicas sejam elas em consequência de defeitos de fabricação ou de funcionamento (RODRIGUEZ; KANG; DE ALMEIDA, 2017).

4.1.6 Defeitos simuláveis

Embora a análise de um único tipo de falha de maquinário seja benéfica, estudar os diversos tipos de defeitos é fundamental a fim de compreender o mundo real (LIMA, 2014). Para representar a quantidade de tipos de defeitos em análise de vibração que o equipamento possibilita simular, o critério defeitos simuláveis foi proposto.

4.1.7 Instrumentos inclusos

A principais tarefas na prática de análise de vibrações são (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004):

- Coletar a vibração de máquina;
- Conversão do sinal de vibração para um sinal elétrico;
- Transformação do sinal elétrico em seus componentes;
- Fornecimento de informações e documentação relacionadas aos dados de vibração.

Para estes fins utilizam-se instrumentos eletrônicos que coletam, armazenam e analisam dados de maneira a auxiliar na análise de vibração e registro das informações (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). Diversos podem ser os tipos de dispositivos úteis para estes fins, dos quais pode-se citar: acelerômetros, tacômetro e analisador de frequência (AB GHANI et.al, 2016).

Algumas bancadas podem se diferenciar no fato de que algumas delas podem vir ou não com alguns desses tipos de dispositivos, para isto, o critério representa a quantidade de tipos de instrumentos inclusos.

4.1.8 Suporte técnico

O suporte técnico abrange os serviços de assistência técnica e de apoio ao cliente prestados pelo fornecedor ou fabricante do equipamento (CARNERO, 2016).

4.2 VALIDAÇÃO DOS ELEMENTOS DO MODELO

O grau de importância de cada critério obtido com base nos avaliadores é mostrado na Tab. 3 e os valores mínimo (Li), máximo (Ui), média geométrica (Mi) e de desempenho (Gi), calculados através do método *Fuzzy Delphi*, são mostrados na Tab.4.

Tabela 3 - Grau de importância de cada critério em valores numéricos com base na opinião de cada especialista, método Fuzzy-Delphi.

Critérios	Grau de importância
-----------	---------------------

	Avaliador									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rotação máxima	1	5	4	4	4	5	4	4	3	4
Consumo elétrico	3	5	4	5	5	3	2	5	1	3
Massa	4	3	3	3	3	5	2	5	1	5
Preço do equipamento	4	5	4	5	4	3	3	5	5	2
Garantia	4	5	5	5	4	3	4	5	3	5
Defeitos simuláveis	5	3	4	4	2	5	5	3	5	4
Instrumentos inclusos	3	3	4	4	2	5	5	4	4	5
Suporte técnico	5	5	5	5	2	4	5	5	3	5

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 4 - Coeficientes M_i , L_i , U_i , G_i , método *Fuzzy-Delphi*.

Crítérios	M_i	L_i	U_i	G_i	Status
Rotação máxima	3.54	1.00	5.00	3.18	Rejeitado
Consumo elétrico	3.26	1.00	5.00	3.09	Rejeitado
Massa	3.10	1.00	5.00	3.03	Rejeitado
Preço do equipamento	3.85	2.00	5.00	3.62	Aceito
Garantia	4.22	3.00	5.00	4.07	Aceito
Defeitos simuláveis	3.85	2.00	5.00	3.62	Aceito
Instrumentos inclusos	3.77	2.00	5.00	3.59	Aceito
Suporte técnico	4.24	2.00	5.00	3.75	Aceito

Fonte: Autoria própria (2021).

O valor do limite α utilizado para filtrar os critérios de decisão foi $\alpha = 3,5$ (LIMA, DOS SANTOS, 2019). Sendo assim, como se pode observar na Tab. 4, dos oito critérios propostos foram rejeitados três: rotação máxima, consumo elétrico e massa do equipamento, pois apresentam valores de G_i menores que o limite utilizado. Já os critérios preço do equipamento, garantia, defeitos simuláveis, instrumentos inclusos e suporte técnico foram aceitos para integrar o modelo, pois os valores de G_i são maiores que $\alpha = 3,5$.

4.3 PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO MODELO VALIDADO

Os resultados da aplicação do método AHP para cada julgamento estão mostrados no APÊNDICE B com os valores obtidos para os autovetores, autovetores normalizados, $\lambda_{\text{máx}}$, RC e IC de cada avaliação. As razões de consistência foram checadas e estão dentro do limite aceitável ($<10\%$).

Ao se agregar os julgamentos individuais de todos os especialistas obteve-se a matriz global mostrada na Tab. 5.

Tabela 5 - Matriz global com os julgamentos agregados.

Matriz Global							
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	Autovet.	Pesos finais
Preço (C1)	1.0000	0.2720	0.3171	0.2809	0.1561	0.3277	5.2%
Garantia (C2)	3.6768	1.0000	0.7082	1.1534	0.2403	0.9369	15.0%
Defeitos simuláveis (C3)	3.1533	1.4120	1.0000	1.5997	0.4884	1.2831	20.5%
Instrumentos inclusos (C4)	3.5596	0.8670	0.6251	1.0000	0.3138	0.9045	14.5%
Suporte técnico (C5)	6.4074	4.1608	2.0477	3.1867	1.0000	2.8060	44.8%

Fonte: Autoria própria (2021).

Como se pode observar, o suporte técnico terá maior peso na seleção do equipamento (44.8%), seguido de defeitos simuláveis (20.5%), garantia (15.0%), instrumentos inclusos (14.5%) e preço do equipamento (5.2%). Ainda, segundo Moraes e Santaliestra (2004), devido à importância do suporte técnico um fornecedor pode ter melhor desempenho mesmo que ainda outros fatores como preço sejam maiores para este.

Os valores obtidos para o índice randômico (IR), autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$),

índice de consistência (IC) e razão de consistência (RC) para a matriz global estão mostrados na Tab.6.

Tabela 6 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz global.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.0791
Índice de consistência (IC)	0.0198
Razão de consistência (RC)	1.77%

Fonte: Autoria própria (2021).

Para a matriz global, como se pode observar, a avaliação é consistente, pois $RC = 1.77\%$, o que já era de se esperar, pois os julgamentos individuais também são consistentes. O valor do índice randômico $IR = 1.12$ se dá pelo fato de a ordem da matriz ser $n = 5$.

4.4 APLICAÇÃO

A matriz de decisão com as alternativas de simuladores de análise de vibração avaliadas no exemplo de aplicação é mostrada na Tab.7. As marcas ou modelos dos equipamentos não são fornecidos para não incluir informações que possam ser consideradas publicidade e para garantir a confidencialidade do estudo (CARNERO, 2016). O vetor de pesos dos critérios é $\tilde{W} = [0.052, 0.15, 0.205, 0.145, 0.448]$, que corresponde aos pesos obtidos por meio do método AHP na terceira etapa.

Tabela 7 - Matriz de decisão, alternativas de equipamentos para o exemplo de aplicação.

Alternativas	Critérios				
	Preço (R\$)	Garantia (anos)	Defeitos simuláveis	Instrum. inclusos	Suporte técnico
Equipamento A	27850	1	3	1	5
Equipamento B	16100	1	2	3	1
Equipamento C	33500	2	4	3	2.5

Equipamento D	24600	1	4	2	5
Equipamento E	18130	2	3	1	5

Fonte: Autoria própria (2021).

Os Equipamentos A e E podem simular três tipos de defeitos (defeitos simuláveis = 3). O Equipamento A possibilita simulações de desbalanceamento, desalinhamento e folga. Por sua vez, o Equipamento E possibilita simulações de desbalanceamento, desalinhamento e falha de rolamento.

Os Equipamentos C e D podem simular quatro tipos de defeitos (defeitos simuláveis = 4). O Equipamento C possibilita simulações de desbalanceamento, desalinhamento, falha de rolamento e folga. Por sua vez, o Equipamento D possibilita simulações de desalinhamento, falha elétrica, falha de rolamento e folga. O equipamento B pode simular apenas dois tipos de defeitos (defeitos simuláveis = 2) os quais podem ser de desbalanceamento e desalinhamento.

No que diz respeito ao critério Instrumentos Inclusos, os equipamentos A e E contém um tipo de instrumento (Instrum. Inclusos = 1) que são os acelerômetros. Já os equipamentos B e C contém três tipos de instrumentos inclusos (Instrum. Inclusos = 3) que são acelerômetros, tacômetro e analisador de vibração. O equipamento D, por sua vez, apresenta incluso dois tipos de instrumentos (Instrum. Inclusos = 2) que são os acelerômetros e analisador de vibração.

Para avaliar o critério qualitativo suporte técnico foi utilizada a escala de desempenho mostrada no Quadro 4. A escala elaborada apresenta cinco níveis e é baseada em dois fatores: localização do fornecedor e avaliações dos clientes/usuários.

Quadro 4 - Escala de desempenho para pontuação do critério suporte técnico.

Nível	Caracterização	Nota
L1	Quando o fabricante possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes na internet, conversas pessoais, etc. em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são sempre positivas.	10

L2	Quando o fabricante possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes na internet, conversas pessoais, etc. em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são em grande parte positivas, com algumas críticas, porém poucas.	7.5
L3	Quando o fabricante não possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes na internet, conversas pessoais, etc. em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são em grande parte positivas.	5
L4	Quando o fabricante possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes na internet, conversas pessoais, etc. em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são em grande parte ruins.	2.5
L5	Quando fabricante não possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes na internet, conversas pessoais, etc. em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são na maior parte ruins.	1

Fonte: Autoria própria (2021).

Os equipamentos A, D e E receberam nota cinco no suporte técnico, pois o fabricante não possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes na internet, conversas pessoais, etc. em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são em grande parte positivas.

Já o equipamento C recebeu nota 2.5 no suporte técnico, pois o fabricante apresenta assistência próxima, contudo as avaliações dos usuários/clientes em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são em grande parte ruins. O equipamento B recebeu nota 1, uma vez que não possui assistência técnica próxima e as avaliações dos usuários/clientes em relação aos serviços de assistência e apoio ao cliente são, em grande parte, ruins.

A matriz de decisão normalizada e ponderada para as alternativas de equipamentos é mostrada na Tab.8.

Tabela 8 - Matriz de decisão normalizada e ponderada.

Alternativas	Critérios				
	Preço (R\$)	Garantia (anos)	Defeitos simuláveis	Instrum. inclusos	Suporte técnico
Equipamento A	0.026	0.045	0.084	0.030	0.247
Equipamento B	0.015	0.045	0.056	0.089	0.049
Equipamento C	0.031	0.090	0.112	0.089	0.123
Equipamento D	0.023	0.045	0.112	0.059	0.247
Equipamento E	0.017	0.090	0.084	0.030	0.247

Fonte: Autoria própria (2021).

Os valores obtidos para as soluções ideais positiva (A^+) e negativa (A^-) são mostrados na Tab.9.

Tabela 9 - Solução ideal positiva (A^+) e solução ideal negativa A^- .

Solução ideal	Critérios				
	Preço	Garantia	Defeitos simuláveis	Instrum. inclusos	Suporte técnico
A^+	0.015	0.090	0.112	0.089	0.247
A^-	0.031	0.045	0.056	0.030	0.049

Fonte: Autoria própria (2021).

O critério preço é do tipo custo, pois valores menores são preferíveis, enquanto os demais critérios são do tipo benefício, pois quanto maiores seus valores, melhor. A Tab. 10 mostra os valores obtidos das distâncias euclidianas (D_i^+) e (D_i^-) e do coeficiente de aproximação ξ_i .

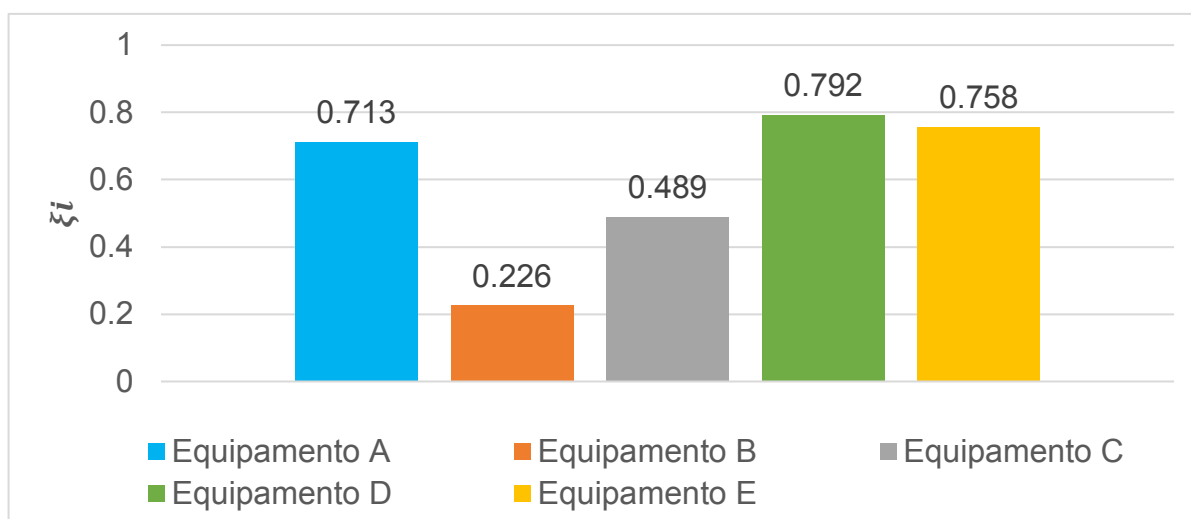
Tabela 10 - Distâncias Euclidianas Di^+ e Di^- e coeficiente de aproximação ξ_i .

Alternativas	Di^+	Di^-	ξ_i
Equipamento A	0.080	0.200	0.713
Equipamento B	0.210	0.061	0.226
Equipamento C	0.125	0.119	0.489
Equipamento D	0.055	0.208	0.792
Equipamento E	0.065	0.205	0.758

Fonte: Autoria própria (2021).

Com base nos coeficientes de aproximação ξ_i , montou-se o Gráf. 1 para visualizar o desempenho de cada uma das alternativas em relação as demais.

Gráfico 1 - Desempenho das alternativas analisadas.



Fonte: Autoria própria (2021).

A alternativa com melhor desempenho é o Equipamento D, pois apresenta maior coeficiente de aproximação ($\xi_i=0.792$). Em contrapartida, o pior desempenho é o do Equipamento B, pois o coeficiente de aproximação é o menor, $\xi_i = 0.226$. O que favoreceu o melhor desempenho do equipamento D foi a quantidade de defeitos simuláveis e o suporte técnico. O Equipamento B, apesar de apresentar o menor preço, teve o pior desempenho, devido principalmente à nota no suporte técnico.

Como se pode observar, o preço não é apenas o único fator que influencia na escolha de um equipamento para uma instituição. Conforme Cabral (2020) o preço é muitas vezes o único critério levado em consideração em situações reais de compras públicas sendo que, na verdade, é mais interessante levar em consideração múltiplos fatores como é feito no presente trabalho.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um modelo que auxiliará as instituições de ensino superior de engenharia a tomar decisões quanto à seleção de simulador de análise de vibrações mecânicas, de tal maneira que possa organizar e justificar as decisões das pessoas que tomam decisões frequentemente nestas organizações.

O trabalho é estruturado em múltiplos critérios que foram validados por meio do método *Fuzzy Delphi* e, com a utilização do método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, foram obtidos os pesos para cada um dos critérios do modelo validado. O suporte técnico é o critério que terá maior peso na seleção do equipamento (44.8%), seguido de defeitos simuláveis (20.5%), garantia (15%), instrumentos inclusos (14.5%) e preço do equipamento (5.2%).

A pesquisa, além do mais, apresenta um exemplo de aplicação do modelo com o método *TOPSIS*. Espera-se que o modelo sirva como referência quanto aos critérios utilizados, as ponderações associadas aos critérios e os procedimentos de cálculo abordados.

Sugere-se, por fim, que outras pessoas contribuam futuramente desenvolvendo trabalhos como este na área de análise de vibração, elaborando modelos multicritério que facilitem as decisões e/ou expandindo este trabalho para outros tipos de equipamentos e aplicações.

REFERÊNCIAS

- ANTONIOELLI, Edilar Bento et al. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos**. 1999.
- ABNT, NBR. 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, p. 6, 1994.
- AB GHANI, A. F. et al. **Detection of Shaft Misalignment Using Machinery Fault Simulator (MFS)**. 2016.
- ADONIS, Leonardo Cabral; ROCHA, Sullivan Matheus Santos. **Métodos multicritério e mecanismos de aprendizagem para suporte à tomada de decisão em manutenção industrial**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019.
- BERTONCINI, Cristine et al. Processo decisório: a tomada de decisão. **Revista FAEF. Garça, SP**, v. 5, n. 3, p. 8-34, 2013.
- BASTOS, André LA et al. Modelo multicritério de apoio a decisão para seleção de fornecedores. In: **VII Congresso nacional de excelência em gestão**. 2011. p. 17.
- CARNERO, María Carmen. Fuzzy multicriteria model for selection of vibration technology. **Shock and Vibration**, v. 2016, 2016.
- CHANG, Pei-Chann; WANG, Yen-Wen. Fuzzy Delphi and back-propagation model for sales forecasting in PCB industry. **Expert Systems with Applications**, v. 30, n. 4, p. 715-726, 2006.
- CASTELLANI, Otávio Cesar. Discussão dos conceitos de massa inercial e massa gravitacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p. 356-359, 2001.
- CAMPOS, Vanessa Ribeiro. Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento. **Recife-PE. Universidade de São Paulo**, 2011.
- CARPENEDO, Marcelo. **Utilização de aços de alta resistência e baixa liga na redução de peso de máquinas agrícolas colheitadeiras de grãos**. 2014.
- CABRAL, Luciana Priscila Barros et al. **Abordagem multicritério para apoiar compras públicas sustentáveis**. 2020.
- CERVI, André Felipe Corrêa. **Fazer ou comprar: proposta de uma estrutura para o processo decisório e aplicação de métodos de decisão multicritério**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CHANG, A. Y.; CHENG, Y. T. Analysis model of the sustainability development of manufacturing small and medium- sized enterprises in Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, n. 64, p. 458–473, 2019.
- CHIAD, Jumaa Salman et al. **Melhor as Características Mecânicas de Aço de Liga**

COLONA, Allan Alves. **Estudo sobre a redução da transmissibilidade por meio da variação da rigidez de um absorvedor dinâmico de vibrações** - 2018. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

DIN 41Cr4 por Shot Peening. **Journal of Engineering**, v. 26, n. 7, p. 1-15, 2020.

DE SOUZA, Leandro Peçanha; DE BARROS, Alexandre Pinheiro; GOMES, Carlos

DA SILVA, A. C.; NASCIMENTO, L. P. A.; BELDERRAIN, Mischel Carmen Neyra. Método de apoio multicritério à decisão na seleção e priorização de portfólio de projetos. **Anais do 13o XIII ENCITA, ITA, São Paulo, Brazil**, 2007.

DA COSTA GODOI, Wagner. Método de construção das matrizes de julgamento paritários no AHP–Método do julgamento holístico. **Revista Gestão Industrial**, v. 10, n. 03, p. 474-493, 2014.

DO CARMO, PAULO FÁBIO BREGALDA. **Modelos e técnicas de tomada de decisão em análise multicritério–aplicações em avaliação de imóveis**. 2017.

ELLWANGER, Cristiane; SANTOS, Cristina Paludo; LEVANDOWSKI, Joel. Aplicação do Método AHP para Avaliação da Usabilidade de Sistemas. **Human Factors in Design**, v. 2, n. 3, p. 4-19, 2013.

Francisco Simões. **APLICAÇÃO DE MÉTODO HÍBRIDO AHP-TOPSIS COMO MODELO DECISÓRIO PARA ORDENAÇÃO E PRIORIZAÇÃO DE PORTFÓLIO DE PROJETOS POR COMITÊ DE GOVERNANÇA DE TI**. 2016.

FRONER, P. H. C. P. Automação de Tacômetro Magnético para Colunas de Perfuração. **Projeto de graduação. Rio de Janeiro, RJ, Pontifícia Universidade Católica**, 2015

GOODWIN, Paul; WRIGHT, George. **Decision analysis for management judgment**. John Wiley & Sons, 2014.

GERALDI, Geovani. **Análise da vibração das moto-bombas de refrigeração dos geradores elétricos de Itaipu**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GARDIM, Roberto. **Desenvolvimento de bancada didática de análise de vibrações**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, Carlos Francisco Simões; ALMEIDA, AT de. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. 2ª edição. **São Paulo: Atlas**, 2006.

HSU, Y.; LEE, C.; KRENG, V. The application of fuzzy Delphi method and fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 419-425, 2010.

HODGETT, Richard Edgar. Comparison of multi-criteria decision-making methods for

equipment selection. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 5-8, p. 1145-1157, 2016.

HSIEH, Ting-Ya; LU, Shih-Tong; TZENG, Gwo-Hshiung. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. **International journal of project management**, v. 22, n. 7, p. 573-584, 2004.

HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. Methods for multiple attribute decision making. In: **Multiple attribute decision making**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. p. 58-191.

HOLANDA, Sandra Maria Santos. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

JUNIOR, Joe Luiz Rossdeutscher. **Análise De Vibração Em Rolamentos Industriais**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Unifacvest. 2018.

JUNIOR et.al. **Simulador de defeitos e falhas geradores de vibração em equipamentos rotativos**. Faculdades Integradas De Aracruz. 2018

KUO, Y.F.; CHEN, P.C. Constructing performance appraisal indicators for mobility of the service industries using fuzzy Delphi method. **Expert Systems with Applications**, v. 35, n. 4, 1930-1939, 2008.

KELLY, S. Graham. **Mechanical vibrations: theory and applications**. Stamford, CT: Cengage learning, 2012.

KROHLING, Renato A.; SOUZA, Talles TM. Dois exemplos da aplicação da técnica TOPSIS para tomada de decisão. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA, Visconde de Araújo**, v. 8, p. 31-35, 2011.

KUHN, Luiz Eduardo. **Estudo dirigido ao balanceamento de sistemas através da análise de sinais vibratórios: emprego de um software e de uma bancada experimental**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LINS, Frederico Estelita. **Modelo multicritério para priorização de equipamentos hospitalares para manutenção programada**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LIMA, Israel Antônio Macedo de. **Proposição de uma bancada didática para análise de vibração em manutenção preditiva**. 2014.

LIMA, Francisco Valdivino Rocha. **Índice de eficiência da gestão da propriedade intelectual em pequenas e médias empresas**. 2019. Tese de Doutorado- Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

LIMA, Francisco Valdivino Rocha; DOS SANTOS, João Antonio Belmino. Modelo de

Avaliação do Desempenho da Gestão da Propriedade Intelectual em PMES/Model of Evaluation of the Performance of Intellectual Property Management in SMES. **Revista FSA (Centro Universitário Santo Agostinho)**, v. 17, n. 7, p. 41-60, 2020a.

LIMA, Francisco Valdivino Rocha; DOS SANTOS, João Antonio Belmino. Índice para avaliar a eficiência da gestão da propriedade intelectual em pequenas e médias empresas. **Navus: Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 1-20, 2020b.

LAGO, Daniel Fabiano. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007.

LUCENA, Arthur Felipe Echs; DE MORI, Luci Mercedes. Uso do Analytic Hierarchy Process (AHP) para Hierarquização de Métodos de Mensuração do Grau de Aplicação da Construção Enxuta. **Uso do Analytic Hierarchy Process (AHP) para Hierarquização de Métodos de Mensuração do Grau de Aplicação da Construção Enxuta**, p. 1-388–416. 2018.

LOUREIRO, Suelen Marconsini. **Reconhecimento automático de padrões de defeitos em motobombas utilizando análise de sinais de vibração**. 2009. Dissertação de Mestrado, Programa de pós graduação em informática, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

MARÇAL, Rafael Almeida; SANTOS, Ronaldo Lisboa dos. **Medição, análise e controle de vibração em máquinas industriais: estudo de caso em uma empresa de grande porte do setor madeireiro**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MENNA, Alexandre Ribeiro. **Deteção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga: um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos**. 2007.

MILANI JUNIOR, Gabriel. **Análise das vibrações em exaustores de fornos de fábrica de cimento para identificar seus modos de falha**. 2012.

MOREIRA, Marcela Pinheiro. **Priorização dos Modos de Falha de Equipamentos Utilizando os Métodos de Análise Multicritério PROMETHEE e Fuzzy PROMETHEE**. 2009. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

MARTINS, Thomas. **Análise modal de vibrações de um motor de combustão interna: enfoque em um sistema monocilíndrico de quatro tempos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NAYAK, Chitresh; PATHAK, Vimal Kumar; KUMAR, Sagar. Prashant Athnekar, 2015, “design and development of machine fault simulator (MFS) for fault diagnosis”. **International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH) Vol**, v. 4, p. 77-84.

NETA, Regina Maria Lima et al. CONSUMO EFICIENTE DE ENERGIA

ELÉTRICA. **Entre Aberta Revista de Extensão**, v. 2, n. 1, 2017.

OLIVEIRA, Jean Paulo de. ESTUDO DE VIBRAÇÃO EM MOTORES ELÉTRICOS. 2018.

PEREIRA, João Alberto Roque. **Conceção e Construção de um Simulador de Controlo de Vibrações**. 2013. Tese de Doutoramento. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

RIVAS, RENÉ ERNESTO GARCÍA. **Uso do método multicritério para tomada de decisão operacional tendo em conta riscos operacionais, à segurança, ambientais e à qualidade**. 2016. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil.

ROSSONI, CLÁUDIO FARIAS. **DECISÃO MULTICRITÉRIO**: Uma pesquisa experimental para avaliação da percepção dos gestores de MPE acerca do modelo de tomada de decisão multicritério T-ODA quanto à sua aplicabilidade. Dissertação de mestrado. Faculdade Campo Limpo Paulista. 2011.

RODRIGUEZ, Jenny Milena Moreno; KANG, Takanni Hannaka Abreu; DE ALMEIDA, Adiel Teixeira. SELEÇÃO DE FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS EM EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA: APLICAÇÃO DE DUAS ABORDAGENS MCDM/AA CENÁRIOS DISTINTOS. 2017.

RODRIGUEZ, Jenny Milena Moreno. **Modelo de decisão multicritério para seleção de fornecedores de equipamentos laboratoriais para pesquisa agropecuária**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

RAMOS, M. S. **Utilização da abordagem multicritério para priorização do portfólio de projetos de investimento**. 2010. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, RJ, 132p.lima

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SOARES JUNIOR, Antônio Marques da Costa. Proposição de um modelo de decisão multicritério como auxílio à escolha, análise e avaliação de tecnologias de geração de energia elétrica. 2018.

SAVI, Marcelo Amorim; DE PAULA, Aline Souza. Vibrações mecânicas. **Rio de Janeiro: LTC**, p. 22, 2017.

SILVA, Raíssa Maradja Kadydja. **Bancada didática para manutenção preditiva utilizando análise de vibrações**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, Vinícius Augusto Diniz et al. Detecção de falhas em motores elétricos através das máquinas de vetores de suporte. 2012.

SANTOS, Edilene Santana; PONTE, Vera. Modelo de decisão em gestão

econômica. **Caderno de estudos**, n. 19, p. 01-19, 1998.

SILVA, Gilson Laurentino Da. Avaliação da eficiência energética em escolas públicas municipais e estaduais de Maceió-Alagoas. 2015.

STEFANO, Nara Medianeira et al. **Critérios para avaliação da gestão de periódicos científicos eletrônicos sob a ótica do Capital Intelectual**. 2014.

STEFANO, Nara Medianeira. Uma proposta de métodos híbridos para critérios e subcritérios de implantação do Sistema Produto-Serviço (PSS). **Exacta**, v. 14, n. 3, p. 431-447, 2016.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Elsevier, 2004.

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

SPAMER, Fernanda Rosa. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. 2009.

Silva, Klétilla Maiara da Silva e. **Aplicação de métodos multicritérios em sistemas de informação para melhoria da tomada de decisão no ambiente organizacional – Estado da arte**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

WANG, X.; DURUGBO, C. Analysing network uncertainty for industrial product-service delivery: a hybrid fuzzy approach. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 11, p. 4621-4636, 2013.

WERNKE, Rodney; BORNIA, Antonio Cezar. A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 12, p. 60-71, 2001.

GOMES, L. F. A. M. **Teoria da decisão**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2007. 116 p.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO (MÉTODO *FUZZY DELPHI*)

QUESTIONÁRIO PARA JULGAR O GRAU DE IMPORTÂNCIA DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE SIMULADOR DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ROTATIVAS PARA INSTITUIÇÕES DE ENSINO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A. Identificação do Colaborador da Pesquisa

Nome:

E-mail:

B. Análise dos critérios

Marque, de acordo com seu grau de concordância, o quanto você acredita que o critério deve ser utilizado para selecionar simulador de análise de vibrações em máquinas rotativas.

<i>Critério</i>	<i>Grau de concordância</i>				
	<i>Concordo totalmente</i>	<i>Concordo</i>	<i>Neutro</i>	<i>Discordo</i>	<i>Discordo totalmente</i>
Rotação máxima (RPM)					
Consumo elétrico (Kwh)					
Massa(kg)					
Preço do equipamento(R\$)					
Garantia do fornecedor (Anos)					
Defeitos simuláveis					
Instrumentos inclusos					
Suporte Técnico					

APÊNDICE B – TABELAS COM OS RESULTADOS DO MÉTODO AHP PARA CADA AVALIADOR.

Tabela 11 - Matriz de julgamento 1, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 1							
Matriz de julgamento 1						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/3	1/4	5	1/5	0.608	8.1%
Garantia (C2)	3	1	1/4	5	1/5	0.944	12.6%
Defeitos simuláveis (C3)	4	4	1	6	1/3	2.000	26.8%
Instrumentos inclusos (C4)	1/5	1/5	1/6	1	1/9	0.237	3.2%
Suporte técnico (C5)	5	5	3	9	1	3.680	49.3%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 12 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 1.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3884
Índice de consistência (IC)	0.0971
Razão de consistência (RC)	8.67%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 13 - Matriz de julgamento 2, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 2							
Matriz de julgamento 2						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/4	1/3	1/3	1/4	0.370	5.9%
Garantia (C2)	4	1	1/3	1	1/4	0.803	12.9%
Defeitos simuláveis (C3)	3	3	1	3	1/3	1.552	24.9%
Instrumentos inclusos (C4)	3	1	1/3	1	1/3	0.803	12.9%
Suporte técnico (C5)	4	4	3	3	1	2.702	43.4%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 14 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 2.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3424
Índice de consistência (IC)	0.0856
Razão de consistência (RC)	7.64%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 15 - Matriz de julgamento 3, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 3							
Matriz de julgamento 3						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/4	1/8	1/8	1/5	0.239	3.3%
Garantia (C2)	4	1	1/2	1/6	1/3	0.644	8.9%
Defeitos simuláveis (C3)	8	2	1	1/3	4	1.844	25.3%
Instrumentos inclusos (C4)	8	6	3	1	4	3.565	49.0%
Suporte técnico (C5)	5	3	1/4	1/4	1	0.987	13.6%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 16 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 3.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3841
Índice de consistência (IC)	0.0960
Razão de consistência (RC)	8.57%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 17 - Matriz de julgamento 4, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 4							
Matriz de julgamento 5						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/8	1/5	1/5	1/9	0.223	2.9%
Garantia (C2)	8	1	2	5	1/4	1.821	23.7%
Defeitos simuláveis (C3)	5	1/2	1	2	1/6	0.964	12.6%
Instrumentos inclusos (C4)	5	1/5	1/2	1	1/5	0.631	8.2%
Suporte técnico (C5)	9	4	6	5	1	4.043	52.6%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 18 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 4.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.4055
Índice de consistência (IC)	0.1014
Razão de consistência (RC)	9.05%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 19 - Matriz de julgamento 5, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 5							
Matriz de julgamento 5						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	3	1/5	1/4	1/9	0.441	5.8%
Garantia (C2)	1/3	1	1/3	1/3	1/8	0.341	4.5%
Defeitos simuláveis (C3)	5	3	1	2	1/4	1.496	19.7%
Instrumentos inclusos (C4)	4	3	1/2	1	1/5	1.037	13.7%
Suporte técnico (C5)	9	8	4	5	1	4.282	56.4%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 20 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 5.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.2406
Índice de consistência (IC)	0.0602
Razão de consistência (RC)	5.37%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 21 - Matriz de julgamento 6, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 6							
Matriz de julgamento 6						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/6	4	1/3	1/8	0.488	6.2%
Garantia (C2)	6	1	7	3	1/3	2.112	26.9%
Defeitos simuláveis (C3)	1/4	1/7	1	1/7	1/8	0.230	2.9%
Instrumentos inclusos (C4)	3	1/3	7	1	1/5	1.070	13.6%
Suporte técnico (C5)	8	3	8	5	1	3.949	50.3%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 22 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 6.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3636
Índice de consistência (IC)	0.0909
Razão de consistência (RC)	8.12%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 23 - Matriz de julgamento 7, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 7							
Matriz de julgamento 7						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/7	1/9	1/6	1/5	0.221	2.8%
Garantia (C2)	7	1	1/7	1	1/2	0.871	11.1%
Defeitos simuláveis (C3)	9	7	1	8	4	4.580	58.2%
Instrumentos inclusos (C4)	6	1	1/8	1	1/2	0.822	10.4%
Suporte técnico (C5)	5	2	1/4	2	1	1.380	17.5%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 24 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 7.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3226
Índice de consistência (IC)	0.0806
Razão de consistência (RC)	7.20%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 25 - Matriz de julgamento 8, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 8							
Matriz de julgamento 8						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/7	1/8	1/3	1/8	0.237	3.0%
Garantia (C2)	7	1	2	8	1/3	2.063	26.3%
Defeitos simuláveis (C3)	8	1/2	1	5	1/4	1.380	17.6%
Instrumentos inclusos (C4)	3	1/8	1/5	1	1/8	0.393	5.0%
Suporte técnico (C5)	8	3	4	8	1	3.776	48.1%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 26 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 8.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3557
Índice de consistência (IC)	0.0889
Razão de consistência (RC)	7.94%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 27 - Matriz de julgamento 9, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 9							
Matriz de julgamento 9						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Crítérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/3	4	1/7	1/5	0.520	7.4%
Garantia (C2)	3	1	4	1/2	1/5	1.037	14.8%
Defeitos simuláveis (C3)	1/4	1/4	1	1/5	1/6	0.291	4.1%
Instrumentos inclusos (C4)	7	2	5	1	1/2	2.036	29.0%
Suporte técnico (C5)	5	5	6	2	1	3.129	44.6%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 28 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 9.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3418
Índice de consistência (IC)	0.0855
Razão de consistência (RC)	7.63%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 29 - Matriz de julgamento 10, autovetor e pesos da avaliação.

Avaliador 10							
Matriz de julgamento 10						Autovetor	Autovetor normalizado (Pesos)
Critérios	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)		
Preço (C1)	1	1/4	1/9	1/9	1/9	0.203	2.5%
Garantia (C2)	4	1	1/7	1/4	1/9	0.437	5.4%
Defeitos simuláveis (C3)	9	7	1	4	2	3.471	43.1%
Instrumentos inclusos (C4)	9	4	1/4	1	1/4	1.176	14.6%
Suporte técnico (C5)	9	9	1/2	4	1	2.766	34.4%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 30 - Coeficientes IR, $\lambda_{\max}$, IC e RC para matriz de julgamento 10.

Índice randômico (IR)	1.12
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	5.3817
Índice de consistência (IC)	0.0954
Razão de consistência (RC)	8.52%

Fonte: Autoria própria (2021).