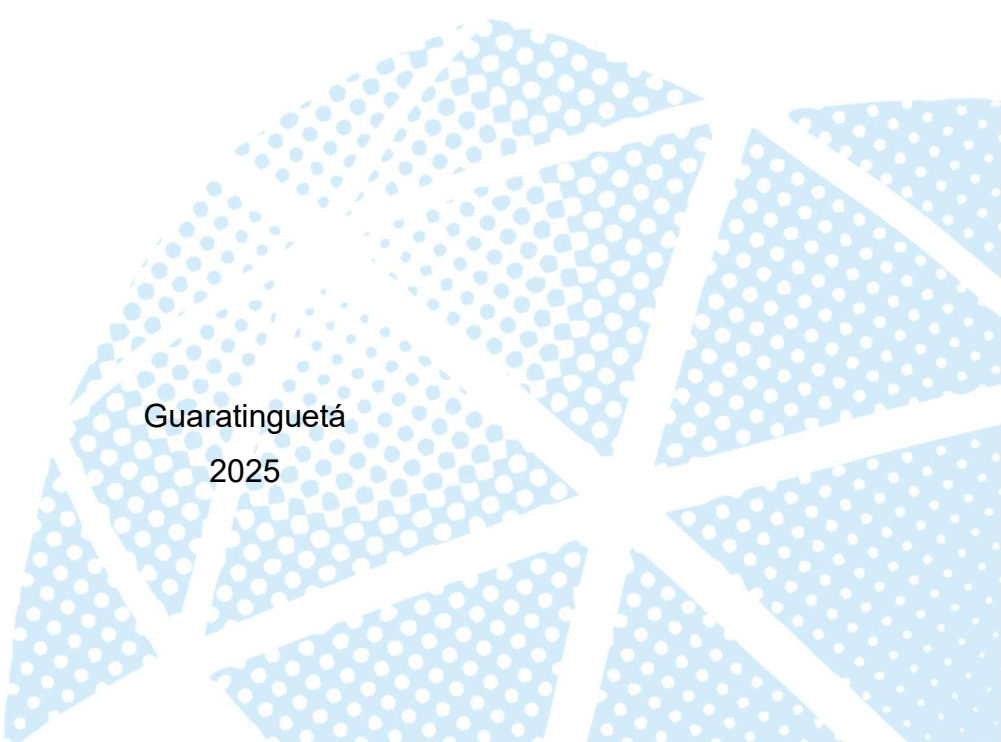


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

NUNO MIGUEL DE MATOS TORRE

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA À GESTÃO DA MANUTENÇÃO DE
SISTEMAS HIDRÁULICOS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Guaratinguetá
2025



NUNO MIGUEL DE MATOS TORRE

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA À GESTÃO DA MANUTENÇÃO DE
SISTEMAS HIDRÁULICOS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Produção

Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon

Guaratinguetá

2025

T659a	Torre, Nuno Miguel de Matos Análise multicritério aplicada à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica / Nuno Miguel de Matos Torre - Guaratinguetá, 2025. 113 f : il. Bibliografia: f. 101-112 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon 1. Siderurgia. 2. Engenharia hidráulica. 3. Processo decisório. 4. Manutenção. I. Título. CDU 621.22(043)
-------	--

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta Tese apresenta modelos inovadores que integram a literatura vigente com a opinião de especialistas. Estes modelos promovem novas perspectivas para o gerenciamento de manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas. Por meio dos métodos de decisão multicritério, identificaram-se soluções robustas para a resolução de problemas relacionados com este tipo de ativos. Os temas abordados incluem: seleção de estratégias de manutenção, priorização da seleção de projetos, seleção de fornecedores e avaliação de criticidade de peças sobressalentes. Este documento terá uma importância significativa para profissionais e pesquisadores envolvidos em tomadas de decisão e gerenciamento de manutenção.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This thesis presents innovative models that integrate current literature with expert opinion. These models provide new perspectives for the maintenance management of hydraulic systems in steel industries. Through multi-criteria decision methods, robust solutions were identified for solving problems related to this type of asset. The topics covered include - selecting maintenance strategies, prioritizing project selection, selecting suppliers, and evaluating the criticality of spare parts. This document will be significant to professionals and researchers involved in decision-making and maintenance management.

NUNO MIGUEL DE MATOS TORRE

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA À GESTÃO DA MANUTENÇÃO DE
SISTEMAS HIDRÁULICOS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Data da defesa: 29/05/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **VALERIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON**
Data: 29/05/2025 18:34:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON
Orientador – UNESP

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS**
Data: 30/05/2025 08:19:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DI**
Data: 02/06/2025 08:37:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DE FREITAS
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **FABRICIO MACIEL GOMES**
Data: 02/06/2025 11:26:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FABRÍCIO MACIEL GOMES
USP

Documento assinado digitalmente
 **KELLY ALONSO COSTA**
Data: 02/06/2025 21:03:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. KELLY ALONSO COSTA
UFF

Dedico este trabalho a Deus por tudo o que tem feito por mim, a meus pais, minha esposa e meus filhos, pela compreensão, paciência, apoio, incentivo, cumplicidade e amor ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me ter dado sabedoria e compreensão para superar todas as dificuldades.

A toda a minha família pelo carinho, amor e apoio incondicional.

Agradeço ao Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon pela orientação, partilha de conhecimento e por não desistir em me motivar a finalizar este Doutorado.

Aos professores, Ana Paula Rosifini Alves, Anna Katarzyna Florek Paszkowska, Fabrício Maciel Gomes, Fernando Augusto Silva Marins, Kelly Alonso Costa, Luis Ernesto Quezada, Messias Borges Silva, Marcela Aparecida G. Machado de Freitas, Otávio José de Oliveira e Rogério Pinto Mota, que me proporcionaram a oportunidade de ampliar os meus conhecimentos.

A esta universidade, direção e administração, que me proporcionaram a chance de expandir os meus horizontes. Obrigada pelo ambiente criativo e amigável durante todo o período de formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À FAPESP, pelo apoio financeiro, concedido por meio do Processo nº 2023/14761-5, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.”
Provérbios 16:3

RESUMO

Este documento apresenta um tema inovador para a gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em usinas siderúrgicas. A indústria siderúrgica possui importância na economia mundial, e desempenha um contributo fundamental para o desenvolvimento de um país. Grande parte dos processos siderúrgicos operam com sistemas hidráulicos com alto nível de precisão. A eficiência da manutenção neste tipo de ativos promove uma elevada relação custo-benefício. Esta Tese tem como objetivo propor, testar e validar modelos, para suporte à tomada de decisão, visando melhorar a gestão da manutenção dos sistemas hidráulicos, em usinas siderúrgicas. Utilizou-se o método *Design Science Research* (DSR) que permitiu identificar e solucionar os principais problemas associados à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos. Os métodos de decisão multicritério (MCDM – *multi-criteria decision-making*) auxiliam a tomada de decisão por parte dos gestores de manutenção. O método de decisão Analytic Hierarchy Process (AHP), é um método consolidado e apropriado para lidar com múltiplos fatores e incerteza. A principal contribuição científica desta Tese consiste em propor modelos inovadores que abrange a seleção de estratégias de manutenção, priorização da seleção de projetos, seleção de fornecedores e avaliação de criticidade de peças sobressalentes, que promovem novas perspectivas para profissionais e pesquisadores envolvidos em tomadas de decisão e gerenciamento de manutenção. Por meio dos modelos propostos, implementou-se indicadores de desempenho como: retorno sobre o investimento de projetos, pesquisa de satisfação de fornecedores, gestão giro de estoque, tempo de estoque mínimo e máximo e taxa de devolução de sobressalentes.

Palavras-chave: MCDM; AHP; Manutenção; Siderurgia; Sistemas Hidráulicos.

ABSTRACT

This document presents an innovative theme for hydraulic systems maintenance in the steel industry. The steel industry plays a role in the world economy and fundamentally contributes to a country's development. Most steelmaking processes operate with high-precision hydraulic systems. Efficient maintenance of this type of asset provides a high cost-benefit ratio. This thesis aims to propose, test, and validate models to support decision-making about improving the maintenance management of hydraulic systems in steel plants. It followed the Design Science Research (DSR) method, which permits the identification and solution for the main problems associated with the maintenance management of hydraulic systems. The multicriteria decision-making methods (MCDM) can support decision-making by maintenance managers. The Analytical Hierarchy Process (AHP) decision method is well-established and appropriate for dealing with multiple factors and uncertainty. The main scientific contribution of this thesis is the proposal of innovative models that encompass the selection of maintenance strategies, prioritization of project selection, supplier selection, and evaluation of the criticality of spare parts, providing new perspectives for professionals and researchers involved in decision-making and maintenance management. Through the proposed models, performance indicators were implemented, including return on investment of projects, supplier satisfaction surveys, inventory turnover management, minimum and maximum inventory times, and spare parts return rates.

Keywords: MCDM; AHP; Maintenance; Steel Industry; Hydraulic Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da pesquisa bibliográfica	20
Figura 2 - Número total de publicações de 2014 a 2023.....	22
Figura 3 - Seleção de artigos científicos	24
Figura 4 - Principais autores.....	27
Figura 5 - Distribuição da produção científica ao longo do tempo.....	27
Figura 6 - Distribuição dos artigos por área temática	28
Figura 7 - Distribuição de países.....	29
Figura 8 - Contemporaneidade.....	29
Figura 9 - Distribuição dos artigos por área de pesquisa	30
Figura 10 - Mapa temático por relevância e grau de desenvolvimento	33
Figura 11 - Seleção de artigos científicos pertinentes ao tema.....	34
Figura 12 – Hipótese vs. Tese.....	36
Figura 13 - Representação das fases do ciclo básico do método DSR.....	39
Figura 14- Fluxograma da Tese	42
Figura 15 - Diagrama esquemático do processo de produção de aço	48
Figura 16- Evolução da manutenção.....	50
Figura 17- Hierarquia para um problema de decisão	58
Figura 18 - Fluxograma de abordagem metodológica AHP	59
Figura 19 - <i>Brainstorming</i>	65
Figura 20 - Hierarquia para aplicação do AHP (Estratégia de manutenção).....	69
Figura 21 - Hierarquia para aplicação do AHP (Projetos)	71
Figura 22 - Hierarquia para aplicação do AHP (Fornecedores).....	74
Figura 23 - Hierarquia para aplicação do AHP (Sobressalentes).....	79
Figura 24 - Fluxograma com as etapas de aplicação do método AHP.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Oportunidades de pesquisa	34
Quadro 2 - Classificação da Tese	38
Quadro 3 - Etapas da Tese	43
Quadro 4 - Escala Saaty	60
Quadro 5 - Critérios e Subcritérios selecionados (Estratégia de manutenção)	68
Quadro 6 - Subcritérios selecionados	70
Quadro 7 - Critérios e Subcritérios selecionados	72
Quadro 8 - Estrutura de atributos para a criticidade das peças sobressalentes.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Documentos da pesquisa das bases de dados Scopus e Web of Science	21
Tabela 2 - Total de documentos científicos da base de dados Scopus.....	23
Tabela 3 - Artigos mais citados por palavra-chave.....	25
Tabela 4 - Principais periódicos	25
Tabela 5 - Número de autores de acordo com os documentos escritos	26
Tabela 6 - Índice de consistência aleatória	61
Tabela 7 - Associação de Subcritérios e Rating's	76
Tabela 8 - Seleção de Critérios, Subcritérios e <i>Rating's</i>	78
Tabela 9 - Julgamento dos critérios pelos especialistas	81
Tabela 10 - Prioridade agregada dos critérios.....	81
Tabela 11 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Custo	82
Tabela 12 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Segurança	82
Tabela 13 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Confiabilidade.....	83
Tabela 14 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Qualidade	83
Tabela 15 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Viabilidade.....	83
Tabela 16 - Prioridade agregada das alternativas.....	84
Tabela 17 - Prioridade agregada de subcritérios.....	85
Tabela 18 - Pesos alternados.....	85
Tabela 19 - Prioridade do projeto	86
Tabela 20 - Prioridades dos critérios e subcritérios.....	87
Tabela 21 - Prioridades locais dos fornecedores	87
Tabela 22 - Prioridades globais dos fornecedores	88
Tabela 23 - Prioridade agregada de critérios e subcritérios	89
Tabela 24 - Prioridade <i>Rating's</i> (ABC)	89
Tabela 25 - Prioridade <i>Rating's</i> (VED)]	90
Tabela 26 - Prioridade das peças sobressalentes.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	<i>Always, Better, Control</i>
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
AIJ	<i>Aggregation of individual judgements</i>
AIP	<i>Aggregation of Individual Priorities</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
FSN	<i>Fast, Slow moving and Non-moving</i>
HML	<i>High, Medium, Low</i>
MADM	<i>Multi-attribute decision-making</i>
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Theory
MCDM	<i>Multi-criteria decision-making</i>
MODM	<i>Multi-objective decision-making</i>
MTBF	<i>Mean time between failure</i>
MTTR	<i>Mean time to repair</i>
NBR	Norma brasileira regulamentadora
SDE	<i>Scarce, Difficult, Easy</i>
VED	Vital, Essencial, Desejado

LISTA DE VARIÁVEIS

IC	Índice de consistência
IR	Índices randômicos
RC	Razão de consistência
$\mathbf{A}=[a_{ij}]$	Matriz de comparações
$w = [w_i]$	Vetor de prioridades
m	Número de critérios
n	Número de alternativas
$\lambda_{\max}$	Maior autovalor da matriz
K	Número de especialistas consultados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	19
1.3	JUSTIFICATIVA	35
1.4	OBJETIVOS	37
1.4.1	Objetivos específicos	37
1.5	MÉTODO DE PESQUISA	38
1.5.1	Classificação da pesquisa científica.....	38
1.5.2	Fluxograma da Tese	41
1.5.3	Etapas da Tese	42
1.6	DELIMITAÇÃO DA TESE.....	46
1.7	ESTRUTURA DA TESE	46
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	48
2.1	USINAS SIDERÚRGICAS.....	48
2.2	MANUTENÇÃO.....	49
2.2.1	Tipos de manutenção.....	51
2.3	SELEÇÃO DE PROJETOS	54
2.4	FORNECEDORES	55
2.5	GESTÃO DE SOBRESSALENTES.....	56
2.5.1	Criticidade e gerenciamento de peças sobressalentes	56
2.6	MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDM)	56
2.7	ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP).....	57
2.7.1	Modelo AHP-BOCR.....	61
2.7.2	Modelos de Classificação.....	62
3	MODELAGEM MULTICRITÉRIO	64
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	64
3.1.1	Seleção de estratégia de manutenção	67
3.1.2	Priorização na seleção de projetos hidráulicos	69
3.1.3	Seleção de fornecedores para sistemas hidráulicos	72
3.1.4	Avaliação de criticidade de peças sobressalentes para sistemas hidráulicos	75
4	RESULTADOS	80

4.1	<i>APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA A SELEÇÃO DE ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO.....</i>	<i>80</i>
4.2	<i>APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA PRIORIZAÇÃO NA SELEÇÃO DE PROJETOS HIDRÁULICOS.....</i>	<i>85</i>
4.3	<i>APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA SELEÇÃO DE FORNECEDORES PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS.....</i>	<i>86</i>
4.4	<i>APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA AVALIAÇÃO DE CRITICIDADE DE PEÇAS SOBRESSAIENTES PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS ...</i>	<i>88</i>
4.5	<i>PONDERAÇÕES DA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP.....</i>	<i>91</i>
5	CONCLUSÃO.....	92
5.1	<i>VERIFICAÇÃO DO OBJETIVO GERAL E DOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	<i>92</i>
5.2	<i>RESPOSTA À QUESTÃO DE PESQUISA.....</i>	<i>97</i>
5.3	<i>CONSIDERAÇÕES.....</i>	<i>98</i>
5.4	<i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	<i>99</i>
	REFERÊNCIAS.....	101
	<i>APÊNDICE</i>	<i>113</i>

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contempla a introdução, onde é apresentado a contextualização, análise bibliométrica, justificativa para o presente documento, e objetivos. Também é apresentado o método de pesquisa que aborda a classificação científica e o fluxograma da Tese. Para complementar este capítulo, é apresentada a delimitação da Tese que consiste na aplicação do método AHP à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas, e finalmente, é delineada a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As operações industriais se encontram amplamente equipadas com sistemas hidráulicos, em vários tipos de processos. No entanto, o desempenho operacional destes sistemas exige um elevado nível de disponibilidade, podendo ser alcançado por meio de uma manutenção apropriada. Os sistemas hidráulicos têm sido amplamente utilizados em diferentes tipos de indústrias devido à sua elevada resposta dinâmica, densidade de potência, e capacidade de elevada disponibilidade de torque (Hou *et al.*, 2017; Pavlov *et al.*, 2017).

Os sistemas hidráulicos são amplamente utilizados em vários tipos de organizações, uma vez que possuem uma infinidade de vantagens, se destacando o controle e a transmissão de energia. Porém, estes sistemas são propensos a falhas, e se determinadas anormalidades não forem detectadas e eliminadas a tempo, poderão ocorrer graves anomalias levando a uma condição de perigo para o ser humano. O diagnóstico de falhas dos sistemas hidráulicos se torna um grande desafio, e com o avanço da inteligência artificial, se torna possível realizar um diagnóstico baseado em sinais de campo, como vibrações, temperatura e pressão. A manutenção é um dos fatores cruciais para se obter um ambiente industrial competitivo (Borjalilu; Ghambari, 2018; Dai *et al.*, 2019).

O conceito de manutenção industrial não se encontra no topo do negócio de uma organização, no entanto, os custos de manutenção podem representar mais de 50% dos custos de produção. O principal papel dos gestores numa organização é manter sempre o sistema operacional ativo, adaptando métodos de manutenção apropriados para cada tipo de equipamento (Baidya *et al.*, 2018; Ohta *et al.*, 2020).

As indústrias almejam melhorar continuamente a qualidade dos seus produtos, de modo a poder atender às exigências do mercado, a um mínimo custo possível. Uma produção eficiente e sustentável, assim como uma manutenção confiável, são itens primordiais para a sobrevivência das organizações (Nedjwa *et al.*, 2022).

As tendências de globalização são constantes, e as empresas tendem a implantar medidas proativas. Na indústria siderúrgica, os equipamentos sujeitam-se a falhas aleatórias levando os gerentes de manutenção a se comprometer com o processo de produção (Shahin *et al.*, 2018; Arena *et al.*, 2020).

Em plantas industriais, a manutenção desempenha um papel crucial nos processos operacionais, onde alguns tipos de avarias em certos equipamentos podem proporcionar consequências graves, como desastres ambientais ou acidentes pessoais. Esses problemas podem resultar numa paralisação da produção, levando a uma pesada perda de lucros (Alenany *et al.*, 2021).

O aumento da confiabilidade dos ativos dentro de uma organização possui um papel fundamental para se alcançar uma maior margem de lucratividade, visando a redução dos custos de produção. O contexto manutenção se encontra em constante evolução. A seleção de uma estratégia de manutenção é uma decisão frequentemente tomada com incerteza ou subjetividade. Essa decisão envolve a priorização de fatores críticos, uma vez que vários fatores devem ser considerados simultaneamente (Ohta, 2018; Quatrini *et al.*, 2020).

A melhoria contínua numa organização requer estratégias específicas para alcançar os seus objetivos principais. A implementação de projetos concentra-se principalmente numa melhoria do desempenho operacional, o que influencia diretamente o resultado da empresa. Os erros mais comuns na seleção de projetos se encontram relacionados com uma escolha inadequada de recursos. Portanto, a priorização de um determinado projeto é um processo que visa criar uma classificação de critérios relevantes pré-estabelecidos, de modo a poder atribuir os recursos de uma forma eficaz (Rudnik *et al.*, 2021).

Para as empresas que desejam se tornar competitivas num mercado cada vez mais resiliente e próspero, se faz fundamental a existência de parceiros nas suas operações comerciais, assim como nas cadeias de abastecimento. A seleção de fornecedores é uma das decisões mais importantes no processo de compra de uma

organização, visando aumentar a competitividade e a satisfação do cliente (Wang *et al.*, 2022).

Os fornecedores impactam toda a cadeia de abastecimento, bem como no desempenho e sustentabilidade de uma organização. O processo de seleção de fornecedores deve ser estruturado, incluindo vários critérios, muitas vezes contraditórios. Os métodos de análise de decisão multicritério (MCDA - *Multi-criteria decision analysis*) podem contribuir para a tomada de decisão por parte dos gestores (Ortiz-Barrios *et al.*, 2021; Depczyński, 2021).

As indústrias necessitam reduzir os custos de produção e melhorar rentabilidade das suas operações comerciais devido à concorrência global. O provisionamento de peças sobressalentes se equaciona como um fator crítico na eficiência da manutenção de ativos de uma organização, podendo comprometer a sua competitividade. O papel da gestão do inventário de peças sobressalentes se torna um desafio, uma vez que nem sempre é possível evitar avarias imprevistas, que reduzem a disponibilidade e o desempenho dos ativos (Antosz; Ratnayake, 2019).

O controle do inventário se faz necessário no ambiente industrial, uma vez que se torna imprescindível fornecer o artigo certo, na quantidade certa e no momento certo, almejando melhorar o controle de estoques, de modo a poder proporcionar um custo mínimo possível. Assim sendo, o planejamento do inventário requer uma atenção substancial por parte da gestão das organizações (Mallick *et al.*, 2019).

Uma estratégia apropriada de controle de estoques para cada peça sobressalente, se torna um desafio significativo para a área de gestão de uma organização. As peças sobressalentes são essenciais para manter o equipamento em funcionamento contínuo, proporcionando o tempo mínimo de inatividade dos ativos de uma empresa. O custo das peças sobressalentes se encontra altamente associado ao custo do ciclo de vida do equipamento. Assim sendo, a gestão de um inventário se faz fundamental, uma vez que se existir excesso de sobressalentes, consequentemente existirá um aumento do custo. É prática comum classificar as peças sobressalentes para uma gestão de inventário bem-sucedido, de acordo com alguns métodos de classificação (Hu *et al.*, 2018).

A manutenção representa um papel indispensável no setor produtivo de uma organização, sendo ela responsável pela disponibilidade dos ativos. Os sistemas hidráulicos se encontram presentes em todos os setores industriais, apresentando um desenvolvimento considerável nos mais variados segmentos do mercado, sendo um

dos principais meios para controle de movimentos e transmissão de energia. Uma parada inesperada de um sistema hidráulico poderá proporcionar elevadas perdas de produção, riscos operacionais, ambientais e de segurança, gerando elevadas perdas monetárias para uma empresa (Torre, 2023).

Neste contexto, a gestão da manutenção destes insumos necessita de tratamento adequado, podendo as técnicas de decisão multicritério ajudar a fundamentar decisões de acordo com o nível de serviço desejado, a um menor custo possível.

1.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A investigação bibliométrica possui um crescimento considerável, onde as áreas de negócios, gestão e contabilidade, economia, finanças, ciências sociais, classificados pela base de dados Scopus, atingiu em média 1.021 publicações por ano (2011 a 2020), comparativamente com 170 publicações no ano de 2005 (Mukherjee *et al.*, 2022).

A análise bibliométrica é uma área de investigação que utiliza métodos quantitativos e dados matemáticos, utilizados para analisar publicações científicas, podendo incluir uma visão ampla dos nomes dos autores mais influentes na área da ciência (Patil *et al.*, 2025; Mas-Tur *et al.*, 2020; Broadus, 1987).

Um estudo bibliométrico é uma abordagem para identificar as principais tendências em termos de temas, citação de artigos, autores, instituições e países. A bibliometria ajuda a explorar, organizar e analisar grandes quantidades de dados, tornando possível conhecer o passado e desenvolver linhas de investigação por meio de indicadores (Gaviria-Marin *et al.*, 2018).

Uma análise bibliométrica consiste numa abordagem científica avançada que almeja compreender de forma abrangente qualquer domínio de estudo (Bahuguna *et al.*, 2023). As mais relevantes leis bibliométricas se coadunam pela Lei de Lotka, que consiste na produtividade científica dos autores, na lei de Bradford, que compreende a produtividade dos periódicos, e a Lei de Zipf, que abrange a frequência de palavras (Guedes; Borschiver, 2005).

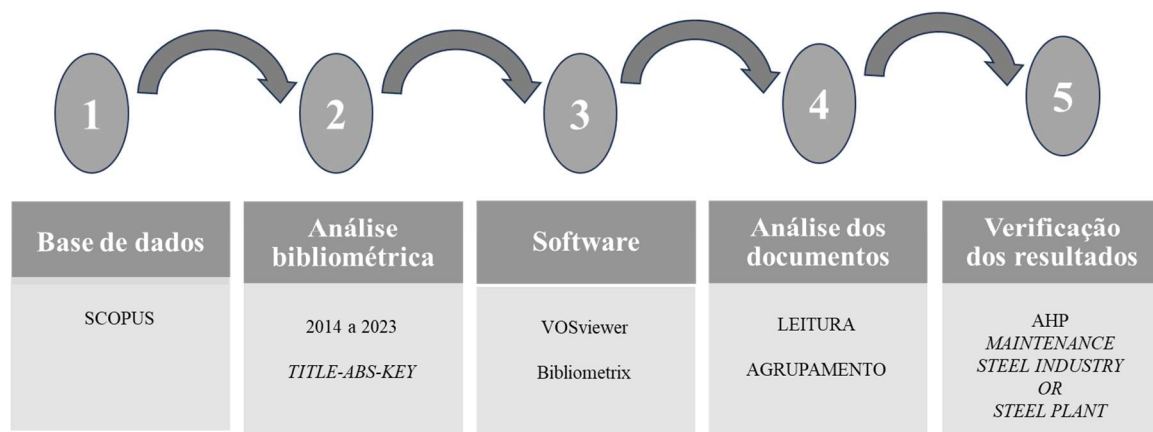
Conforme Guedes e Borschiver (2005), a Lei de Lotka se encontra associada à produção dos autores, pressupondo que alguns autores publicam muito

e outros publicam pouco. De acordo com Brookes (1969), a Lei de Bradford consiste na medida em que os artigos são desenvolvidos sobre um novo tema, eles são submetidos em revistas significantes, e ao serem aceitos, essas revistas irão atrair outros artigos conforme a área temática se expande. Agostino *et al.* (2020), referem que a Lei de Zipf calcula a frequência de ocorrências de termos na literatura vigente, de modo a poder gerar uma lista dos termos mais utilizados numa determinada área de pesquisa.

De acordo com Gontijo *et al.* (2025), se torna essencial entender o significado das leis bibliométricas, como a Lei de Lotka, a Lei de Zipf e a Lei de Bradford, visando compreender os padrões de geração de conhecimento científico. Essas leis, quando empregadas na metodologia bibliométrica, proporcionam uma perspectiva valiosa da produção acadêmica, possibilitando uma avaliação mais detalhada da dinâmica da pesquisa científica.

A presente Tese selecionou artigos que descrevem a utilização do método de tomada de decisão (AHP), de modo a poder aplicar os conceitos à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em empresas siderúrgicas. Para atingir esse fim, conduziram-se cinco etapas, conforme Figura 1.

Figura 1 - Etapas da pesquisa bibliográfica



Fonte: O autor

A primeira etapa consistiu em escolher a base de dados. Atualmente, as duas bases de dados mais importantes para efetuar uma análise de bibliometria são a Clarivate's Web of Science ou Elsevier's Scopus. A base de dados Scopus cobre mais de 1,7 mil milhões de citações, enquanto a Web of Science cobre em torno de 1,8 mil milhões (Kottner; El Genedy-Kalyoncu, 2022).

A segunda etapa se compreendeu numa análise bibliométrica, onde os principais termos de pesquisa foram selecionados nas bases de dados Scopus e Web of Science de 2014 a 2023. Levou-se em consideração os termos título, resumo e palavras-chave (*TITLE-ABS-KEY*), onde se identificou os documentos - (*TITLE-ABS-KEY (AHP) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2024; TITLE-ABS-KEY (MAINTENANCE) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2024; TITLE-ABS-KEY ("STEEL AND INDUSTRY") OR TITLE-ABS-KEY ("STEEL AND PLANT") AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2024*). As questões relacionadas com os termos *AHP*, *Maintenance*, *Steel Industry* e *Steel Plant* se correlacionam aos critérios, que serão discutidos na próxima secção.

A terceira etapa compreendeu uma pesquisa por meio das ferramentas de software *VOSViewer*, e *Bibliometrix*. O *VOSViewer* é utilizado para agrupar publicações e analisar os agrupamentos resultantes na literatura (Van Eck; Waltman, 2017; Martins *et al.*, 2024), já o *Bibliometrix*, disponibiliza um conjunto de ferramentas por meio de uma análise quantitativa, visando auxiliar os pesquisadores a realizarem uma análise bibliométrica (Shao *et al.*, 2023).

A quarta etapa abordou a leitura dos documentos selecionados na etapa 2, onde se interpretou os agrupamentos obtidos na etapa 3, conforme as palavras-chave “AHP”, “MAINTENANCE”, “STEEL INDUSTRY” OR “STEEL PLANT”.

A quinta etapa compreendeu uma verificação dos resultados obtidos.

A Tabela 1 apresenta os resultados da pesquisa das bases de dados Scopus e Web of Science por meio das palavras-chave “AHP”, “MAINTENANCE”, “STEEL INDUSTRY” OR “STEEL PLANT” segundo a seleção “TITLE-ABS-KEY”, com um período de um ano entre eles. Adotou-se como critério os artigos publicados entre os anos de 2014 a 2023, de forma individual para cada base de dados.

Tabela 1 - Documentos da pesquisa das bases de dados Scopus e Web of Science
(continua)

Ano	AHP		Maintenance		“Steel industry” OR “Steel Plant”	
	Scopus	Web of Science	Scopus	Web of Science	Scopus	Web of Science
2023	4.224	2.457	45.025	27.744	1.087	585
2022	4.191	2.862	46.280	31.693	1.100	601
2021	3.979	2.646	44.896	32.674	1.139	506
2020	3.585	2.412	41.111	30.386	1.206	513

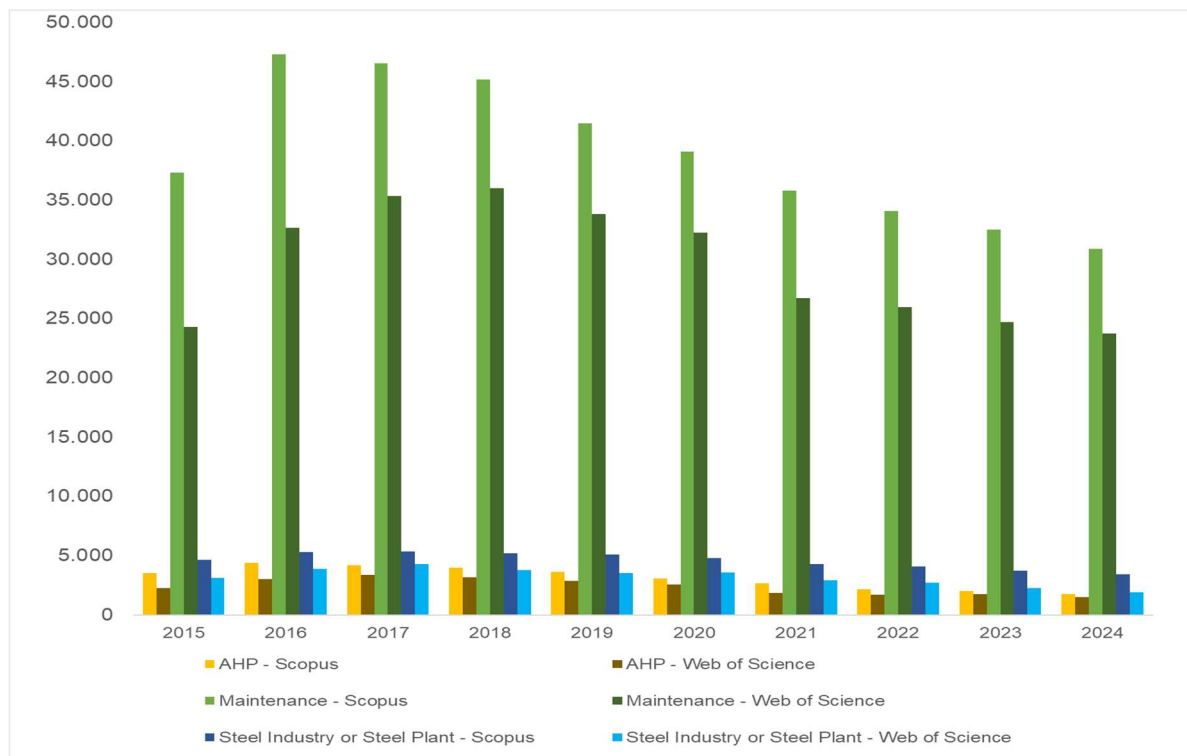
Tabela 1 - Documentos da pesquisa das bases de dados Scopus e Web of Science
(conclusão)

Ano	AHP		Maintenance		"Steel industry" OR "Steel Plant"	
	Scopus	Web of Science	Scopus	Web of Science	Scopus	Web of Science
2019	3.034	2.125	38.961	28.994	915	435
2018	2.651	1.581	35.788	24.039	855	380
2017	2.154	1.485	34.083	23.398	825	356
2016	2.022	1.557	32.493	22.413	890	351
2015	1.754	1.319	30.901	21.430	725	274
2014	2.057	1.194	31.516	20.498	708	339
Total	29.651	19.638	381.054	263.269	9.450	4.340

Fonte: Scopus & Web of Science (2023)

A classificação totalizou 820.006 artigos científicos. A Figura 2 mostra a evolução das publicações de 2014 a 2023.

Figura 2 - Número total de publicações de 2014 a 2023



Fonte: Scopus & Web of Science (2023)

Ambas as bases de dados possuem conteúdos semelhantes, porém selecionou-se a base de dados Scopus por disponibilizar mais artigos científicos pertinentes ao tema. De acordo com Nawaser *et al.* (2024), a base de dados Scopus

inclui mais de 1,7 mil milhões de citações, oferecendo uma ampla cobertura de dados bibliográficos.

Outro motivo se deu pela uniformidade das características da pesquisa, onde existe a possibilidade de efetuar uma busca em cadeamento. Outro ponto a salientar, é que a base de dados Scopus permite a utilização das ferramentas de software VOSViewer e o pacote *Bibliometrix* do programa R.

Na pesquisa efetuada na base de dados Scopus, verificou-se que existiam documentos que não estavam alinhados com os objetivos da Tese. Existiam documentos que falavam sobre a AHP, mas não sobre Manutenção, e vice-versa. Por exemplo, o documento mais citado sobre AHP, publicado no período de 2014 a 2023, é um artigo sobre “o melhor/pior método de tomada de decisão multicritério” (Rezaei, 2015), não fazendo referência à manutenção ou siderurgia.

Por meio das combinações de operadores booleanos *AND* / *OR* com as palavras AHP *AND* MAINTENACE (1072), MAINTENACE *AND* “STEEL INDUSTRY” *OR* “STEEL PLANT” (274), AHP *AND* “STEEL INDUSTRY” *OR* “STEEL PLANT” (51), obteve-se um total de 1397 artigos científicos de acordo com a Tabela 2, conforme (TITLE-ABS-KEY (AHP) *AND* TITLE-ABS-KEY (MAINTENANCE) *AND* TITLE-ABS-KEY (“STEEL INDUSTRY”) *OR* TITLE-ABS-KEY (“STEEL PLANT”)) *AND* PUBYEAR > 2014 *AND* PUBYEAR < 2023. Os critérios de inclusão se encontram associados a artigos de pesquisa ou artigos de revisão, artigos escritos em inglês, e publicados entre anos de 2014 a 2023.

Tabela 2 - Total de documentos científicos da base de dados Scopus

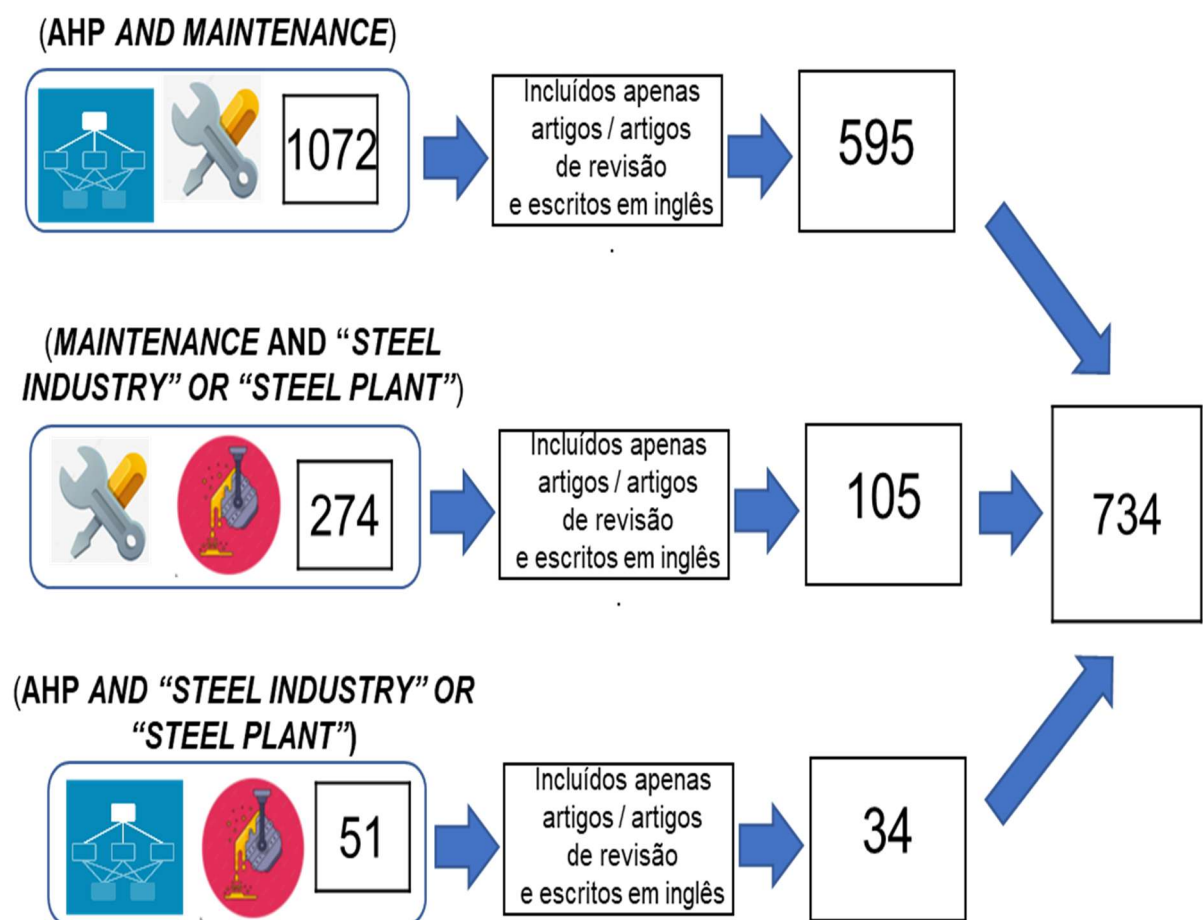
Ano	AHP AND MAINTENANCE	MAINTENANCE AND “STEEL INDUSTRY” OR “STEEL PLANT”	AHP AND “STEEL INDUSTRY” OR “STEEL PLANT”
2023	152	25	6
2022	135	27	2
2021	153	46	10
2020	130	53	8
2019	118	31	3
2018	93	23	8
2017	83	21	3
2016	70	25	2
2015	67	11	5
2014	71	12	4
Total	1072	274	51

Fonte: Scopus (2023)

a) Lista dos documentos selecionados

Os critérios de inclusão se encontram associados a artigos ou artigos de revisão, artigos escritos em inglês, e publicados entre anos de 2014 a 2023, tendo sido selecionados 734 documentos com as respectivas palavras-chave, conforme Figura 3.

Figura 3 - Seleção de artigos científicos



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 3 cita os artigos científicos que obtiveram a maior citação por palavra-chave, assim como a referência bibliográfica contendo o autor, o nome do artigo e o ano em que foi publicado.

Tabela 3 - Artigos mais citados por palavra-chave

Palavras chave	Citações	Referência
AHP AND Maintenance	294	<i>An investigation on lean-green implementation practices in Indian SMEs using Analytical Hierarchy Process (AHP) approach.</i> (Thanki et al., 2016)
Maintenance AND "Steel industry" OR "Steel Plant"	107	<i>Energy-saving and emission-reduction technology selection and CO2 emission reduction potential of China's iron and steel industry under energy substitution policy.</i> (Tan et al., 2019)
AHP AND "Steel industry" OR "Steel Plant"	272	<i>Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under Fuzzy environment.</i> (Fattahi; Khalilzadeh, 2018)

Fonte: Scopus (2023)

De acordo com a Lei de Bradford, verificaram-se 425 fontes que publicaram artigos sobre Siderurgia, Manutenção e AHP, onde os periódicos mais relevantes se encontram listados na Tabela 4. Entre eles, o periódico com o maior número de publicações é *Sustainability (Switzerland)* – com 29 artigos, seguida do *Applied Sciences (Switzerland)* - 16 publicações. Os restantes periódicos publicaram entre 1 e 10 artigos cada.

Assim, pode-se concluir que a Lei de Bradford foi cumprida, uma vez que apenas dezesseis periódicos são responsáveis por 21,39% dos artigos, estando os restantes 78,61% distribuídos pelas restantes periódicos.

Tabela 4 - Principais periódicos

(continua)

Journal	Rank	Artigos
<i>Sustainability (Switzerland)</i>	1	29
<i>Applied Sciences (Switzerland)</i>	2	16
<i>International Journal of Quality and Reliability Management</i>	3	14
<i>Energies</i>	4	10
<i>Journal of Quality in Maintenance Engineering</i>	4	10
<i>Water (Switzerland)</i>	4	10
<i>Mathematical Problems in Engineering</i>	5	9

Tabela 4 - Principais periódicos

(conclusão)

Journal	Rank	Artigos
<i>Iron and Steel Technology</i>	6	8
<i>International Journal of Industrial and Systems Engineering</i>	7	7
<i>Journal of Cleaner Production</i>	7	7
<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	7	7
<i>IEEE Access</i>	8	6
<i>International Journal of Pavement Research and Technology</i>	8	6
<i>International Journal of Productivity and Quality Management</i>	8	6
<i>Journal of Intelligent and Fuzzy Systems</i>	8	6
<i>Safety Science</i>	8	6

Fonte: *Bibliometrix* (2023)

A Lei de Lotka refere-se à produtividade dos autores, mostrando que grande parte da literatura é produzida por poucos autores, o que identifica os núcleos de pesquisa de uma determinada área. Dos 734 artigos analisados, identificamos 2334 autores, onde podemos concluir que a Lei de Lotka foi cumprida. A Tabela 5 apresenta o número de autores de acordo com os documentos elaborados.

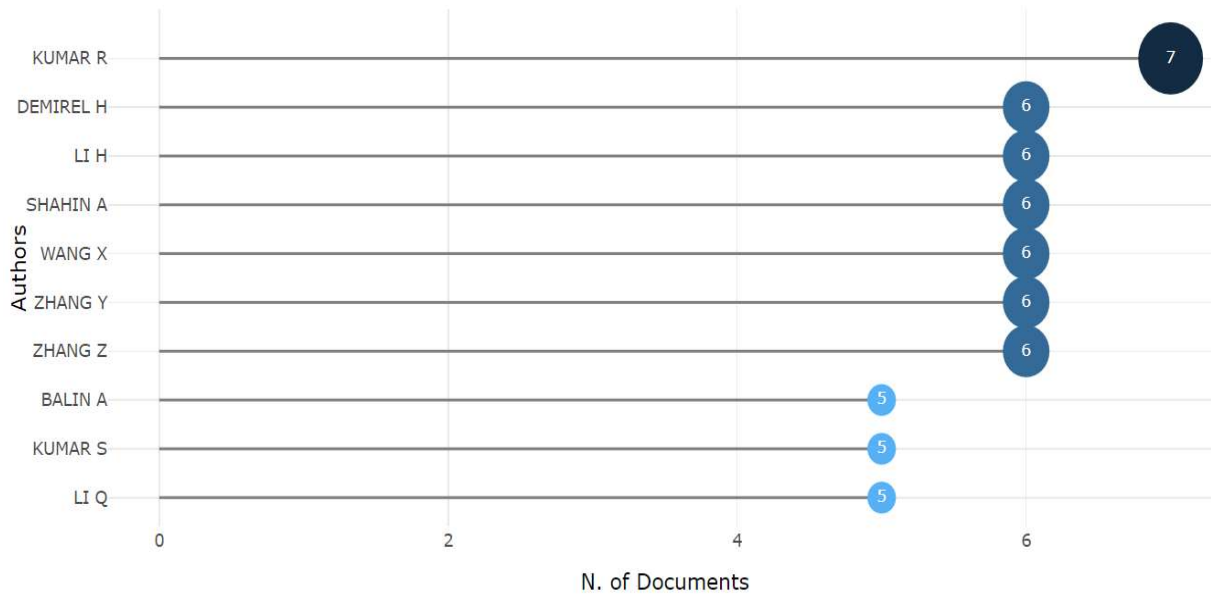
Tabela 5 - Número de autores de acordo com os documentos escritos

Documentos elaborados	N. de autores	Proporcional
1	2083	89,2 %
2	174	7,5%
3	45	1,9%
4	19	0,8%
5	6	0,3%
6	6	0,3%

Fonte: *Bibliometrix* (2023)

Ao se avaliar a produção científica desses autores, verifica-se que Kumar R., detém sete publicações, seguido de Demirel, Li H., Shain, Wang, Zhang Y., Zhang Z., com seis publicações cada, e Balin, Kumar S. e Li Q., com cinco publicações cada. Assim, os autores com maior número de publicações, se encontra listado conforme Figura 4.

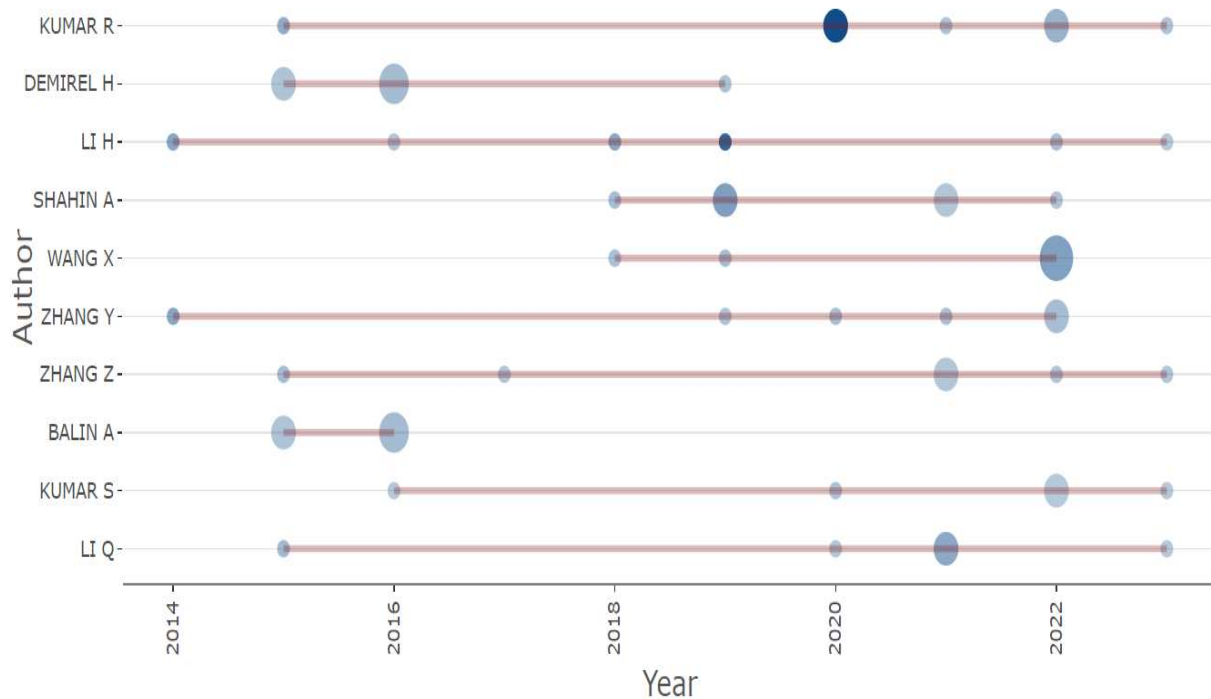
Figura 4 - Principais autores



Fonte: *Bibliometrix* (2023)

Outro ponto diz respeito à produção científica recente desses autores, cuja maioria publicou em 2022, sendo que Demirel e Balin publicaram a maior parte de seus artigos em 2016, e Li, Shain e Zhang Z. publicaram a maior parte em 2021, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição da produção científica ao longo do tempo

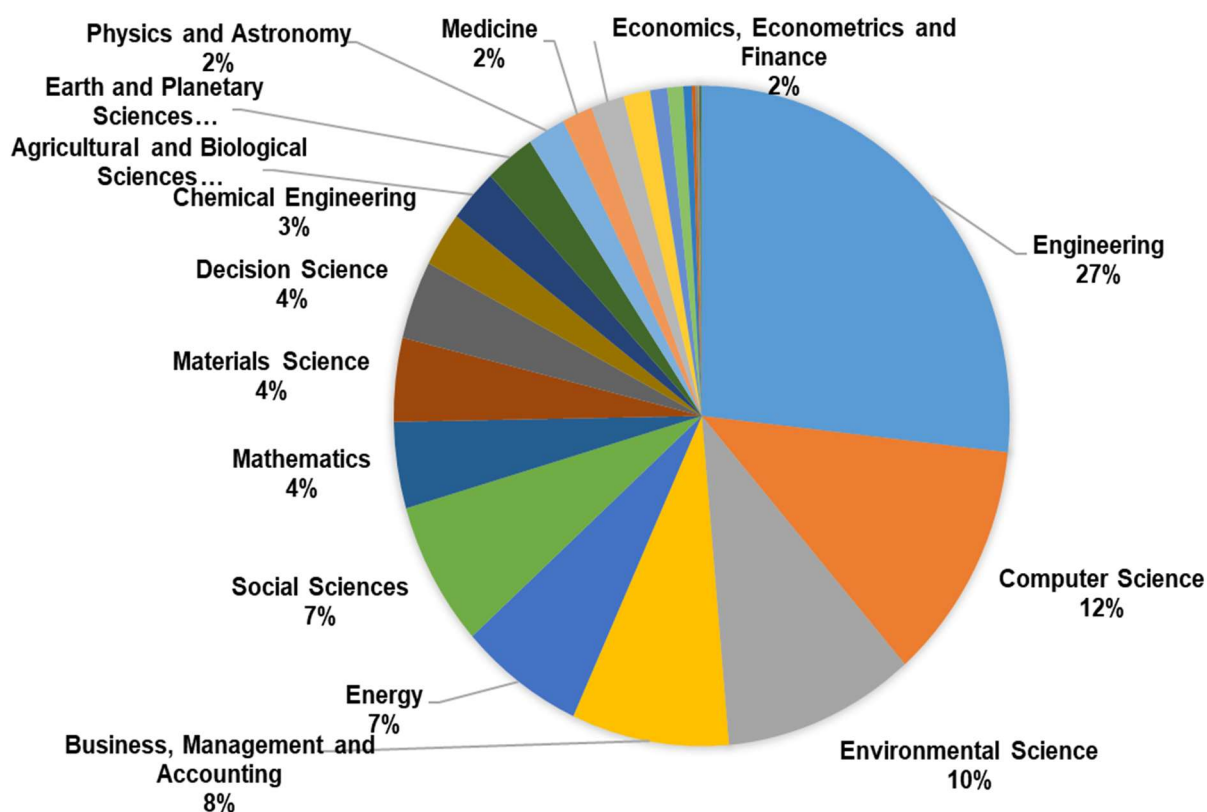


Fonte: *Bibliometrix* (2023)

A Figura 6 apresenta as áreas temáticas. Verifica-se que as áreas de Engenharia (27%), Ciências Computacionais (12%), Ciências do Ambiente (10%) e Negócios Gestão e Contabilidade (8%), são as áreas de domínio no tema.

As demais áreas do conhecimento se encontram classificadas como: Energia; Ciências Sociais; Matemática; Ciência dos Materiais; Ciência da Decisão Engenharia Química; Ciências Agrárias e Biológicas; Ciências da Terra e Planetárias; Física e Astronomia; Medicina; Economia, Econometria e Finanças.

Figura 6 - Distribuição dos artigos por área temática



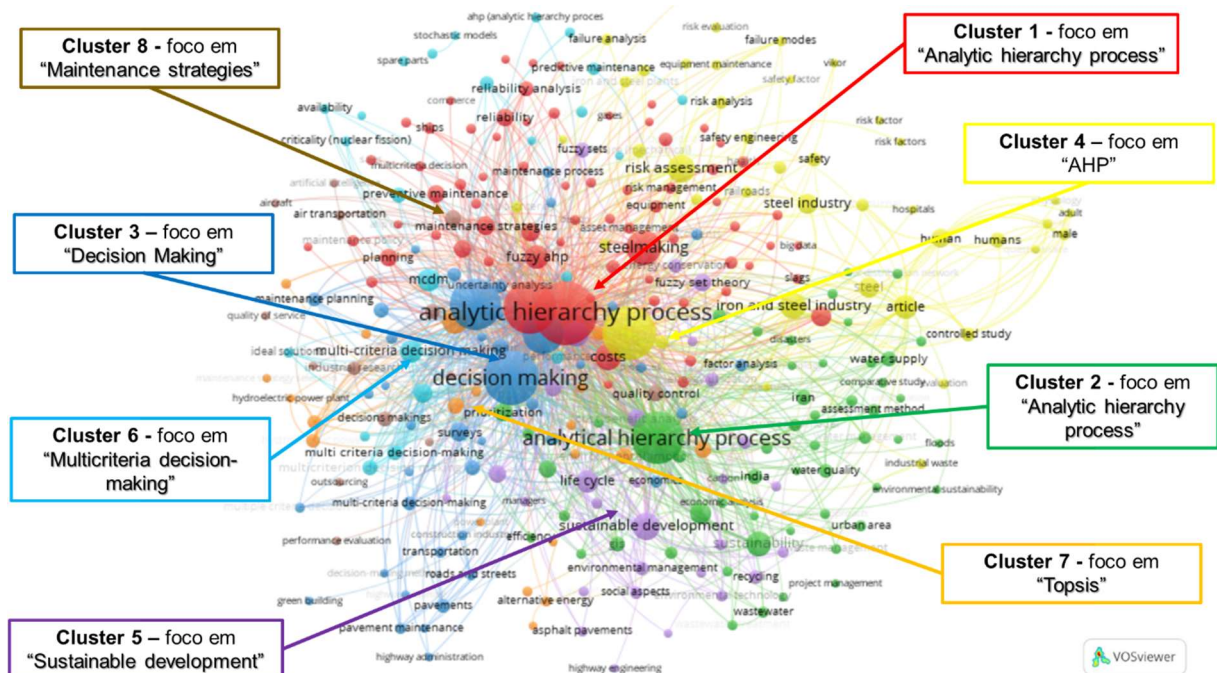
Fonte: Scopus (2023)

A distribuição por países dos autores dos artigos se consta conforme a Figura 7, onde a China se destaca com 136 artigos publicados, seguida da Índia (126), Irão (67) e Estados Unidos (54). Os demais países listados aparecem com menos de 50 artigos.

b) *Networks* de palavras-chave

Os dados foram mapeados com a ferramenta de construção e visualização de redes bibliométricas *VOSviewer*, utilizando o recurso de criação de grafos baseados em dados bibliográficos com análise do tipo co-ocorrência entre todas as palavras-chave. Foram detectadas 5996 palavras chaves com no mínimo 5 ocorrências para integrar a análise, resultando em vários núcleos conectados, cumprindo a Lei de Zipf. O grafo foi obtido pelo método *full counting*. Observaram-se oito *clusters* diferenciados por cores conforme: Analytic Hierarchy Process, Analytical Hierarchy Process, *Decision-making*, AHP, *Sustainable development*, *Muti-criteria decision-making*, *Topsis*, and *Maintenance strategies*, de acordo com a Figura 9.

Figura 9 - Distribuição dos artigos por área de pesquisa



Fonte: VOSviewer (2023)

- *Cluster 1* (vermelho) destaca setenta postos-chave, onde os principais são: Processo de hierarquia analítica; Siderurgia; Sistemas hierárquicos; Custos; Fiabilidade; Estratégias de manutenção e Gestão da manutenção. A discussão incluiu o processo de hierarquia analítica correlacionado com a indústria siderúrgica e a manutenção.

- *Cluster 2* (verde) destaca cinquenta postos-chave, onde os principais são: Processo hierárquico analítico; Análises multicritério; Sistema de apoio à decisão; Sustentabilidade e Priorização. Nesta altura, o debate centra-se no processo de hierarquia analítica e na sustentabilidade.
- *Cluster 3* (azul) destaca quarenta e dois postos-chave, onde os principais são: Tomada de decisão; Manutenção; Processo de hierarquia analítica e *Muti-criteria decision-making*. Este tema aborda questões relacionadas com a manutenção e o processo de hierarquia analítica AHP.
- *Cluster 4* (amarelo) destaca quarenta e dois postos-chave, onde os principais são: AHP; Indústria siderúrgica; Avaliação de riscos; Prevenção de acidentes e Aço. Esta secção dá ênfase ao método AHP, utilizando sistemas hierárquicos na indústria siderúrgica.
- *Cluster 5* (roxo) destaca vinte e nove postos-chave, onde os principais são: Desenvolvimento sustentável, Análise do ciclo de vida, Avaliação do ciclo de vida e *Muti-criteria decision-making*. Esta secção aborda especificamente a tomada de decisões com critérios múltiplos em matéria de sustentabilidade.
- *Cluster 6* (azul claro) destaca vinte e quatro postos-chave, onde os principais são: *Muti-criteria decision-making*; MCDM e Manutenção. Este tema aborda questões relacionadas com a MCDM.
- *Cluster 7* destaca vinte postos-chave, onde os principais são: Topsis; Lógica *Fuzzy*; Matemática *Fuzzy*; Estratégia de manutenção e Monitoramento. Este tema aborda questões relacionadas com a análise MCDM.
- *Cluster 8* destaca catorze postos-chave, onde os principais são: Estratégia de manutenção; Atividade de manutenção; Tomada de decisão e Sistemas de apoio à decisão. Este tema aborda questões relacionadas com a análise MCDM no que respeita às estratégias de manutenção.

Observaram-se que os *clusters* vermelho e verde possuem a maior frequência de termos, concentrando-se em Analytic Hierarchy Process.

Posteriormente segue-se o cluster azul, que se foca em *Decision-making* e *Maintenance*. A palavra AHP é encontrada em pelo menos um termo em quase todos os *clusters*, poucos estudos foram publicados sobre AHP, manutenção e a indústria siderúrgica.

O pacote *Bibliometrix* do R permitiu analisar a relevância e o desenvolvimento do tema do documento, compreendido com o número de publicações e com o fator de impacto H.

Conforme Ahn *et al.* (2024), os temas de investigação são categorizados em quatro quadrantes, conforme:

a) Temas Motores (quadrante superior direito): Estes temas têm uma elevada centralidade e densidade, ou seja, estão bem desenvolvidos e são centrais para o domínio da investigação. São o foco central da investigação atual e os principais motores do progresso no domínio.

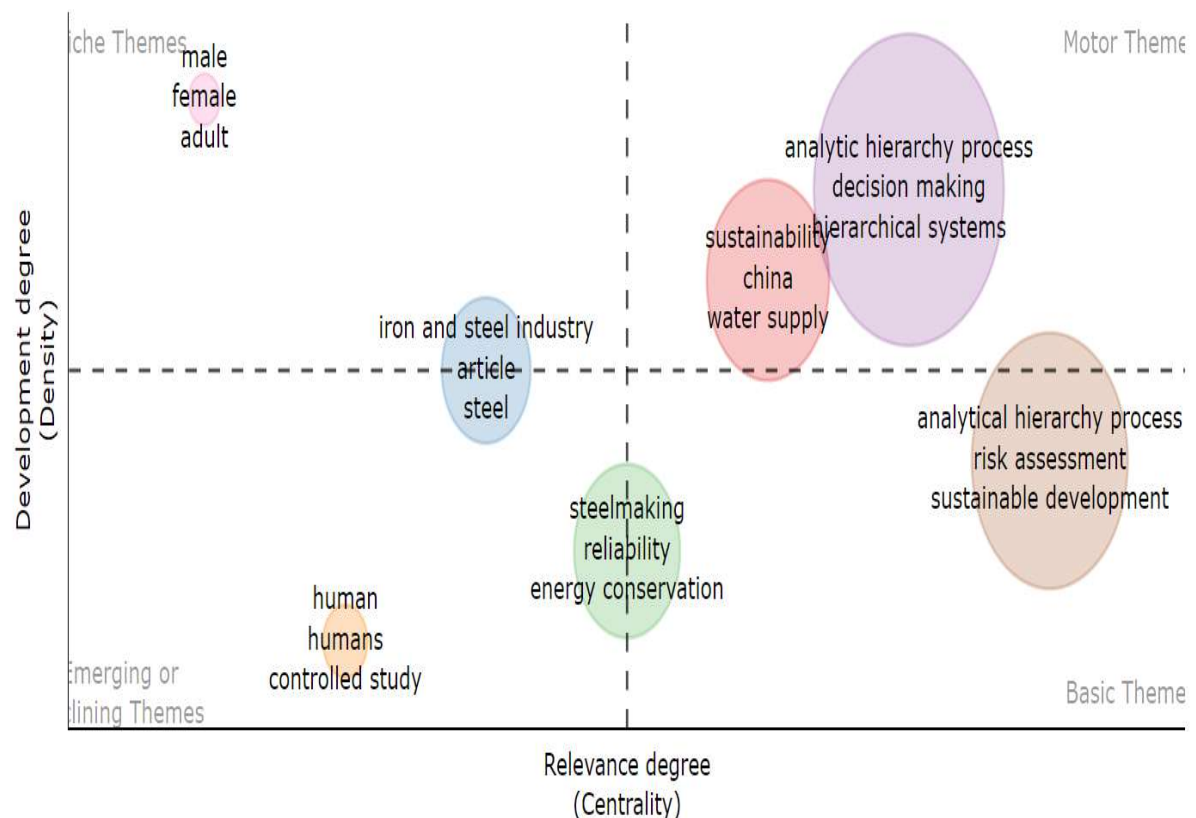
b) Temas de nicho (quadrante superior esquerdo): Estes temas apresentam uma densidade elevada, mas uma centralidade baixa. Embora estes temas estejam bem desenvolvidos e sejam especializados, estão menos ligados ao panorama mais vasto da investigação e tendem a estar um pouco isolados da investigação convencional.

c) Temas emergentes ou em declínio (quadrante inferior esquerdo): Estes temas apresentam baixa centralidade e baixa densidade. Constituem áreas de investigação recentemente emergentes ou que se estão a tornar menos importantes. A sua importância futura dependerá da evolução do domínio.

d) Temas de base (quadrante inferior direito): Estes temas têm uma centralidade elevada, mas uma densidade baixa. Enquanto forem centrais para o domínio de investigação, os temas permanecem pouco desenvolvidos e têm possibilidades de expansão futura e de investigação suplementar.

Pode-se observar que de acordo com a Figura 10, o tema AHP aparece no quadrante superior - Temas Motores, onde se diagnostica que este tema se encontra em franca expansão, tonando-se relevante no meio científico, proporcionando vastos campos de estudo. O tema Produção de Aço aparece no quadrante inferior esquerdo - Temas Emergentes ou em Declínio, porém se encontra muito mais próximo do quadrante - Temas Nichos, do que do quadrante - Temas Básicos. Assim, observa-se que existem oportunidades para a produção científica abrangendo o método AHP, aplicado em indústrias siderúrgicas.

Figura 10 - Mapa temático por relevância e grau de desenvolvimento

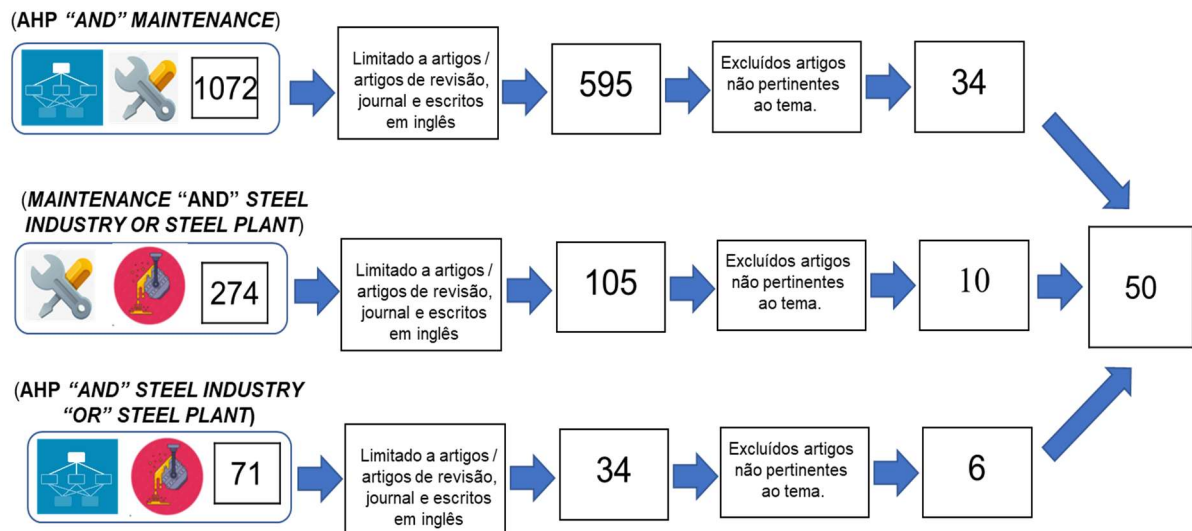


Fonte: *Bibliometrix* (2023)

Neste contexto, a análise bibliométrica contribuiu para o estudo dos aspectos quantitativos de produção, assim como para identificar as publicações pertinentes ao tema desta Tese. Assim, tornou-se possível efetuar uma análise de conteúdo, almejando identificar os critérios e subcritérios para a elaboração dos *frameworks* pretendidos e posterior aplicação do método AHP, no contexto da gestão da manutenção em indústrias siderúrgicas, aplicado a sistemas hidráulicos.

Dos 734 artigos identificados na análise bibliométrica, excluíram-se os artigos não pertinentes ao tema por meio de uma análise de título, resumo e conteúdo de cada documento. Assim, selecionaram-se apenas 50 artigos científicos por meio das suas principais palavras-chave, conforme Figura 11.

Figura 11 - Seleção de artigos científicos pertinentes ao tema



Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio dos cinquenta artigos selecionados, identificaram-se as seguintes oportunidades de pesquisa de acordo com a Quadro 1, que por sua vez se encontram relacionadas com as dificuldades encontradas no gerenciamento de manutenção dos sistemas hidráulicos, em usinas siderúrgicas.

Quadro 1 - Oportunidades de pesquisa

(continua)

Artigo	Autor	Gap / Oportunidade de Pesquisa
<i>Resilient and sustainable supplier selection via a new framework: a case study from the steel industry</i>	Ghamari et al. (2022)	- A metodologia utilizada para a seleção de fornecedores, requer uma maior investigação, como aumentar o número de critérios e/ou de especialistas, e aplicar o método proposto noutros sectores. - Aplicar o <i>framework</i> sugerido em processos de avaliação de outros domínios, como a seleção de projetos.
<i>Maintenance strategy selection: a combined goal programming approach and BWM-TOPSIS for paper production industry</i>	Darestani et al. (2022)	- A definição de prioridades de equipamento em domínios especiais pode ser um bom tópico para estudos futuros. - Os processos de classificação e avaliação da estratégia de manutenção são uma boa oportunidade para identificar os pontos fortes e fracos de uma empresa e podem ser utilizados como principal <i>input</i> para a programação da estratégia da empresa em estudos futuros. - Utilizar o AHP ou o Fuzzy ANP na melhor e na pior fase, adicionar critérios de decisão.

Quadro 1 - Oportunidades de pesquisa

(conclusão)

Artigo	Autor	Gap / Oportunidade de Pesquisa
<i>Spare parts' criticality assessment and prioritization for enhancing manufacturing systems' availability and reliability.</i>	Antosz; Ratnayake (2019)	- Aplicar o método noutras empresas de diferentes tipos e ramos. Análise dos custos ou da disponibilidade, o que mostraria que a metodologia proposta tem realmente influência na eficácia da gestão das peças.

Fonte: Elaborado pelo autor

1.3 JUSTIFICATIVA

Por meio dos métodos de MCDM pode-se aumentar a confiabilidade da manutenção dos sistemas hidráulicos, correlacionando os itens que estão mais sujeitos a afetar diretamente a disponibilidade dos ativos. Este documento contempla uma abordagem teórica, de como o método AHP pode aumentar a confiabilidade dos equipamentos hidráulicos por meio da seleção de uma estratégia de manutenção adequada, priorização na seleção de projetos, seleção de fornecedores e gestão de sobressalentes, nomeadamente para indústrias siderúrgicas.

Optou-se pelo método AHP uma vez que corrobora com a possibilidade de aplicação num ambiente operacional, possuindo muitas vantagens, onde se destaca a possibilidade de fornecer uma escala para medir os aspectos intangíveis, e um método matemático que utiliza operações matriciais, de modo a poder estabelecer prioridades. Estas características, juntamente com a capacidade de lidar com múltiplos objetivos, fez do método AHP uma ferramenta peculiar para o problema em questão.

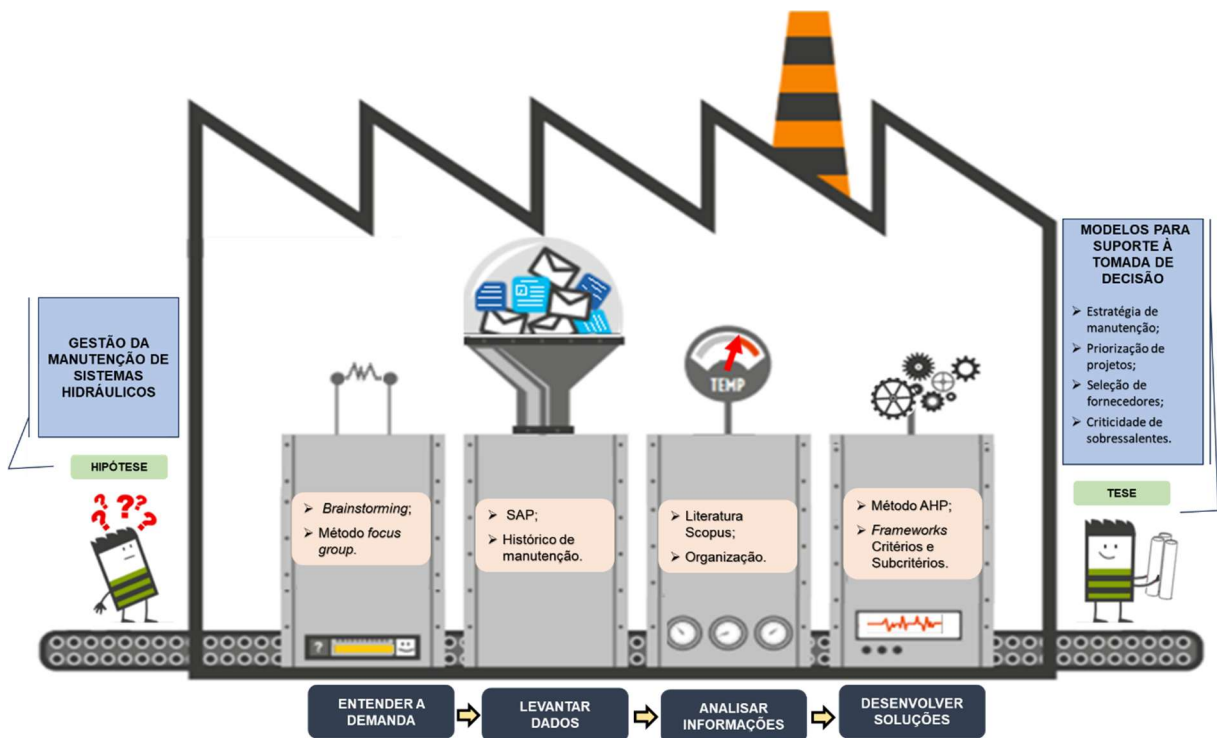
Neste contexto a questão de pesquisa se expressa:

- ✓ De que forma se pode melhorar a gestão de manutenção dos sistemas hidráulicos em usinas siderúrgicas?

A possibilidade de melhorar a gestão de manutenção de sistemas hidráulicos, motivou o desenvolvimento desta Tese para aquisição de novos conhecimentos, e compreensão da realidade por meio dos gestores de manutenção.

Numa tomada de decisão, os modelos propiciam uma orientação sobre como o método será utilizado. Neste contexto, desenvolveu-se a Figura 12, visando representar os elementos envolvidos, compreendendo a Hipótese vs. Tese.

Figura 12 – Hipótese vs. Tese



Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação do método DSR possibilita solucionar questões complexas em ambientes organizacionais, permitindo testar, analisar e desenvolver modelos. Além disso, por meio da aplicação do método de decisão multicritério AHP, é possível lidar com problemas de tomada de decisão, compreendendo modelos que abrangem critérios e subcritérios.

Neste contexto, este documento contribui para o desenvolvimento de modelos que possibilitam uma tomada de decisão com assertividade por parte dos gestores, utilizando métodos de MCDM. A tomada de decisão se adequa conforme o nível de serviço desejado com o menor risco possível, identificando os critérios e subcritérios que satisfazem os requisitos apropriados para uma avaliação crítica da gestão de manutenção de sistemas hidráulicos.

A modelação matemática utilizada nos MCDM passa por três etapas principais, estruturação (que consiste na identificação do objetivo de decisão, critérios

e alternativas), na medição (que é associada à designação de pesos para os critérios e pontuações para cada uma das alternativas) e da síntese dos resultados (Netto *et al.*, 2021).

Existe uma vasta gama de métodos MCDM, onde se destaca o método AHP (Analytic Hierarchy Process), desenvolvido por Saaty (1974) e proposto por Saaty (1980). O método AHP pode ser de grande valia pela sua aplicação e agilidade de utilização, auxiliando a tomada de decisão. O AHP continua sendo o método de tomada de decisões mais utilizado em amplas áreas de conhecimento científico e empresarial (Saaty; Vargas, 2012; Abdulgader *et al.*, 2018; Canco *et al.*, 2021).

1.4 OBJETIVOS

O objetivo geral desta Tese consiste em propor, testar e validar modelos, para suporte à tomada de decisão, visando melhorar a gestão da manutenção dos sistemas hidráulicos, em usinas siderúrgicas.

1.4.1 Objetivos específicos

- Propor, testar e validar modelos para a gestão de manutenção dos sistemas hidráulicos abordando os seguintes pontos:
 - ✓ Seleção de estratégia de manutenção – *Framework*;
 - ✓ Priorização de seleção de projetos – *Framework*;
 - ✓ Seleção de fornecedores – *Framework*;
 - ✓ Avaliação de criticidade de peças sobressalentes - *Framework*.
- Aplicar o método AHP por meio da identificação dos objetivos, dos critérios e subcritérios pertinentes ao problema, que atendam às necessidades da gestão da manutenção de sistemas hidráulicos;
- Validar as opiniões de diferentes especialistas de manutenção, abrangendo a utilização do método AHP.

1.5 MÉTODO DE PESQUISA

1.5.1 Classificação da pesquisa científica

A classificação da pesquisa científica, de acordo com a natureza pode ser classificada como aplicada ou fundamental/básica. Os objetivos se classificam como descritiva, analítica, exploratória e normativa. Quanto à abordagem, pode ser qualitativa, quantitativa ou combinada (Kothari; Garg, 2004).

Relativamente ao método, pode-se classificar como estudo de caso, pesquisa-ação, modelagem e simulação, *design science*, *survey* e pesquisa bibliográfica (Dresch *et al.*, 2015).

Neste contexto, e de acordo com os autores citados, esta Tese pode ser classificada conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação da Tese

Natureza	Aplicada
Objetivos	Normativos
Abordagem	Combinada
Método	<i>Design Science Research (DSR)</i>

Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com a natureza, é aplicada pois, segundo Kothari e Garg, (2004), esta Tese busca solucionar um problema imediato que afeta uma organização.

Os objetivos se enquadram como normativos, uma vez que se encontram ligados a desenvolver políticas, estratégias e ações disponíveis na literatura vigente, para encontrar uma solução ideal para problemas específicos (Bertrand; Fransoo, 2002).

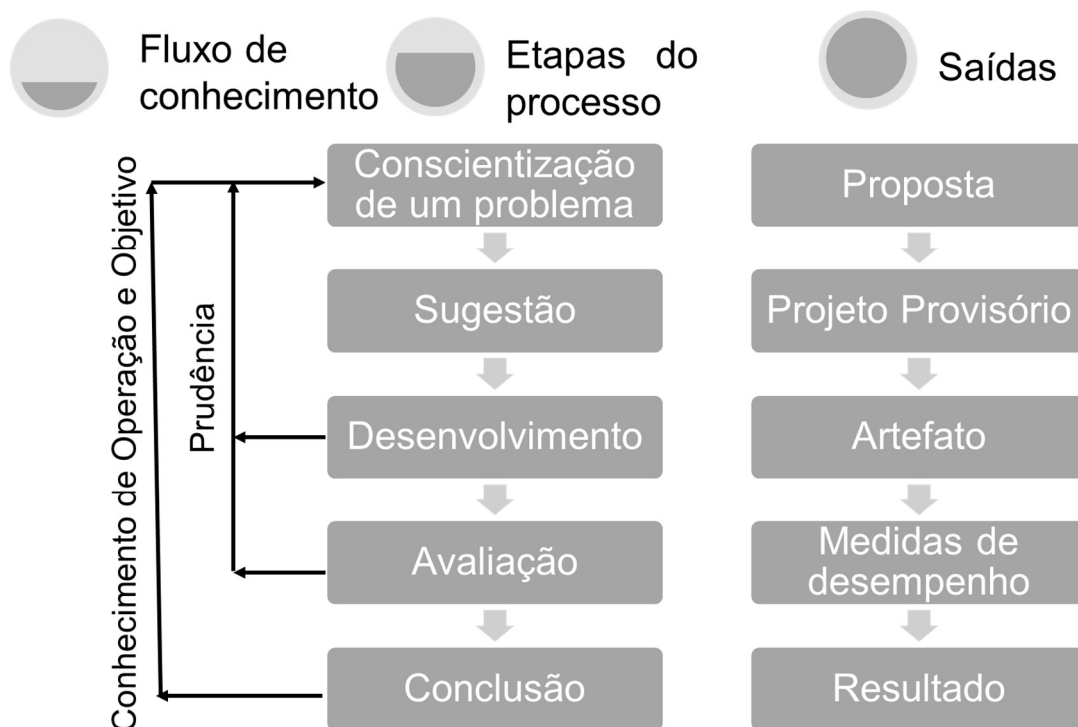
Quanto à abordagem, a Tese se realiza de forma combinada, sendo de caráter quantitativa e qualitativa. Qualitativa uma vez que existe realidade subjetiva de especialistas envolvidos, e se dá de forma quantitativa pelo fato de mensurar variáveis pertinentes à pesquisa (Cauchick *et al.*, 2010).

Em relação ao método se classifica como DSR, uma vez que este método pode ser aplicado para resolver problemas complexos em ambientes organizacionais, de modo a poder, testar, avaliar e desenvolver modelos. A Tese consiste em aplicações de modelos para a gestão de manutenção de sistemas hidráulicos, tirando

vantagem de que o pesquisador se encontra envolvido diretamente com o problema, atuando como consultor e desenvolvedor de soluções. Por meio do software Microsoft Excel, aplicou-se o método AHP, compreendendo alternativas, critérios e subcritérios de acordo com cada *framework* proposto.

Consoante Kuechler e Vaishnavi (2012), a metodologia DSR é composta por cinco etapas: conscientização de um problema, sugestão, desenvolvimento, avaliação e conclusão. A Figura 13 demonstra o modelo de DSR proposto por Takeda *et al.* (1990), e aperfeiçoado por Kuechler e Vaishnavi (2008), de acordo com Carstensen e Bernhard (2019).

Figura 13 - Representação das fases do ciclo básico do método DSR



Fonte: Adaptado de Carstensen e Bernhard (2019)

Conscientização do problema - O pesquisador toma conhecimento de um problema, possivelmente do setor, de novos desenvolvimentos tecnológicos, da leitura de disciplinas relacionadas ou de outras fontes. Após essa conscientização, o pesquisador elabora uma proposta formal ou informal para iniciar um estudo de pesquisa (Kuechler; Vaishnavi, 2008). A pergunta de pesquisa é o resultado desta etapa. Nesse ponto, deve-se tentar obter o máximo possível de informações

relacionadas ao contexto do problema, além de pesquisar bancos de dados de conhecimento pré-existent (Manson, 2006).

Sugestão - O pesquisador pode usar o conhecimento anterior para propor um ou mais artefatos, que possam resolver o problema e melhorar a situação atual (Dresch *et al.*, 2015).

Desenvolvimento - Durante esta etapa, o pesquisador criará um ou mais artefatos. As técnicas usadas podem variar muito, dependendo dos artefatos que vão ser construídos. Alguns exemplos de artefatos são algoritmos com prova formal, software ou sistemas especializados. A construção em si pode não exigir nenhuma novidade além do estado da prática, pois a novidade está principalmente no projeto (Kuechler; Vaishnavi, 2008).

Avaliação - Esta etapa analisa o comportamento do artefato, que consiste na solução para o problema em questão. O teste é um pré-requisito para entender os processos que levam aos resultados desejados. Esta etapa pode ser apoiada por grupos focais, experimentos ou simulações (Goecks *et al.*, 2021). O pesquisador avalia o artefato desenvolvido a partir de uma visão geral teórica, contextualizando um aplicativo estritamente definido (Chaudhuri *et al.*, 2021).

Conclusão - Esta etapa visa a garantir que a pesquisa possa fornecer uma referência para o desenvolvimento do conhecimento nos campos prático e teórico (Dresch *et al.*, 2015).

De acordo com Chaudhuri *et al.* (2021), a DSR permite que os pesquisadores se envolvam ativamente na solução de problemas e, ao mesmo tempo, desenvolvam conhecimento científico. A ideia básica da DSR é que novos modelos analíticos terão uma importância prática considerável. A obtenção de conhecimento pode ser melhor consolidada e implementada por meio de uma abordagem de DSR, com foco no aprimoramento dos projetos existentes (Van Aken *et al.*, 2016).

Conforme Goecks *et al.* (2021), a metodologia DSR tem sido reconhecida como um método de pesquisa vigente no meio científico, compreendendo o desenvolvimento de um artefato/modelo baseado na experiência e sua demonstração, visando solucionar problemas propostos pelas organizações, podendo incluir máquinas, economia ou sociedade. A notoriedade desse método se destaca pelo fato de eliminar a distância entre a teoria e a prática, com o intuito do desenvolvimento de uma ciência que visa resolver problemas específicos.

Segundo Dresch *et al.* (2015), a DSR tem como objetivo desenvolver e avaliar novos sistemas, criando, retrabalhando ou alterando produtos/ processos/ software/ métodos, para melhorar as condições de funcionamento existentes. Esta temática busca estudar, pesquisar e investigar o meio organizacional e o seu comportamento, tanto para o meio acadêmico quanto para o meio institucional. Nesse sentido, trata-se de um processo rigoroso de projetar artefatos para resolver problemas, assim como avaliar e discutir os resultados (Lacerda *et al.*, 2013).

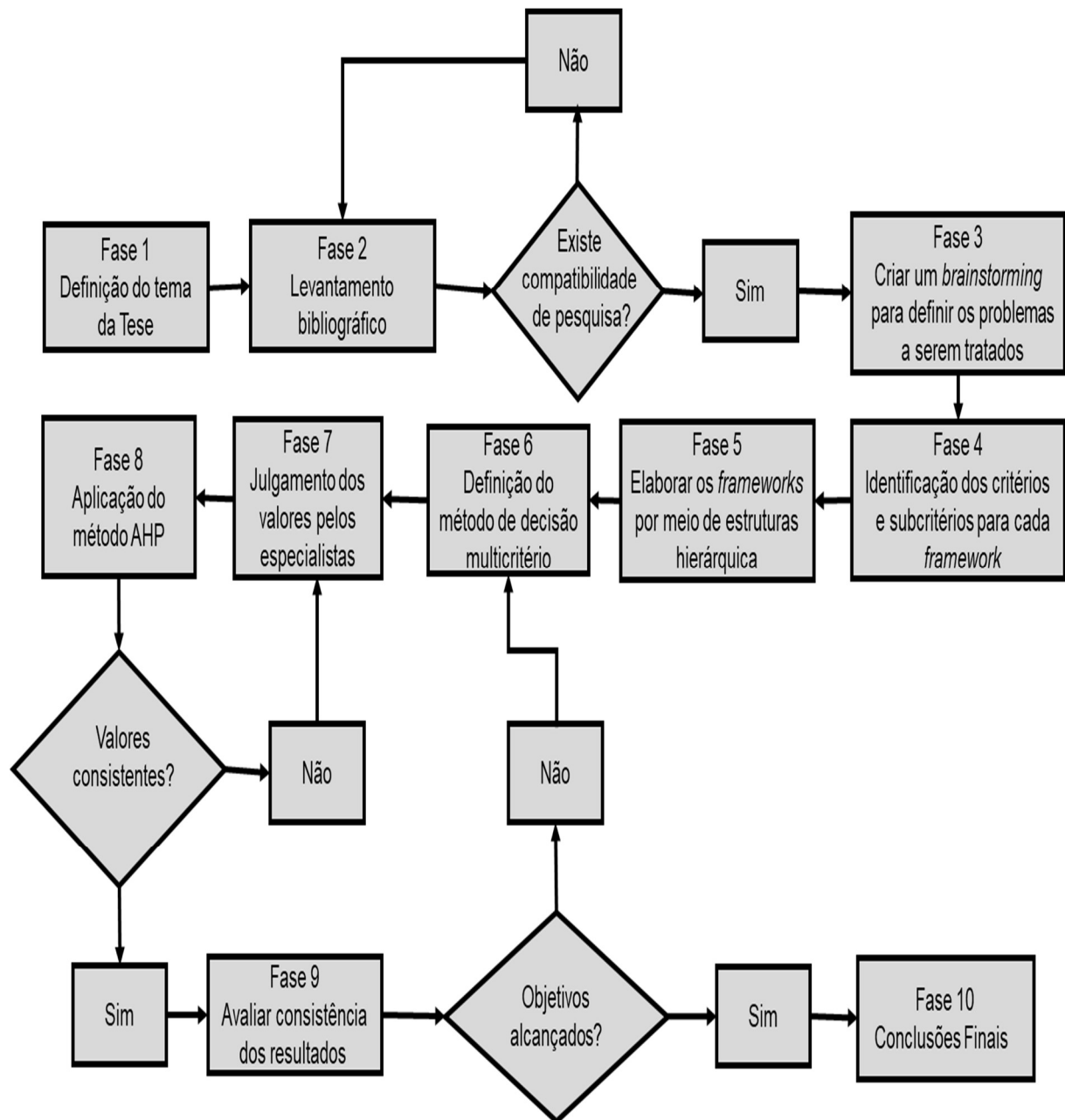
A DSR se concentra no âmbito prescritivo em vez do descritivo, ou seja, procura prescrever processos de forma mais eficaz. Os resultados da DSR são os artefatos avaliados como modelos, métodos ou estruturas (Lacerda *et al.*, 2013; Manson, 2006).

Os Grupos Focais podem ser usados como um método de avaliação para a DSR, uma vez que garantem uma discussão mais aprofundada e colaborativa sobre os artefatos desenvolvidos pela pesquisa (Lacerda *et al.*, 2013).

1.5.2 Fluxograma da Tese

O método e técnicas de pesquisa para coleta, sistematização, ordenação, aplicação de cálculo e interpretação dos dados, se encontrará dividida em diferentes fases ao longo do período de duração da Tese. A Figura 14 demonstra os passos a serem seguidos.

Figura 14- Fluxograma da Tese



Fonte: Elaborado pelo autor

1.5.3 Etapas da Tese

Agruparam-se as etapas em fases para um melhor acompanhamento e desenvolvimento da Tese. As etapas envolvem o método DSR, que se compreende de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Etapas da Tese

(continua)

Etapas do processo	Saídas	Objetivos	Fases	Demandas
Conscientização do problema	Proposta	Selecionar um tema inovador para o meio acadêmico e organizacional	1	Definição do tema da Tese
			2	Levantamento bibliográfico - Selecionar os artigos mais relevantes para o tema da pesquisa, por meio do banco de dados do Scopus
Sugestão	Projeto Provisório	Propor artefatos (<i>frameworks</i>) que possam resolver um problema e melhorar a situação atual	3	Criar um <i>brainstorming</i> para definir os problemas a serem tratados - Definiu-se: Seleção de estratégia de manutenção, priorização na seleção de projetos, seleção de fornecedores e gestão de sobressalentes
			4	Identificação dos critérios e subcritérios pertinentes para cada <i>framework</i> por meio da literatura vigente
Desenvolvimento	Artefato	Elaborar estruturas hierárquicas	5	Elaborar os <i>frameworks</i> por meio de estruturas hierárquica - Inclusão do objetivo, critérios, subcritérios e alternativas

Quadro 3 - Etapas da Tese

(conclusão)

Etapas do processo	Saídas	Objetivos	Fases	Demandas
Avaliação	Medidas de Desempenho	Analisar o artefato desenvolvido a partir de uma visão geral teórica, contextualizando a aplicação de forma específica	6	Definir um método de MCDM consolidado e apropriado para lidar com múltiplos fatores e incerteza
			7	Julgamento de valores pelos especialistas
			8	Aplicação do método AHP
			9	Avaliar a consistência dos resultados
Conclusão	Resultado	Garantir que a Tese possa fornecer resultados para o desenvolvimento do conhecimento nos campos prático e teórico	10	Conclusões

Fonte: Elaborado pelo Autor

A primeira fase abrange a definição do tema da Tese, que se encontra associado à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas. Assim sendo, tornou-se necessário efetuar uma avaliação criteriosa dos fatores mais impactantes para a manutenção destes ativos.

A segunda fase consiste numa pesquisa bibliográfica, para que seja feita a transcrição do método científico à pergunta formulada pelo pesquisador. Utilizou-se a base de dados Scopus, por meio das combinações de operadores booleanos “AND” com as palavras “HYDRAULIC”, “MAINTENANCE” e “STEEL INDUSTRY” OR “STEEL PLANT”. Adotaram-se como critérios de inclusão apenas artigos escritos em inglês,

publicados na sua grande maioria nos anos de 2014 a 2023, almejando efetuar uma pesquisa bibliográfica com informações tecnológicas mais recentes. Os critérios de exclusão se encontram diretamente associados a artigos não pertinentes ao tema, objetivos e questão de pesquisa.

A terceira fase expõe a elaboração de um *brainstorming* almejando identificar os principais fatores e/ou variáveis capazes de influenciar a gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas. Priorizou-se a seleção de estratégia de manutenção, priorização na seleção de projetos, seleção de fornecedores e gestão de sobressalentes.

A quarta etapa complementa a identificação de critérios e subcritérios pertinentes a cada *framework* por meio da literatura vigente.

A quinta etapa apresenta a elaboração das estruturas hierárquicas compreendendo a inclusão do objetivo, critérios, subcritérios e alternativas para cada item selecionado na terceira etapa.

A sexta etapa compreendeu a definição do método de decisão multicritério, onde se almejou escolher um método consolidado e apropriado para lidar com múltiplos fatores e incerteza.

A sétima etapa abordou o julgamento dos valores pelos especialistas. Constituiu-se um comitê com especialistas que atuam na engenharia de manutenção, e especialistas pertinentes à área de produção, de modo a poder avaliar os pontos cruciais da gestão destes ativos. Os especialistas comparam critérios, subcritérios e alternativas de acordo com a sua importância relativa, denominada como prioridade no AHP. A base comparação se baseia na Escala Fundamental ou Escala Saaty (Saaty, 1990).

A oitava etapa compõe-se na aplicação do método de decisão multicritério AHP. Este método possibilita resolver problemas de tomada de decisão associados a uma estrutura hierárquica que incorpora critérios e subcritérios, identificados na literatura vigente.

A nona etapa consiste em avaliar a consistência dos resultados, almejando atingir os objetivos propostos.

A décima e última etapa aborda as conclusões, onde se ressalta os ganhos para a organização e para o meio acadêmico.

1.6 DELIMITAÇÃO DA TESE

Conduziu-se o presente documento compreendendo as seguintes delimitações:

- a) Relativamente à área de atuação, a delimitação da Tese consiste na realização do estudo em uma indústria siderúrgica, com opiniões de diferentes especialistas de manutenção, abrangendo a utilização do método AHP.
- b) Quanto ao objeto de estudo, a delimitação da Tese compreende a análise multicritério aplicada à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas.

1.7 ESTRUTURA DA TESE

A Tese aborda a aplicação de análise multicritério à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em uma empresa do ramo siderúrgico, almejando promover o desenvolvimento tecnológico e sustentável da gestão de manutenção, onde se encontra organizada em 6 capítulos.

O capítulo 2 aborda um referencial teórico, que inclui a fundamentação para a presente Tese. Neste capítulo são apresentados os conceitos de manutenção, incluindo os tipos de estratégias de manutenção mais utilizados. Também são abordados alguns conceitos de priorização na seleção de projetos hidráulicos, seleção fornecedores para sistemas hidráulicos e avaliação de criticidade de peças sobressalentes.

O capítulo 3 descreve os procedimentos para a modelagem multicritério, onde a partir da literatura são apresentados os conceitos fundamentais associados ao método de decisão multicritério AHP, incluindo o modelo BOCR e modelo com *rating's*. Neste ponto se aborda a definição das estruturas hierárquicas, incluindo os critérios e subcritérios baseados na literatura. A finalidade se baseia em rever a sequência básica dos procedimentos teóricos, validando os conceitos por meio da apresentação de exemplos de aplicação prática.

O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa. Neste capítulo são identificados os resultados atingidos, onde inicialmente se procedeu à coleta de dados

disponibilizados pela gestão de manutenção da organização, que serviu de base para esta Tese. Aplicou-se o método AHP de modo a poder verificar como os especialistas priorizam os critérios e subcritérios, correlacionados com os problemas de estratégia de manutenção, priorização de projetos hidráulicos, seleção de fornecedores e gerenciamento de sobressalentes críticos, associados às decisões de gerenciamento de manutenção de sistemas hidráulicos.

O capítulo 5 expõe as conclusões da presente Tese, expondo as respostas aos objetivos gerais e específicos, e às questões de pesquisa. Neste capítulo também se faz referência às considerações, contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USINAS SIDERÚRGICAS

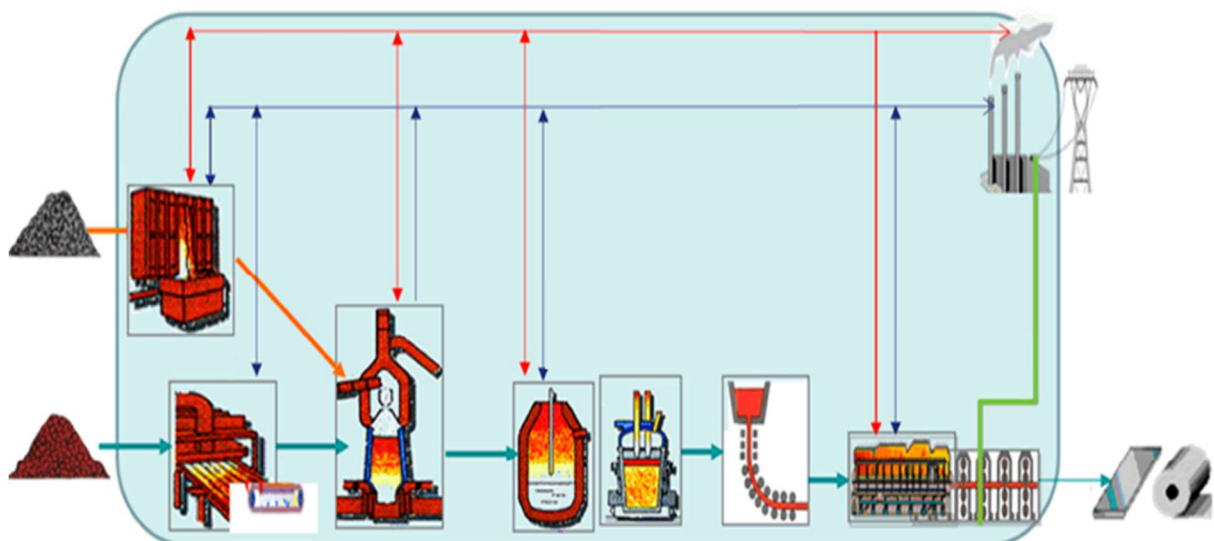
As usinas siderúrgicas são consideradas indústrias tecnologicamente complexas, vindo a desempenhar um contributo fundamental para o desenvolvimento de um país, gerando cerca de 40 milhões de postos de trabalho em todo o mundo. O consumo de aço per capita é um dos indicadores mais significativos do crescimento econômico de um país. Para estas organizações, é indispensável promover a melhoria contínua dos seus processos, assim como atividades de pesquisa e desenvolvimento dos seus produtos (Diniz *et al.*, 2025; Shanmugam *et al.*, 2021).

A indústria siderúrgica é caracterizada como uma organização que contém fatores que influenciam diretamente a eficiência operacional dos ativos como, ambientes corrosivos, erosões, altas temperaturas, etc (Singh *et al.*, 2023).

A indústria do aço pode ser um dos pilares importantes da economia de um país, onde o seu desenvolvimento possui um impacto substancial na sua economia. O processo de produção de aço preconiza processos ligados em paralelo como a coqueria e a sinterização, e processos ligados em série como alto forno, aciaria, lingotamento e laminação a quente (Chen *et al.*, 2016).

A Figura 15 preconiza um diagrama esquemático do processo de produção de aço.

Figura 15 - Diagrama esquemático do processo de produção de aço



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016)

2.2 MANUTENÇÃO

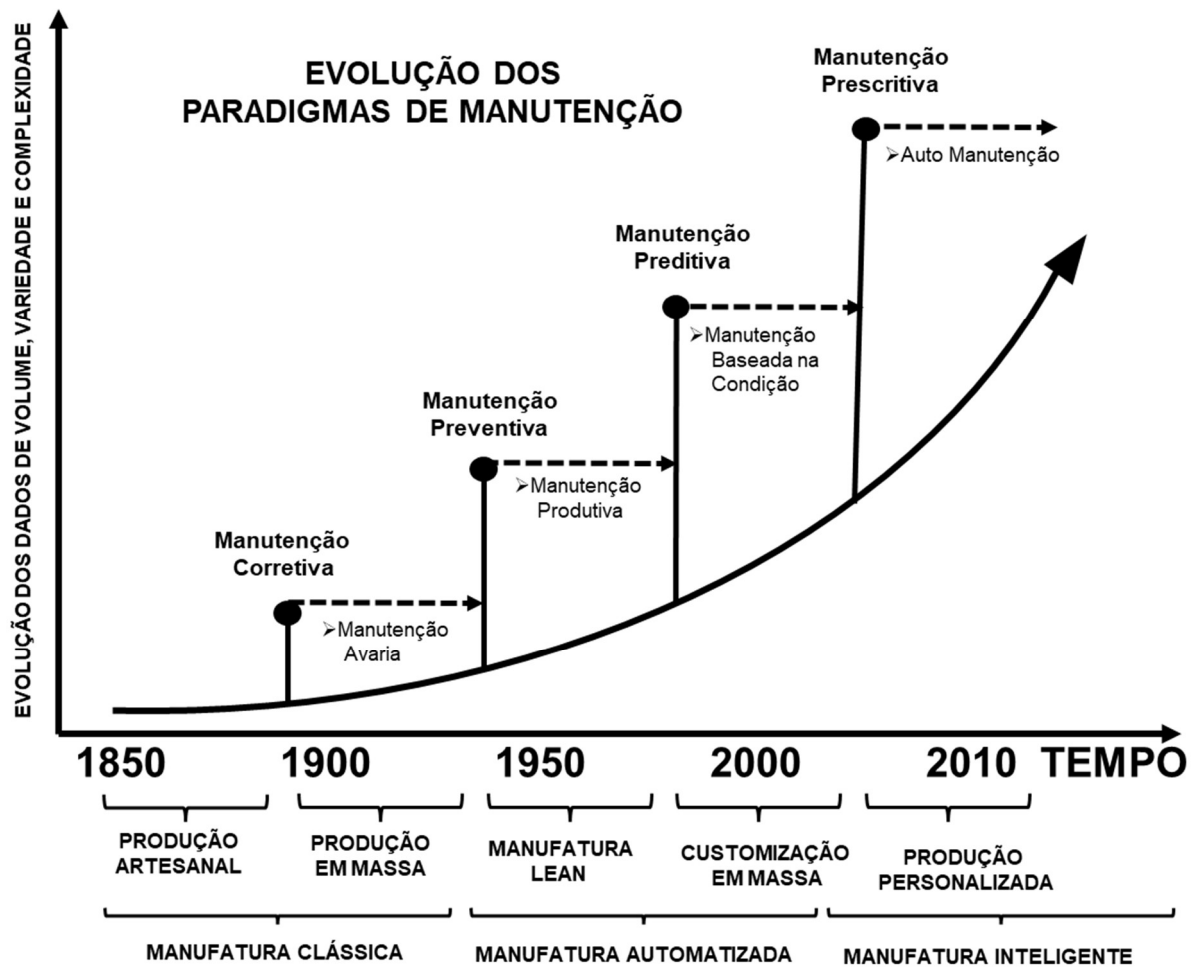
A manutenção desempenha uma estratégica e importante função dentro das organizações, uma vez que a utilização constante dos ativos, muitas vezes por 24 horas por dia, proporciona um aumento das atividades de manutenção. Os objetivos da demanda da produção são mais facilmente alcançados se aumentarmos a disponibilidade das máquinas e se reduzirmos as probabilidades de falha (Lopes *et al.*, 2020).

A manutenção é conhecida como uma das principais áreas da gestão de ativos, almejando a disponibilidade, fiabilidade, nível de produção, custos, segurança, etc, em vários ambientes operacionais. Obviamente, as atividades de manutenção devem ser integradas e programadas dentro do ciclo de vida do equipamento, levando em consideração as características de confiabilidade exigidas pelo próprio sistema. A minimização do custo de manutenção, assim como a disponibilidade dos ativos se encontram conectados por meio de um sistema matemático baseado em programação (Carpitella *et al.*, 2018).

Segundo Torre *et al.* (2023), a manutenção envolve um sistema de administração do ciclo de vida dos ativos, abrangendo tarefas técnicas e administrativas. Em uma empresa, o planejamento da manutenção desempenha um papel crucial na redução dos custos operacionais. Todas as estratégias de manutenção têm pontos fortes e fracos, e os gestores têm que tomar decisões com criticidade.

As estratégias de manutenção evoluíram progressivamente de acordo com as revoluções industriais, conforme se observa na Figura 16, onde por exemplo na estratégia de manutenção corretiva, as ações a serem realizadas se compreendem em restaurar um equipamento após uma avaria repentina. Esta estratégia de manutenção poderá custar entre três a quatro vezes mais do que uma estratégia de manutenção programada em alguns casos. Já a estratégia de manutenção preventiva abrange ações programadas com periodicidade conforme cada tipo de equipamento (Lee *et al.*, 2020).

Figura 16- Evolução da manutenção



Fonte: Adaptado Lee *et al.* (2020)

Uma estratégia de manutenção delineia a visão de uma organização em como preservar a integridade e segurança dos ativos durante todo o seu ciclo de vida. Geralmente, é composta de procedimentos para levantamento/inspeção, reparação, manutenção e renovação dos sistemas, subsistemas e componentes. Almejando uma busca por maior eficiência e menor custo, uma série de estratégias de manutenção foram concebidas pelos investigadores ao longo dos anos (Abbas; Shafiee, 2020).

As empresas siderúrgicas enfrentam vários desafios que abrangem vários tipos de setores, onde por exemplo, se existir uma gestão de manutenção inadequada, pode-se vir a comprometer os ativos, mão de obra, etc. Mediante a utilização dos métodos MCDM, os gestores podem gerenciar com assertividade, os critérios de decisão que se encontram envolvidos num processo de manutenção (Depczyński *et al.*, 2023).

A manutenção desempenha um papel essencial para os processos operacionais em plantas siderúrgicas. Os sistemas hidráulicos se encontram entre os ativos mais críticos para o departamento de manutenção, uma vez que podem interromper totalmente a produção, podendo proporcionar elevadas perdas monetárias, consequências ambientais graves, ou acidentes pessoais. Assim sendo, medidas adequadas de manutenção são exigidas para este tipo de ativos (Torre; Bonamigo, 2024).

A ABNT NBR 5462 é uma norma técnica que estabelece os princípios gerais de gestão da manutenção nas empresas. Ela define os requisitos e procedimentos para planejar, executar e controlar a manutenção de equipamentos e instalações, garantindo a confiabilidade, disponibilidade e segurança das operações.

A norma ABNT NBR ISO 4413 especifica as regras gerais e os requisitos de segurança para os sistemas e componentes de potência de fluidos hidráulicos utilizados em máquinas, tal como definido na norma ABNT NBR ISO 12100. Esta norma correlaciona todos os perigos que são significativamente associados aos sistemas de acionamento por fluido hidráulico, especificando os princípios a serem aplicados para evitar riscos. A norma citada também se aplica à concessão, construção e modificação dos sistemas e dos seus respectivos componentes, levando em consideração os seguintes aspectos: montagem, instalação, regulação, funcionamento, manutenção, limpeza, confiabilidade operacional, eficiência energética e meio ambiente.

De acordo com Verma *et al.* (2014), a maioria dos acidentes em usinas siderúrgicas ocorre devido à falta de conhecimento e falta do cumprimento das normas. Jocelyn *et al.* (2016), referem que as atividades de manutenção expõem os usuários a riscos elevados, e que as normas são utilizadas para estabelecer práticas corretas de manutenção. Para Dindorf e Wos (2022), as normas se correlacionam com as boas práticas de operação e manutenção de sistemas hidráulicos.

2.2.1 Tipos de manutenção

Todos os ativos envolvidos com a produção de uma organização se encontram relacionados com atividades de manutenção, onde as estratégias a serem tomadas devem se encontrar diretamente correlacionadas com as prioridades de cada equipamento. Neste contexto, as estratégias de manutenção diferem de acordo com

o nível de importância de cada ativo, visando proporcionar confiabilidade operacional e disponibilidade máxima a um custo reduzido (Crisan *et al.*, 2021).

Os sistemas hidráulicos são amplamente utilizados em muitos processos de produção industrial. Nos sistemas hidráulicos, a confiabilidade de cada componente fornece o suporte necessário para a confiabilidade geral do sistema. No entanto, a complexidade da concepção do sistema dificulta a formulação de uma estratégia de manutenção (Yang *et al.*, 2024).

Os tipos de manutenção existentes numa organização, são caracterizados pela maneira como se realiza a intervenção nos seus ativos. Existe uma gama muito vasta para se classificar os vários tipos de manutenção existentes. Para esta Tese serão considerados apenas os principais tipos caracterizados por diversos autores, sendo eles: manutenção autônoma, manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

a) Manutenção autônoma

O recente desenvolvimento da Indústria 4.0, *machine learning* e *digital twin*, levou a um aumento de interesse em implementar a manutenção autônoma nas organizações. Este tipo de manutenção tem sido discutido como sendo uma área de interesse por parte das indústrias, devido à possibilidade de existirem processos operacionais automatizados, ou com a possibilidade de possuírem propriedades autônomas, sendo definido como a capacidade de um sistema deter um comportamento de autocontrole. Outra descrição de ser autônomo é ter independência ou capacidade de autogestão (Khan *et al.*, 2020).

A manutenção autônoma se encontra diretamente envolvida com a Indústria 4.0, sendo representada pela automanutenção, uma vez que requer o uso da tecnologia. Este tipo de estratégia é preferido por empresas que lidam com atividades que envolvem altas operações de risco. O papel do operador de manutenção está mudando, consistindo em supervisionamento de sistemas de monitoramento aprimorados (Bona *et al.*, 2021).

b) Manutenção corretiva

A manutenção corretiva foi utilizada principalmente na década de 1940, onde o seu propósito consta em corrigir a falha de um equipamento após ela ocorrer, almejando assim restaurar a sua condição normal de funcionamento. Por conseguinte, o plano normal de produção será interrompido, originando perdas processuais. Além disso, uma vez que a falha ocorre repentinamente, esta estratégia é susceptível a um reparo inoportuno dos recursos disponíveis para a manutenção dos equipamentos (Zhao *et al.*, 2022).

A manutenção corretiva é realizada após um componente ter sido danificado. O seu principal objetivo é restaurar o componente o mais rapidamente possível ao seu estado operacional, por meio de uma reparação ou substituição de um equipamento um componente que tenha sido danificado (Mirhosseini; Keynia, 2021).

c) Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é efetuada em intervalos predeterminados, obedecendo a um plano previamente elaborado, de modo a manter o sistema em condições de funcionamento com base em dados históricos (He *et al.*, 2018).

As manutenções preventivas são programadas para maximizar a fiabilidade operacional e evitar avarias dos equipamentos, devido aos elevados investimentos económicos no processo de produção. As empresas siderúrgicas adotam estratégias de manutenção preventiva, almejando a substituição de equipamentos antes do fim da sua vida útil, de modo a poder evitar perdas de na produção (Sarda *et al.*, 2021).

d) Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é responsável por detectar problemas nos equipamentos antecipadamente e num modo eficaz, contribuindo grandemente para o setor produtivo. Este tipo de manutenção se encontra associado à Indústria 4.0 e é baseado na condição dos equipamentos, obedecendo a um conjunto de atividades com monitoramento sistemático de variáveis que por sua vez revelam o desempenho

dos equipamentos, exercendo assim um papel fundamental para as organizações (Bajic *et al.*, 2020).

A manutenção preditiva é utilizada como uma ferramenta para potencializar a manutenção dos equipamentos, e pode ajudar a garantir a confiabilidade operacional de alguns tipos de ativos no setor industrial (Shukla *et al.*, 2022).

2.3 SELEÇÃO DE PROJETOS

O problema da seleção de projetos tem atraído uma atenção significativa por parte das organizações, onde se faz necessário ter um compromisso com os objetivos pertinentes a diferentes categorias da área de sustentabilidade (ambiental, social e econômica). A falta de consistência e incerteza na seleção de projetos aumenta os riscos na tomada de decisões e, conseqüentemente, leva a soluções pouco fiáveis (Maceika *et al.*, 2021).

A seleção de projetos se encontra diretamente conectado com o desenvolvimento de uma organização, de modo a poder garantir que os resultados sejam alcançados. No entanto, existem problemas complexos oriundos de um elevado número de variáveis, que devem ser consideradas cuidadosamente com base em critérios pré-estabelecidos. A importância relativa desses critérios ajuda os gestores a identificarem os elementos que requerem uma maior atenção para a distribuição recursos, assim como avaliarem a sustentabilidade das diferentes alternativas dos projetos (Alyamani; Long, 2020).

A seleção de um ativo com base nas especificações técnicas e nos requisitos operacionais é uma decisão estratégica. A instalação de um determinado equipamento preconiza um bom desempenho operacional, onde uma análise criteriosa na concessão do projeto, fabricação e manutenção são fatores de supra importância (Sen *et al.*, 2019).

Um projeto hidráulico adequado deve levar em consideração múltiplos critérios, como os aspectos técnicos e económicos. O método AHP pode ser aplicado para análise multicritério para este tipo de projetos, uma vez que se baseia no julgamento de um grupo de especialistas para os critérios considerados (Briceño-León *et al.*, 2023).

2.4 FORNECEDORES

Em busca da melhoria contínua dos seus processos e da otimização da cadeia de abastecimento, a indústria siderúrgica procura introduzir novos conceitos de gestão, com conhecimentos mais profundos, de modo a poder garantir a qualidade dos seus produtos.

Um fornecedor não possui qualificações ótimas para todos os critérios. Não existe um método preciso para avaliar um determinado fornecedor uma vez que muda de organização para organização (Depczyński, 2021; Kannan *et al.*, 2021).

A avaliação e seleção de fornecedores é um processo que deve oferecer ao cliente a qualidade e serviços dos produtos, a um preço apropriado de mercado, nas quantidades e prazos certos. Neste contexto, a avaliação e a seleção de fornecedores numa organização tomam uma regra fundamental, que deve ser levada a cabo de forma apropriada para obter os melhores resultados possíveis. Para atingir os objetivos de produção estipulados num mercado cada vez mais competitivo, as organizações precisam de escolher os seus parceiros e estabelecer estratégias que otimizem os seus resultados (Deshmukh; Vasudevan, 2018; Ulutaş, 2019).

Uma comparação entre fornecedores qualificados é realizada por meio de critérios e subcritérios, que são estipulados de acordo com as necessidades da organização (Kumar, 2019; Depczyński, 2021).

A seleção de fornecedores para sistemas hidráulicos possui uma importância crucial na indústria siderúrgica, uma vez que estes sistemas se encontram associados a equipamentos que podem gerar riscos para a segurança pessoal e o ambiente, o que pode comprometer significativamente a fiabilidade operacional de uma organização. Se o processo de seleção de fornecedores for inadequado, podem ser adquiridos equipamentos sem qualidade, o que pode causar graves problemas nas atividades operacionais das empresas.

Por exemplo, Kumar (2019), sugere que uma avaliação subjetiva dos fornecedores depende não só de critérios estipulados, mas também da forma como esses critérios devem ser avaliados por especialistas, bem como a metodologia utilizada para o efeito. Por conseguinte, a qualificação de fornecedores de sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica necessita de um tratamento adequado. As técnicas de decisão multicritérios podem fundamentar as decisões de acordo com o nível de serviço desejado, com a melhor assertividade possível.

2.5 GESTÃO DE SOBRESSALENTES

2.5.1 Criticidade e gerenciamento de peças sobressalentes

A gestão de operações possui um papel inquestionável na melhoria contínua das organizações. As peças sobressalentes são os componentes integrais necessários para a manutenção do equipamento e contribuem consideravelmente para todo o ciclo de vida do produto. A gestão de peças sobressalentes é uma das decisões primordiais na gestão de operações, que equaciona um *trade-off* entre o custo de armazenamento do inventário decorrente do excesso de produção e a falta de peças sobressalentes (Ghuge *et al.*, 2022).

A disponibilidade e fiabilidade dos ativos têm um impacto direto na produtividade das linhas de produção de uma organização, onde a manutenção eficaz se torna crucial. Um dos fatores mais significativos no ambiente de manutenção é a disponibilidade de peças sobressalentes. Por conseguinte, a maioria das organizações atribui grande importância em estabelecer políticas apropriadas de gestão de peças sobressalentes. Portanto, a avaliação da criticidade das peças sobressalentes torna-se uma questão vital na gestão do estoque (Ilgin, 2019).

A avaliação de peças sobressalentes é regularmente estruturada com fatores econômicos, que por muitas vezes não correspondem a uma avaliação correta relativamente à criticidade. Assim, uma avaliação adequada das peças sobressalentes mais críticas num inventário, ajudaria os decisores numa escolha correta da política de controlo. Os autores, citam também que a investigação sobre a gestão do inventário de peças sobressalentes se baseia em três categorias principais: classificação, previsão, e gestão estratégica (Gong *et al.*, 2022).

A literatura expõe uma ampla técnica para análise de peças sobressalentes, quantitativa e qualitativa. Os quantitativos baseiam-se em dados quantificáveis das características das peças sobressalentes, e os qualitativos são utilizados ouvir e registrar a opinião dos gestores (Ferreira *et al.*, 2018).

2.6 MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDM)

O desenvolvimento deste trabalho será estruturado para fundamentar as decisões dos gestores responsáveis pelo processo de manutenção de sistemas

hidráulicos utilizando-se do MCDM, uma vez que este método é utilizado quando um problema de decisão possui fatores sociais, econômicos, técnicos, existindo a necessidade de serem avaliados meticulosamente em um mundo globalizado, onde uma organização deve produzir o máximo possível, com maior qualidade e em menor tempo, e com custo mínimo.

Diferentes métodos têm sido aplicados na manutenção industrial (Dong *et al.*, 2019; Shahin *et al.*, 2018; Yunusa-Kaltungo; Labib, 2021):

- Análise econômicas matemáticas;
- Método de Monte Carlo;
- Método do centro de gravidade;
- Regressão linear e não linear;
- Teoria da Percolação.

O método MCDM vai além da modelagem matemática pura, possibilitando entrada humana, por exemplo para ponderar atributos. A interação humana é um ponto forte do MCDA em relação aos modelos de regressão e simulação, uma vez que permite que a subjetividade seja incorporada na resolução de problemas (Ortiz-Barrios *et al.*, 2021).

O MCDM é aplicado a vários problemas de decisão de gestão, tais como técnicos, econômicos, sociais, etc. Estes problemas necessitam por vezes de ser cuidadosamente avaliados, uma vez que as organizações precisam de produzir mais, com maior qualidade e em menos tempo, com um custo reduzido (Ohta, 2018).

2.7 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

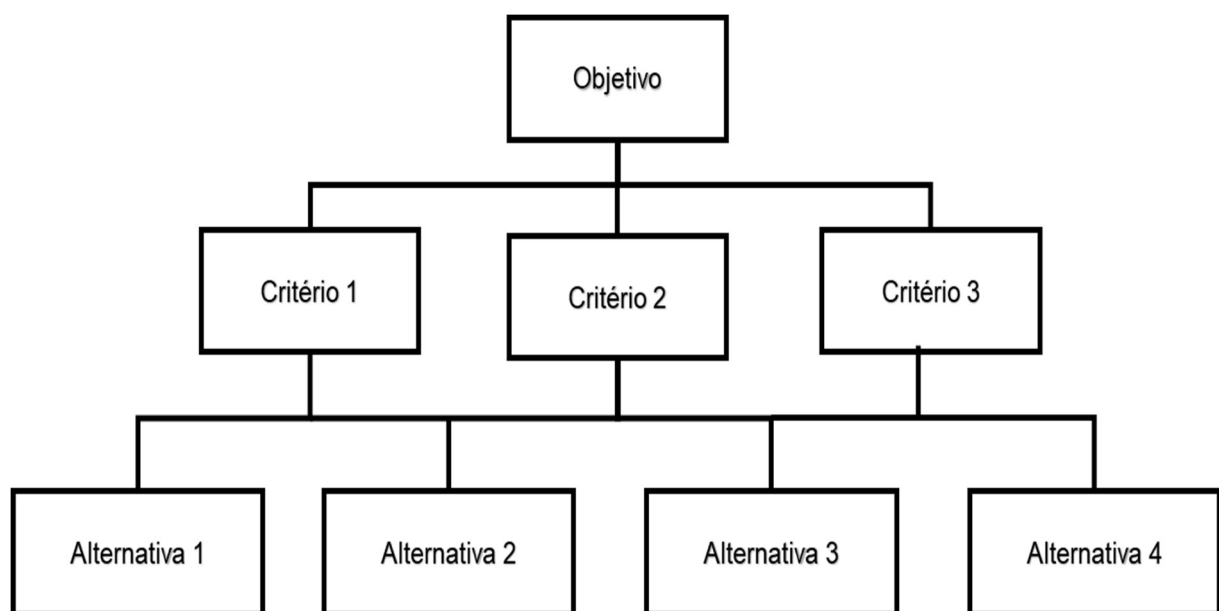
O AHP é um dos principais métodos de MCDM, uma vez que conglomerava inúmeras sessões dedicadas somente ao AHP em conferências, contém um evento e um periódico exclusivos. Este método de tomada de decisão pode contribuir para a gestão de uma organização, uma vez que aborda múltiplos critérios em conflito (Torre; Salomon, 2024).

A aplicação do método AHP é constituído por quatro passos principais, onde primeiramente se tem a formulação de uma hierarquia, seguidamente se efetua

a comparação de critérios, posteriormente é realizada a análise de consistência, e finalmente se interpreta os resultados (Salomon; Torre, 2022).

O método AHP desenvolvido por Saaty (1974; 1980; 2013), é um dos métodos MCDM mais aplicados para a tomada de decisões em vários domínios, tais como engenharia, informática, matemática, logística, saúde, indústria e educação (Neto *et al.*, 2023; Sahin, 2024). A Figura 17 demonstra um exemplo de um modelo de hierarquia.

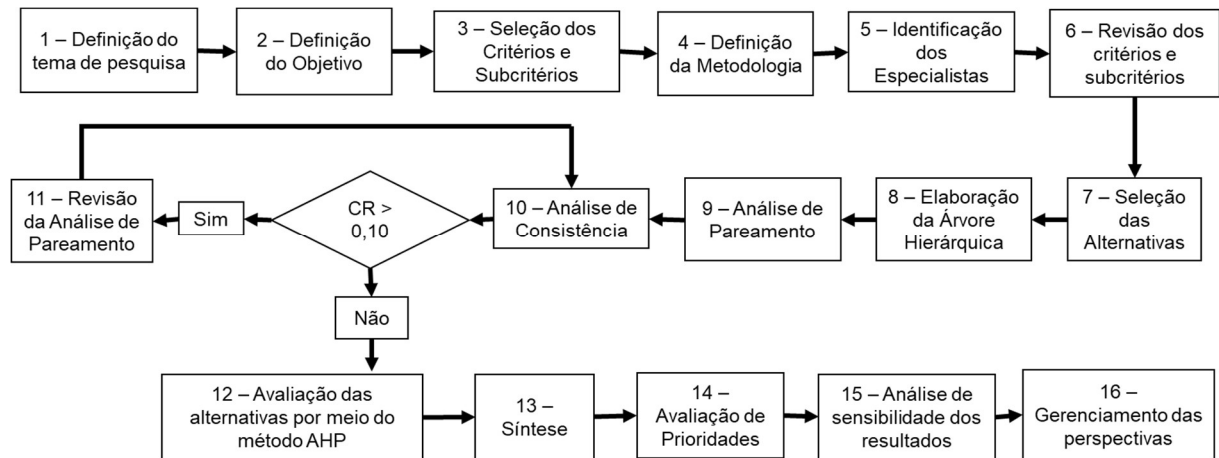
Figura 17- Hierarquia para um problema de decisão



Fonte: Adaptado de Neto *et al.* (2023)

O AHP pode ser aplicado em algumas etapas, tais como a construção de hierarquia, comparação de critérios, verificação de consistência e análise de resultados (Tramarico *et al.*, 2019; Neto *et al.*, 2023). O fluxograma adaptado é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma de abordagem metodológica AHP



Fonte: Adaptado de Tramarico *et al.* (2019)

O método AHP consiste na estruturação de um problema que começa com a definição de um objetivo global. Define-se o problema, identificando critérios, subcritérios e alternativas, criando assim uma estrutura hierárquica. Especialistas comparam critérios, subcritérios e alternativas de acordo com a sua importância relativa, denominada como prioridade no AHP (Saaty, 1977).

De acordo com o mentor do método AHP, o número necessário de especialistas não pode ser estabelecido. Se faz necessário conhecer a área de expertise necessária para tomar essa decisão, e selecionar um especialista ou especialistas que tenham conhecimentos e experiência na matéria. Um especialista poderá ser suficiente para um cenário específico, uma vez que possua experiência e conhecimento necessário sobre o assunto (Saaty; Özdemir, 2014).

A tomada de decisão passou a ter um papel fundamental na decisão dos gestores, tendo evoluído para uma abordagem sofisticada, incluindo julgamentos de especialistas e análise de custo-benefício em um ambiente de incerteza (Asuquo *et al.*, 2019).

O Quadro 4 apresenta a Escala de acordo com Saaty (1990), uma escala linear para comparações em pares por especialistas (Kannan *et al.*, 2021; Neto *et al.*, 2023; Ozcan *et al.*, 2021).

Quadro 4 - Escala Saaty

Escala Numérica	Escala conceitual	Descrição
1	Igual	Os dois elementos comparados contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderado	O elemento comparado é ligeiramente a favor de uma atividade em detrimento da outra.
5	Forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento da outra.
7	Muito Forte	Uma atividade é favorecida muito mais forte em relação à outra, e tal importância pode ser observada na prática.
9	Absoluto	A evidência que favorece uma atividade em relação a outra, apresenta o nível mais elevado possível de evidência a seu favor.
2,4,6 e 8	São utilizados valores intermédios entre dois julgamentos quando o decisor tem dificuldade em escolher entre dois graus de importância adjacentes.	

Fonte: Saaty (1990)

Cada Especialista k , utiliza o Quadro 6 e propõe a sua matriz de comparações A_k . A matriz de comparações agregada A é obtida com a média geométrica dos componentes das matrizes A_k , para $k = 1, 2, \dots, K$, onde K é o número de especialistas consultados.

Da matriz de comparações agregada, obtém-se o vetor prioridades com o autovetor direto w de A , conforme a Equação 1, onde $\lambda_{\max}$ é o autovalor máximo de A (Saaty, 1977).

$$A w = \lambda_{\max} w \quad (1)$$

A verificação da consistência é uma das grandes vantagens do AHP em relação a outros métodos MCDM. Quando $a_{ij} = a_{ik} a_{kj}$ resulta para todos $i=1,2,3,\dots,n$, $j=1,2,3,\dots,n$, e $k=1,2,3,\dots,n$, $\lambda_{\max} = n$, onde n é o número de elementos, alternativas ou critérios comparativos (Saaty, 1977). Se A não for consistente, então $\lambda_{\max} > n$. Quanto mais próximo $\lambda_{\max}$ for de n , mais A pode ser considerado consistente. CI é o índice de consistência (*consistency index*), e pode ser calculado de acordo com a Equação 2:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (2)$$

O cálculo da razão de consistência *CR* (*consistency ratio*), está associado a um índice de consistência aleatória *RI* (*random consistency index*), de acordo com a Equação 3:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

A Tabela 6 conforme Saaty (1980), apresenta *RI* para *n* de 1 a 10, onde *n* é o número de elementos em comparação (alternativas ou critérios). O valor de *CR* não deve ser superior a 0,1. Se ocorrer, será necessária uma revisão dos julgamentos.

Tabela 6 - Índice de consistência aleatória

<i>n</i>	<i>RI</i>
1	0
2	0
3	0,58
4	0,9
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

Finalmente, agregam-se as matrizes de modo a se estabelecer prioridades locais e globais e selecionar a melhor alternativa.

De acordo com Lin *et al.* (2008), as comparações fornecidas pelos peritos podem ser agregadas de várias formas, sendo a agregação de julgamentos individuais AIJ (*Aggregation of Individual Judgements*) e prioridades individuais AIP (*Aggregation of Individual Priorities*), as abordagens mais eficazes. Nesta Tese será adotado o AIJ, porque os peritos são da mesma empresa, e partilham interesses comuns empresa (Saaty; Peniwat, 2008).

2.7.1 Modelo AHP-BOCR

De acordo com Saaty e Peniwat (2008), o modelo AHP-BOCR é utilizado para efetuar uma avaliação das alternativas de acordo com fatores específicos envolvidos no problema de decisão. A análise BOCR é aplicada para construir um

sistema de critérios, que proporciona uma compreensão clara dos benefícios, oportunidades, custos e questões de risco, que podem influenciar a avaliação da sustentabilidade (Wei, 2021).

De acordo com (Torre *et al.*, 2023), uma compreensão clara sobre a avaliação da sustentabilidade associada a uma análise BOCR, pode proporcionar uma compreensão clara das interdependências dos benefícios (B), oportunidades (O), custos (C), e riscos (R) dos projetos em termos de exploração do B e O e de evitar o C e R (Tabatabaee *et al.*, 2019).

O modelo de análise AHP-BOCR, descreve que cada um dos fatores é representado por um conjunto de critérios detalhados em sub hierarquia, onde a análise é obtida distinguindo positivo (noção de seletividade) e fatores negativos (noção de rejeitabilidade). A comparação em pares é efetuada para quantificar a importância relativa de cada elemento mediante o cumprimento do objetivo (Bouzarour-Amokrane *et al.*, 2015).

2.7.2 Modelos de Classificação

Existem várias técnicas de gestão de sobressalentes que são amplamente utilizadas por pesquisadores como a técnica ABC (*Always, Better, Control*), VED (*Vital, Essential, Desirable*), FSN (*Fast, Slow moving and Non-moving*), SDE (*Scarce, Difficult, Easy*), e HML (*High, Medium, Low*). Estes métodos são utilizados em diferentes situações, tais como custos de aquisição e armazenamento, que devem ser mantidos ao nível mais baixo (Lestari *et al.*, 2019).

Mehdizadeh (2020), refere que a técnica mais comum numa abordagem quantitativa é a análise ABC, também conhecida como análise de Pareto. Esta técnica divide os itens em três classes - classe A (baixa), B (moderada) e C (alta), comparando os valores das exigências dos itens no sistema de controlo de gestão de sobressalentes. Contudo, esta análise tem algumas lacunas que tornam necessária a inserção de mais critérios na classificação. A escolha do número de critérios, bem como o peso a ser atribuído a cada um deles, deve ser estipulado pelos gestores da organização (Vergara *et al.*, 2020; Mor *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2022).

Outra técnica comum é a VED (*Vital, Essential, and Desirable*) que classifica as peças sobressalentes de acordo com a sua criticidade, com base na consulta com especialistas. Esta classificação é apropriada para peças

sobressalentes que não têm uma procura previsível, como as matérias-primas. Um exemplo é quando não existe um item como peça sobressalente, pelo que esse item deve ser classificado como vital (Mor *et al.*, 2021).

Uma decisão multicritério combinando a análise ABC e VED exigirá a aplicação de diferentes níveis, o que diminui em VED e aumenta em ABC (Carboneras *et al.*, 2021).

3 MODELAGEM MULTICRITÉRIO

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

O estudo foi realizado em uma planta de grande porte industrial brasileiro que atua no mercado siderúrgico. Nessa planta, mais de 20.000 funcionários operam equipamentos de grande porte, tais como sinterizações, altos-fornos, aciaria, máquinas de lingotamento contínuo, laminadores de tiras a quente e a frio, decapagens, entre outros. A planta encontra-se situada na região sudeste do Brasil.

Neste tipo de instalações, se torna um desafio efetuar um gerenciamento da manutenção de sistemas hidráulicos.

Constituiu-se um comitê por meio da identificação de especialistas que atuam na engenharia de manutenção na respectiva área de produção, de modo a poder avaliar os pontos cruciais da gestão de manutenção dos sistemas hidráulicos em uma perspectiva diversificada em termos de interesses na tomada de decisão.

A utilização do *brainstorming* possibilita identificar de forma eficaz as potenciais causas de um determinado problema, de acordo com as opiniões de especialistas. Os autores fizeram uso desta ferramenta almejando melhorar o nível de qualidade de um produto, identificando a sua causa raiz por meio de um problema de decisão (Siwiec; Pacana, 2021).

Neste contexto, conduziu-se uma sessão de *brainstorming* de modo a poder identificar os principais fatores e/ou variáveis capazes de influenciar a gestão da manutenção de sistemas hidráulicos. Avaliaram-se as ideias propostas, e por meio de uma visão holística da gestão de manutenção dos sistemas hidráulicos, explanaram-se os itens detectados mediante a Figura 19.

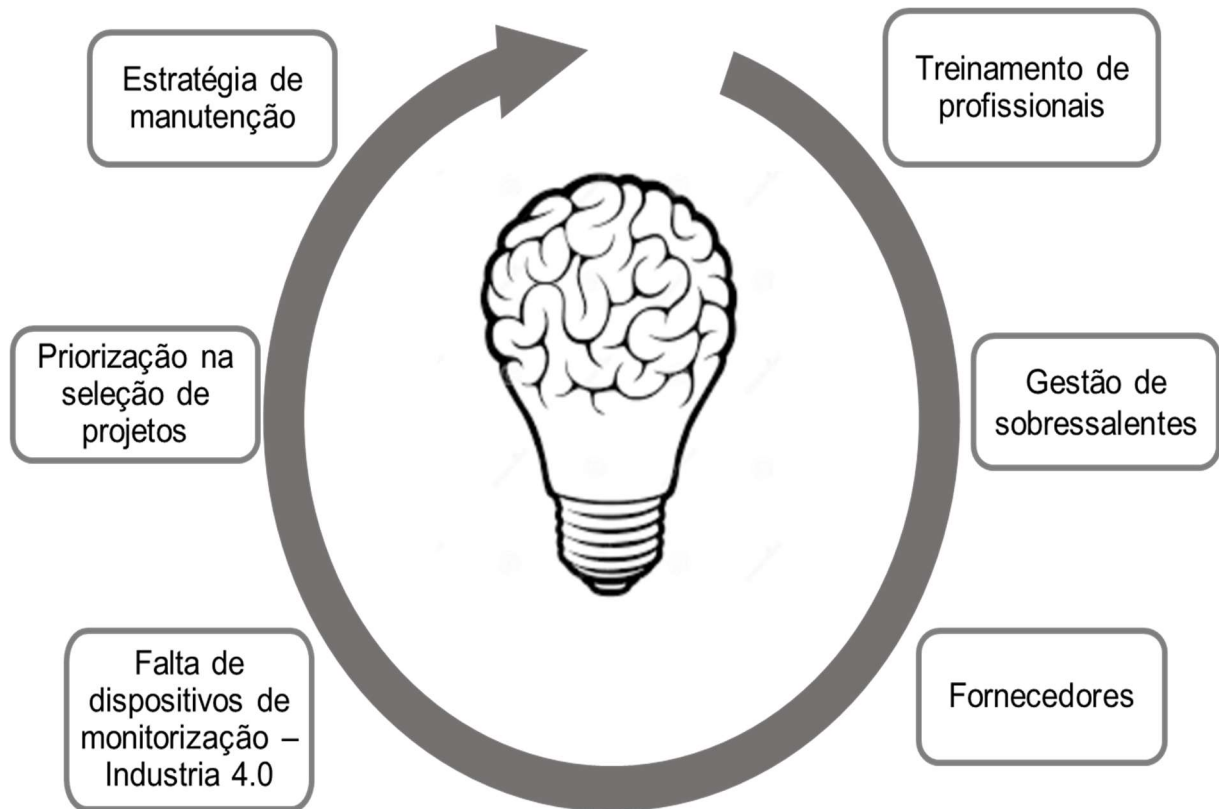
Conforme Rios *et al.* (2024), a decisão de realizar grupos focais baseou-se na necessidade de trazer diferentes perspectivas e experiências dos especialistas envolvidos no departamento de manutenção. Os grupos de discussão fornecem um *feedback* detalhado nas fases de desenvolvimento do protótipo.

Utilizou-se o método *focus group*, consistindo num agrupamento de especialistas previamente selecionados por meio de um debate com duração de 60 a 100 minutos.

Segundo Bauer e Gaskell (2002, p. 79), “o grupo focal é um debate aberto e acessível a todos: os assuntos em questão são de interesse comum; as diferenças de

status entre os participantes não são levadas em consideração; e o debate se fundamenta em uma discussão racional”.

Figura 19 - *Brainstorming*



Fonte: Elaborado pelo autor

Estimulou-se a participação dos especialistas de modo a poder abranger os principais problemas existentes para cada ponto identificado, onde se abordou as seguintes considerações:

- **Estratégia de manutenção** - A seleção de uma estratégia de manutenção é uma decisão frequentemente tomada com incerteza. Considerou-se a definição deste ponto como uma estratégia primordial para a gestão da manutenção de sistemas hidráulicos.
- **Priorização na seleção de projetos** - A priorização na seleção de projetos por vezes também é uma tomada de decisão com incerteza, sendo que uma prioridade para alocação de recursos numa organização se torna fundamental para gerar valor.

- Falta de dispositivos de monitorização (Indústria 4.0) - Este fator se torna de supra importância, uma vez que influencia o ambiente de produção e possibilita a monitorização contínua dos ativos, porém não era um ponto em que existia incerteza.
- Seleção de fornecedores - Os insumos para os sistemas hidráulicos possuem uma importância crucial na indústria siderúrgica, uma vez que estes sistemas podem gerar riscos para a segurança pessoal e meio ambiente.
- Gestão de sobressalentes - A gestão do inventário de peças sobressalentes por vezes gera incerteza, tornando-se um item que requer uma atenção substancial por parte da gestão.
- Treinamento de profissionais - Profissionais habilitados proporcionam geração de valor para uma organização, tornando-se vital para a disponibilidade e confiabilidade de ativos. Porém este item, não gerava incerteza.

Neste contexto, se priorizou a elaboração de frameworks para a seleção de estratégia de manutenção, priorização na seleção de projetos, seleção de fornecedores e gestão de sobressalentes.

Identificou-se um grupo dedicado de especialistas com ampla experiência industrial para cada um dos quatro itens propostos. Embora possuam funções diferentes, as suas opiniões foram igualmente consideradas, uma vez que todos se encontram diretamente envolvidos na gestão da manutenção.

Escolheu-se o método AHP, uma vez que detém um procedimento compreensivo e racional para modelar um problema de decisão, representando e quantificando as variáveis envolvidas, almejando uma compreensão ágil por parte de todos os envolvidos.

Este método além de ser o método mais utilizado para tomada de decisão multicritério (MCDM), ele corrobora com a possibilidade de aplicação num ambiente operacional, uma vez que não necessita da aquisição de um software específico por parte da organização.

Utilizou-se o software Microsoft Excel para a aplicação deste método, por meio das alternativas, critérios e subcritérios de acordo com os *frameworks* propostos.

3.1.1 Seleção de estratégia de manutenção

Para este ponto, realizaram-se as entrevistas dos especialistas da seguinte forma: três engenheiros do departamento de engenharia de manutenção. Consideraram-se as suas opiniões de modo igual, uma vez que todos os especialistas atuam diretamente com manutenção de equipamentos hidráulicos.

As estratégias de manutenção – manutenção autônoma, manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva, foram identificadas na literatura, a partir de dados correlatados. Assim sendo, coletaram-se dados para que fosse possível definir a estratégia prioritária para a seleção de manutenção adequada a sistemas hidráulicos de uma indústria siderúrgica.

a) Seleção de critérios e subcritérios

A literatura existente destaca seis critérios como sendo os que possuem maior impacto numa seleção de estratégia de manutenção: segurança e proteção, custo, confiabilidade, disponibilidade, viabilidade, e valor acrescentado. Os autores elaboraram uma revisão bibliográfica que sintetiza os critérios mencionados e os respectivos subcritérios utilizados para realizar a seleção da estratégia de manutenção (Carpitella *et al.*, 2021).

Para identificar a estratégia de manutenção a ser adotada pela empresa, elaborou-se uma de análise de criticidade, levando em consideração os seguintes parâmetros: 1. Custo; 2. Segurança; 3. Confiabilidade; 4. Qualidade; e 5. Viabilidade. Os critérios selecionados foram identificados na literatura, e aprovados pelo comitê de análise deste estudo. A identificação dos subcritérios se concretizou a partir da literatura (Rahimi, 2014; Ge *et al.*, 2017; Ohta, 2018; Carpitella *et al.*, 2021). Posteriormente, por meio de um questionário entregue aos responsáveis de manutenção da linha de produção, que seguem as diretrizes tanto das metas estabelecidas da empresa, como as condições do departamento de manutenção, tendo se identificado todos os subcritérios de acordo com a Quadro 5.

Quadro 5 - Critérios e Subcritérios selecionados (Estratégia de manutenção)

Critérios (Abreviação)	Subcritérios (Abreviação)
Custo (W1)	Sobressalentes (W11)
	Mão de Obra (W12)
Segurança (W2)	Meio Ambiente (W21)
	Pessoal (W22)
	Ativo (W23)
Confiabilidade (W3)	Disponibilidade de Sobressalentes (W31)
	Tempo Médio para Reparar (W32)
	Treinamento (W33)
	Análise de Falha (W34)
Qualidade (W4)	Mão de Obra Especializada (W41)
	Sobressalentes Adequados (W42)
	Tempo Médio entre Reparos (W43)
Viabilidade (W5)	Tendência de Mercado (W51)
	Modernização de Equipamentos (W52)

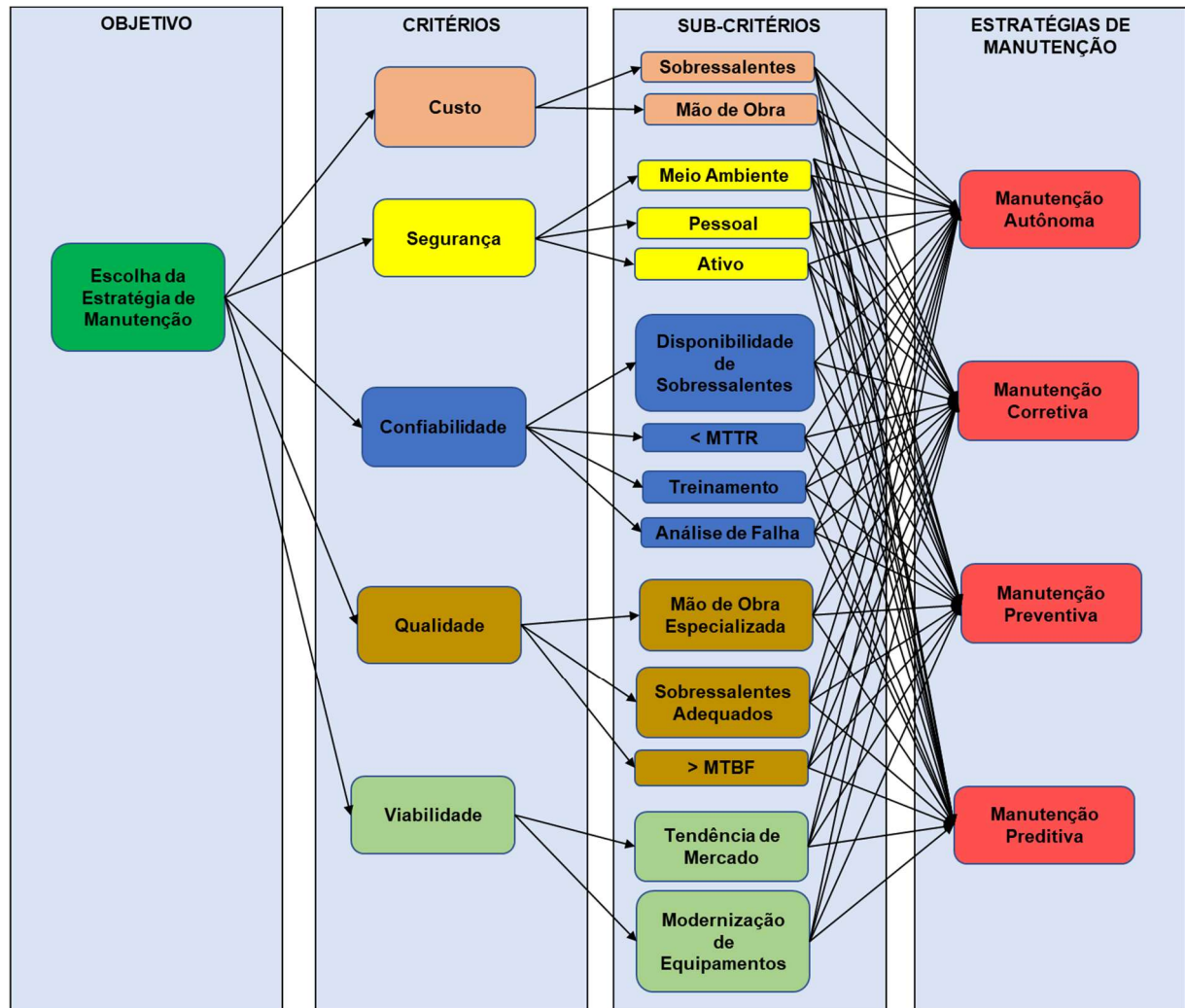
Fonte: Elaborado pelo autor

Existem algumas opções de estratégias de manutenção, onde as quatro principais alternativas são: manutenção autônoma, manutenção corretiva, manutenção preditiva e manutenção preditiva (Ge *et al.*, 2017; Ohta, 2018).

b) Árvore hierárquica para aplicação do método

Para a aplicação do método AHP, desenvolveu-se a hierarquia conforme Figura 20.

Figura 20 - Hierarquia para aplicação do AHP (Estratégia de manutenção)



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Priorização na seleção de projetos hidráulicos

Para este ponto, realizaram-se as entrevistas dos especialistas da seguinte forma: dois engenheiros do departamento de engenharia de manutenção e um engenheiro da área de produção. Consideraram-se as suas opiniões de modo igual, uma vez que todos os especialistas se encontram envolvidos na gestão de projetos.

Por vezes surgem desafios em como determinar a priorização na seleção de projetos hidráulicos, em virtude de alguns destes projetos possuírem um nível de criticidade diferente relativamente às prioridades de produção e manutenção. Assim sendo, a disposição da priorização dos projetos numa árvore hierárquica com pesos baseados em critérios quantitativos e qualitativos, ajuda a formular o problema de investigação.

As análises quantitativas basearam-se em informações e dados existentes a partir das características dos projetos hidráulicos, e realizou-se a análise qualitativa por meio de julgamentos elaborados por especialistas, vinculando a sua experiência e conhecimentos individuais, com o objetivo de se chegar a uma conclusão assertiva do projeto mais relevante a ser priorizado.

a) Seleção de subcritérios

O problema de decisão se encontra atribuído à priorização de três alternativas:

- Projeto 1: Modernização do sistema hidráulico da secção de entrada. Complementa a unidade de potência, unidade de recirculação e filtragem, unidade de acumuladores, e quatro bancos hidráulicos.
- Projeto 2: Modernização do sistema hidráulico na secção central. Complementa a unidade de potência, unidade de recirculação e filtragem, unidade de acumuladores, e três bancos hidráulicos.
- Projeto 3: Modernização do sistema hidráulico do virador de bobinas. Complementa a unidade de potência, unidade de recirculação e filtragem, unidade de acumuladores, e um banco hidráulico.

A Quadro 6 resume os subcritérios identificados na literatura e aprovados pelo comitê de revisão deste estudo.

Quadro 6 - Subcritérios selecionados

(continua)

Subcritérios (Abreviação)	Referências
Produção eficiente (B1)	(Wei, 2021)
Rendimento industrial sustentável (B2)	(Wei, 2021)
Satisfação dos funcionários (B3)	(Neves-Silva; Camarinha-Matos, 2022)
Cumprimento das normas (O1)	(Neves-Silva; Camarinha-Matos, 2022)
Diferenciação de produtos (O2)	(Kumar, 2019)
Partilha de tecnologia (O3)	(Kumar, 2019)
Operação e manutenção (C1)	(Alizadeh <i>et al.</i> , 2020)
Investimento (C2)	(Alizadeh <i>et al.</i> , 2020)
Treinamento (C3)	(Neves-Silva; Camarinha-Matos, 2022)

Quadro 6 - Subcritérios selecionados

(conclusão)

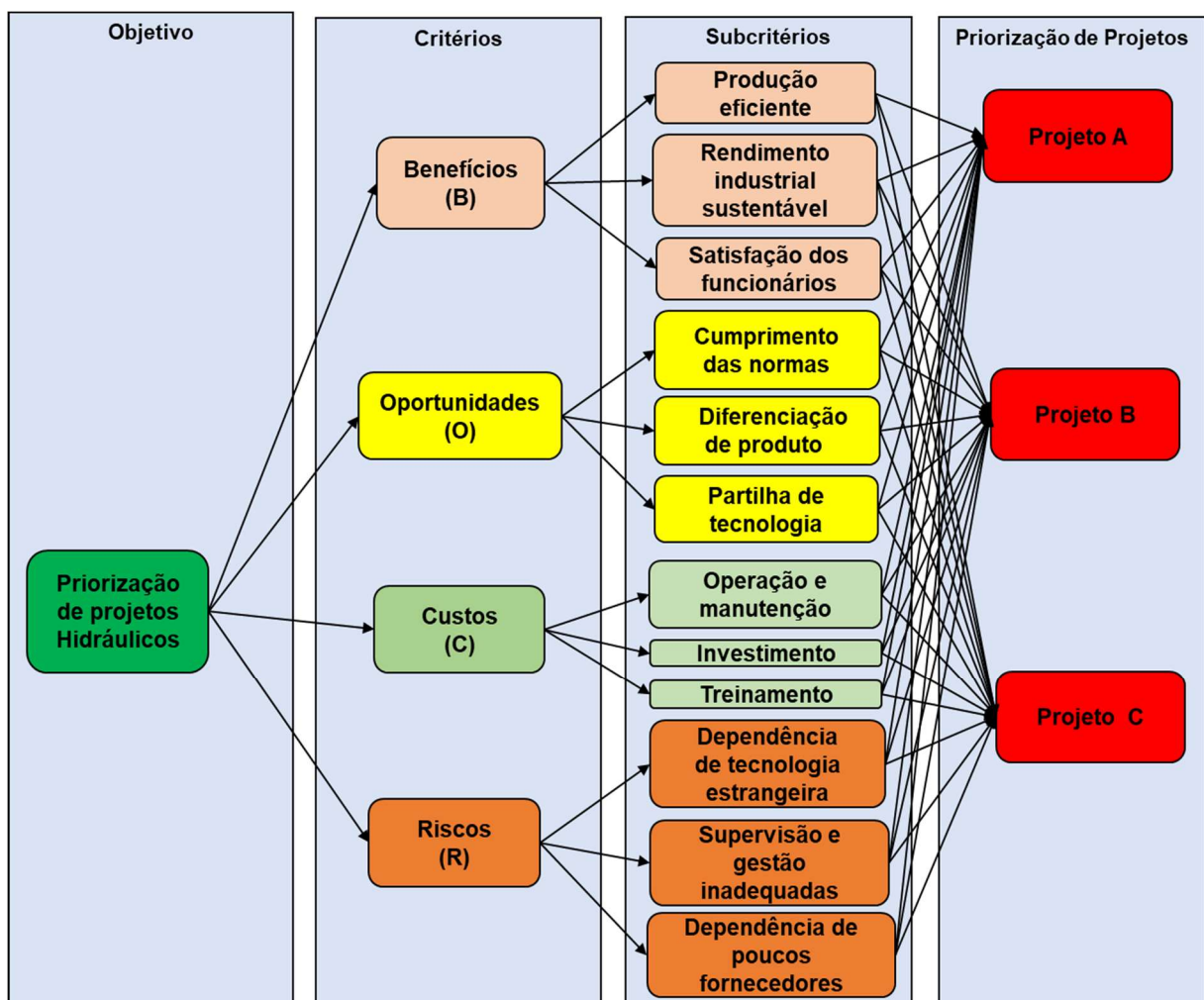
Subcritérios (Abreviação)	Referências
Dependência de tecnologia estrangeira (R1)	(Alizadeh <i>et al.</i> , 2020)
Supervisão e gestão inadequadas (R2)	(Wei, 2021)
Dependência de poucos fornecedores (R3)	(Kumar, 2019)

Fonte: Elaborado pelo autor

b) Árvore hierárquica para aplicação do método

Para a solução deste problema utilizou-se o modelo AHP-BOCR, onde se desenvolveu a hierarquia conforme a Figura 21.

Figura 21 - Hierarquia para aplicação do AHP (Projetos)



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.3 Seleção de fornecedores para sistemas hidráulicos

Para este ponto, realizaram-se as entrevistas dos especialistas da seguinte forma: dois engenheiros do departamento de engenharia de manutenção e especialista da área comercial. Consideraram-se as suas opiniões de modo igual, uma vez que todos os especialistas se encontram envolvidos na gestão de fornecedores.

A seleção de fornecedores para sistemas hidráulicos é fundamental na indústria siderúrgica, uma vez que um processo de seleção de fornecedores mal executado, pode resultar na compra de equipamentos de baixa qualidade, ocasionando sérios problemas nas operações das organizações.

a) Seleção de critérios

Na literatura existem uma série de critérios de seleção de fornecedores, porém cada empresa deverá estruturar o problema e escolher os critérios pertinentes, de modo a poder encontrar o melhor fornecedor. Os critérios para a seleção de fornecedores se encontram classificados como quantitativos e qualitativos (Taherdoost; Brard, 2019).

Os critérios Custo, Qualidade e Entrega se enquadram como os critérios mais proeminentes no meio industrial (Depczyński, 2021). Os subcritérios são provenientes da norma ABNT NBR ISO 9000 para a seleção de fornecedores, e foram aprovados pelos especialistas pertinentes a este estudo. Os fornecedores de sistemas hidráulicos são classificados por marcas *premium*, amplamente referenciadas pela indústria siderúrgica. Por este meio, a Quadro 7 representa os critérios e subcritérios selecionados.

Quadro 7 - Critérios e Subcritérios selecionados

(continua)

Critérios	Subcritérios
Qualidade (X1)	Metrologia Estruturada (X11) Inspeção dos Processos (X12) Gestão Administrativa (X13) Organização / Capacidade Fabril (X14) Homologação / Aquisição (X15)

Quadro 7 - Critérios e Subcritérios selecionados

(conclusão)

Critérios	Subcritérios
Entrega (X2)	Capacidade (X21) Planejamento (X22) Logística (X23) Controle de <i>Stocks</i> (X24)
Política de Garantia e Reclamações (X3)	Proatividade (X31) Comunicação (X32) Tempo de Reposição (X33) Ações Corretivas (X34)
Preço (X4)	Custo (X41) Formas de Pagamento (X42) Habilidade de Negociação (X43)
Capacidade e Tecnologia (X5)	Experiência (X51) Profissionais Habilitados (X52) Projeto (X53) Inovação (X54) Treinamento (X55)

Fonte: Elaborado pelo autor

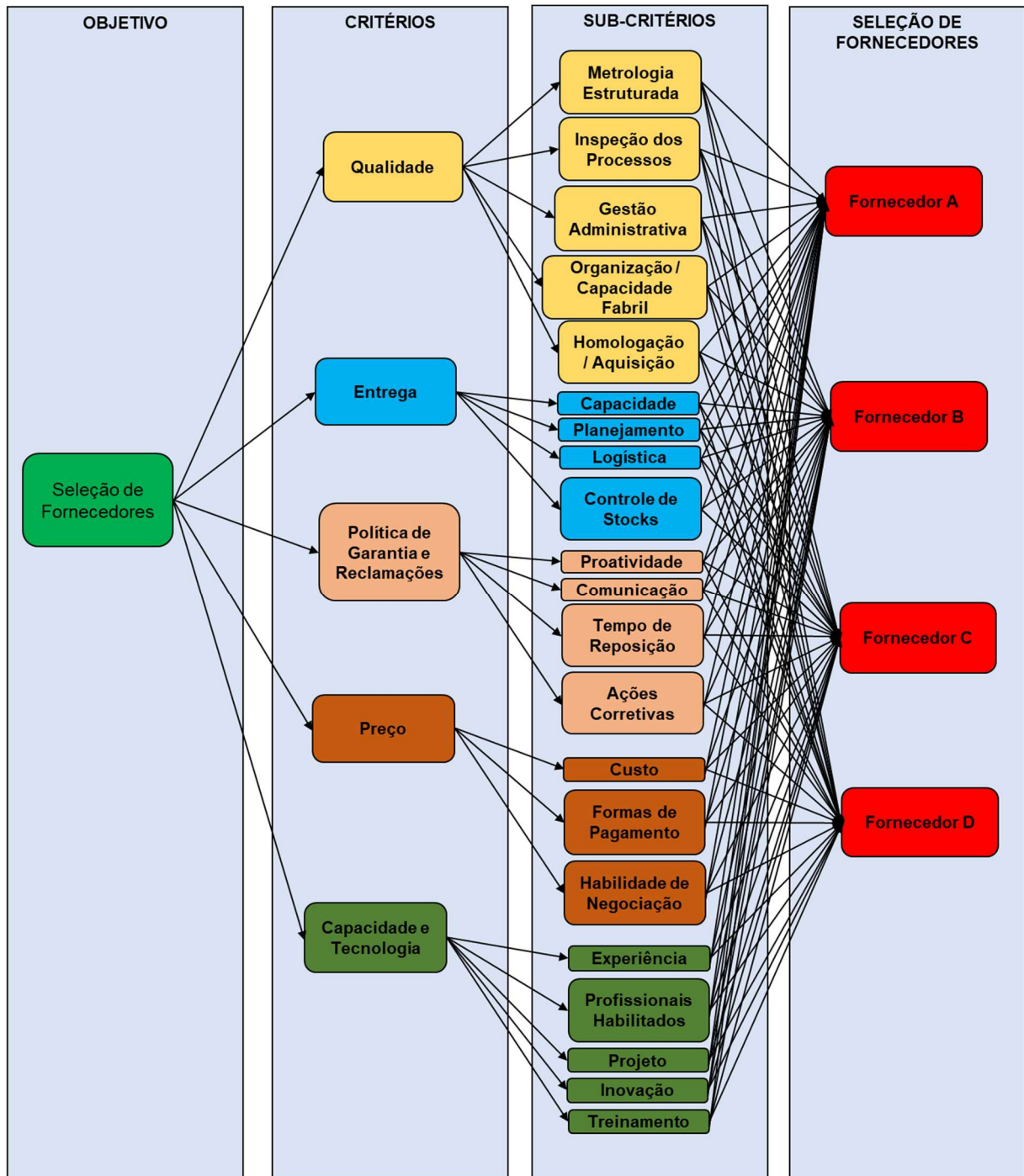
Os critérios identificados na literatura e posteriormente aprovados pelo comitê de revisão deste estudo, se identificam como:

- Qualidade: Capacidade de cumprir consistentemente as especificações, incluindo materiais, dimensões, concepção, durabilidade, variedade, e itens de produção.
- Entrega: Capacidade de cumprir os prazos estipulados, que incluem: prazos de entrega, pontualidade, transporte, incidentes, localização, taxa de abastecimento, desempenho, e gestão de devoluções.
- Garantia e política de reclamações: Uma forma de fornecer uma garantia, que providencia o reparo ou substituição de um produto, dentro de um período estipulado.
- Preço: Este item inclui o preço unitário, condições de preços, taxas de câmbio, impostos e descontos.
- Capacidade & Tecnologia: Capacidade e agilidade em adquirir novas tecnologias, e recursos técnicos para processos de investigação e desenvolvimento.

b) Árvore hierárquica para aplicação do método

Coletaram-se dados para a definição da estratégia prioritária para a seleção adequada de fornecedores de sistemas hidráulicos. Para a aplicação do método AHP, desenvolveu-se a árvore hierárquica de acordo com a Figura 22.

Figura 22 - Hierarquia para aplicação do AHP (Fornecedores)



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4 Avaliação de criticidade de peças sobressalentes para sistemas hidráulicos

Para este ponto, realizaram-se as entrevistas dos especialistas da seguinte forma: dois engenheiros do departamento de engenharia de manutenção e um analista do departamento de gestão de estoque e planejamento de materiais. Consideraram-se as suas opiniões de modo igual, uma vez que todos os especialistas se encontram envolvidos na gestão da avaliação de criticidade de peças sobressalentes.

No tipo de instalações de sistemas hidráulicos, por vezes se torna um desafio determinar qual é a peça sobressalente mais crítica, uma vez que algumas peças sobressalentes têm a possibilidade de manter um nível de criticidade diferente em relação às prioridades de manutenção e logística. Assim sendo, a disposição da priorização de peças sobressalentes mais críticas numa árvore hierárquica, com as suas classificações baseadas em critérios quantitativos e qualitativos, ajuda a formular o problema de investigação.

As análises quantitativas basearam-se em informações e dados existentes a partir das características das peças sobressalentes, e realizou-se a análise qualitativa por meio de julgamentos elaborados por especialistas, vinculando a sua experiência e conhecimentos individuais, com o objetivo de se chegar a uma conclusão assertiva da peça sobressalente mais crítica.

a) Seleção de critérios

Os critérios para avaliação da criticidade das peças sobressalentes baseiam-se em critérios logísticos e de manutenção. Os critérios de manutenção são: tempo de substituição de peças sobressalentes, complexidade do processo de substituição, tipo de falha, frequência, e critérios associados à máquina. Por outro lado, os critérios logísticos são: número de potenciais fornecedores, armazenamento, custo e prazo de entrega (Antosz; Ratnayake, 2019).

A criticidade é a característica mais importante na gestão de peças sobressalentes, e os critérios mais utilizados são: a criticidade do equipamento; a probabilidade de falha; o tempo de substituição; o número de fornecedores; a disponibilidade de especificações técnicas, e o tipo de manutenção (Nariswari *et al.*, 2019).

Durán (2015), elaborou uma hierarquia centrada na criticidade de peças sobressalentes, considerando as políticas que permitem estabelecer uma escala de priorização. De acordo com o Quadro 8, se encontram listados os fatores, atributos e subatributos considerados.

Quadro 8 - Estrutura de atributos para a criticidade das peças sobressalentes

Fator	Atributos	Subatributos
Logística	Reabastecimento	<i>Lead time</i> Política de encomendas
	Fornecedores	Substitutibilidade/Singularidade Proximidade Responsividade
	Economia	Implicações de ruptura de stock Estratégia de armazenamento Preço
Manutenção	Falhas	Frequência/taxa Previsibilidade
	Equipamento	Ciclo de vida do equipamento Criticidade do equipamento Reparabilidade
	Operações	Frequência de utilização Política de manutenção Responsividade Disponibilidade de informação técnica

Fonte: Adaptado de Durán (2015)

Antosz e Ratnayake (2019), elaboraram uma tabela que aborda a associação dos subcritérios e *rating's*, por meio de classificação e valores selecionados pelos autores, de acordo com o inventário. Adaptou-se Tabela 7 de acordo com os autores.

Tabela 7 - Associação de Subcritérios e Rating's

(continua)

Subcritérios	Rating's
Ciclo de vida - Define o nível de frequência de falha da peça sobressalente	Até 1 em 5 anos 1 a 3 em 5 anos Mais de 3 em 5 anos
Falha de Previsibilidade - Define o nível de previsão de falha da peça sobressalente	Baixo Médio Alto

Tabela 7 - Associação de Subcritérios e Rating's

(conclusão)

Subcritérios	Rating's
Reparabilidade - Define o tempo esperado necessário para a substituição da peça sobressalente	Até 2 horas 2 a 8 horas Mais de 8 horas
Preço - Define o custo de um processo de compra de peças sobressalentes	Até \$5.000 \$5.000 a \$10.000 Mais de \$10.000
Lead Time – Compreende quanto tempo é necessário para um processo de compra de peças sobressalentes	Mais de 30 dias 30 a 90 dias Mais de 90 dias
Fornecedores - Define quantos fornecedores qualificados estão disponíveis no mercado.	Um Dois ou três Mais de três
Política de Manutenção - Define o tipo de manutenção em que pode ser utilizada a peça sobressalente	Manutenção Corretiva Manutenção Preventiva Manutenção Preditiva
Frequência de utilização - Define o tempo de funcionamento por dia	Até 8 horas por dia 8 a 12 horas por dia Mais de 18 horas por dia
Qualificação dos empregados - Compreende a qualificação necessária dos funcionários de manutenção em um processo de substituição de peças sobressalentes	Staff da área Especialista da empresa Especialista externo

Fonte: Adaptado de Antosz e Ratnayake (2019)

Identificaram-se as necessidades do departamento de manutenção hidráulica almejando maximizar a disponibilidade de inventário, e minimizar os custos envolvidos. Os dados se encontram relacionadas com os registros do sistema de manutenção, com as entrevistas realizadas aos funcionários envolvidos na gestão da manutenção de sistemas hidráulicos e do inventário de sobressalentes.

Assim sendo, elaborou-se uma análise detalhada por meio de um comitê de especialistas, levando em consideração três critérios - Criticidade do equipamento, logística e manutenção. Relativamente aos subcritérios, propôs-se os itens citados na Tabela 7. Relativamente às classificações de *rating's*, atribuíram-se diferentes valores de pontos para cada item. Neste contexto, todos os parâmetros se encontram apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Seleção de Critérios, Subcritérios e *Rating's*

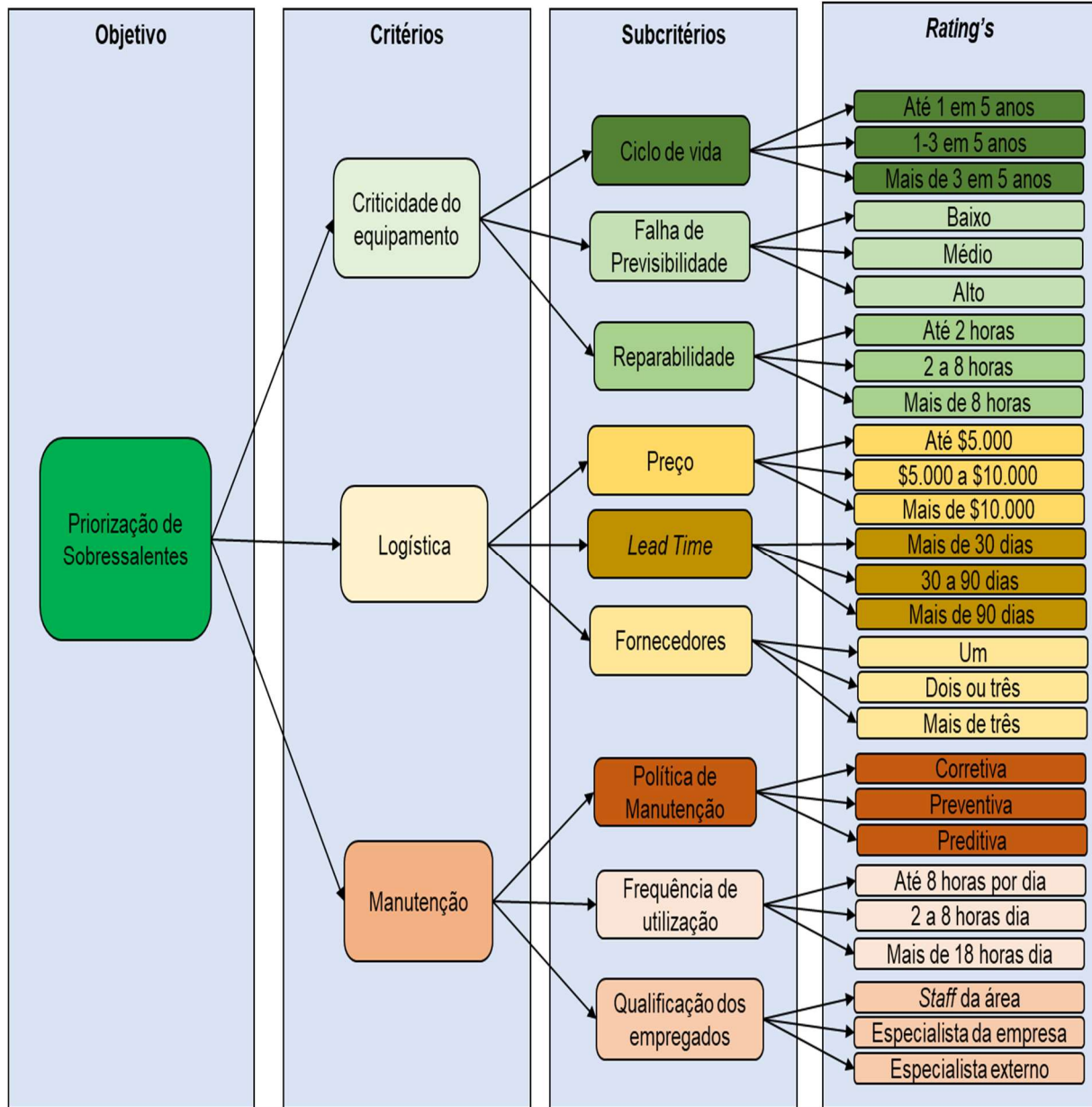
Critérios	Subcritérios	<i>Rating's</i>		
		A	B	C
Críticidade do equipamento (Y1)	Ciclo de vida (Y11)	Até 1 em 5 anos 1 Ponto	1-3 em 5 anos 2 Pontos	Mais de 3 em 5 anos 3 Pontos
	Falha de Previsibilidade (Y12)	A Baixo 1 Ponto	B Médio 2 Pontos	C Alto 3 Pontos
	Reparabilidade (Y13)	A Até 2 horas 1 Ponto	B 2 a 8 horas 2 Pontos	C Mais de 8 horas 3 Pontos
	Preço (Y21)	A Até \$5.000 1 Ponto	B \$5.000 a \$10.000 2 Pontos	C Mais de \$10.000 3 Pontos
	Logística (Y2)	A Mais de 30 dias 1 Ponto	B 30 a 90 dias 2 Pontos	C Mais de 90 dias 3 Pontos
		V Um 3 Pontos	E Dois ou três 2 Pontos	D Mais de três 1 Ponto
Manutenção (Y3)	Política de Manutenção (Y31)	V Manutenção Corretiva 3 Pontos	E Manutenção Preventiva 2 Pontos	D Manutenção Preditiva 1 Ponto
	Frequência de utilização (Y32)	A Até 8 horas por dia 1 Ponto	B 8 a 12 horas por dia 2 Pontos	C Mais de 18 horas por dia 3 Pontos
	Qualificação dos empregados (Y33)	A Staff da área 1 Ponto	B Especialista da empresa 2 Pontos	C Especialista externo 3 Pontos

Fonte: Elaborado pelo autor

Realizou-se a coleta de dados de modo a poder definir a prioridade do nível crítico de quatro peças sobressalentes utilizadas nos sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica citada anteriormente. Este estudo foi realizado qualitativamente através de julgamentos de especialistas e quantitativamente, uma vez que se recolheu dados a partir de registros do sistema de manutenção da empresa. Para a aplicação do método AHP, desenvolveu-se uma árvore hierárquica considerando os critérios, subcritérios, e os *rating's* atribuídos, conforme é demonstrado na Figura 23.

b) Árvore hierárquica para aplicação do método

Figura 23 - Hierarquia para aplicação do AHP (Sobressalentes)

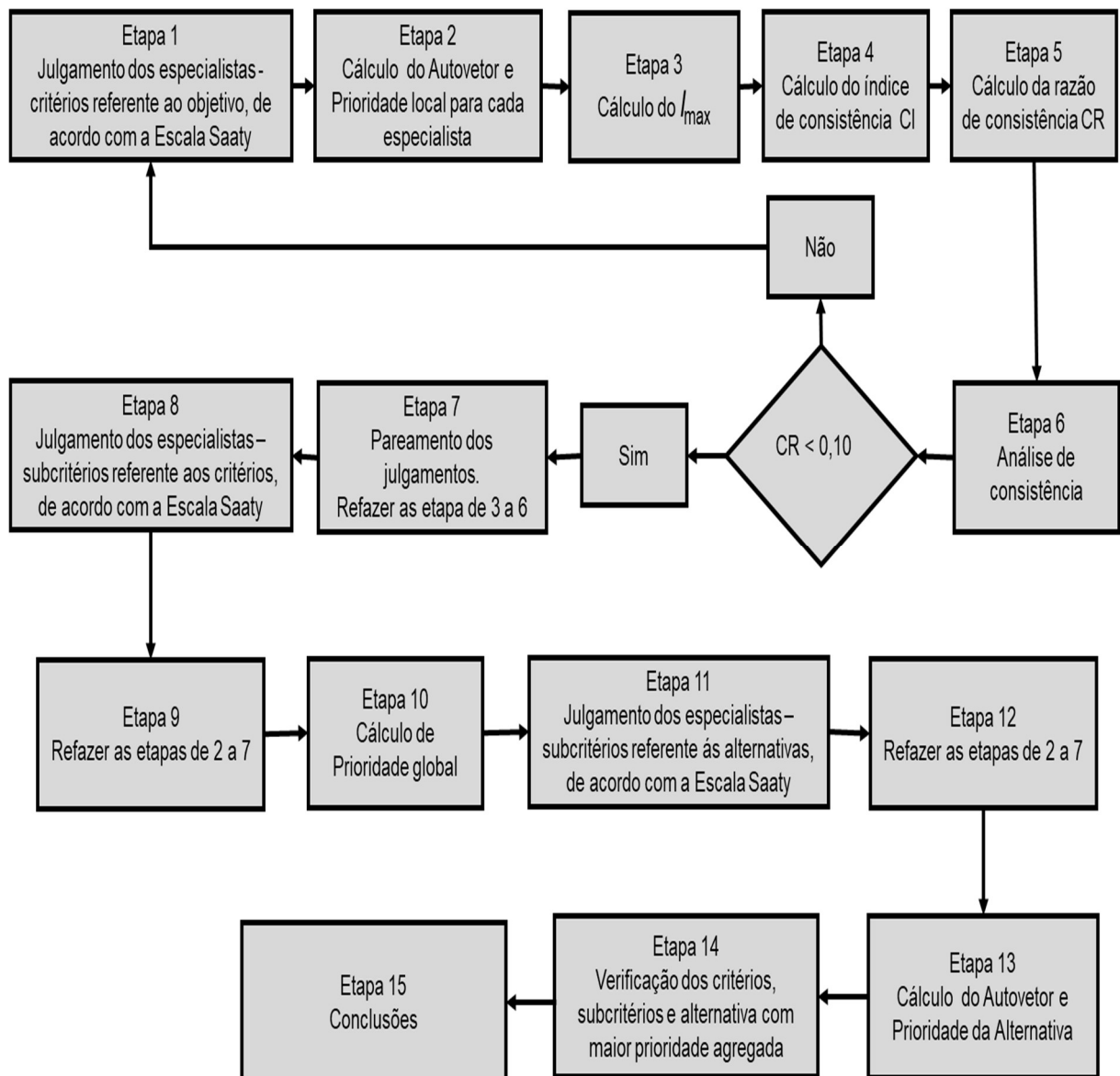


Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS

O método AHP pode ser aplicado por meio de etapas, onde a Figura 24 demonstra o fluxograma com os passos a serem conduzidos para cada aplicação.

Figura 24 - Fluxograma com as etapas de aplicação do método AHP



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA A SELEÇÃO DE ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO

Inicialmente, entrevistaram-se três especialistas de engenharia de manutenção que atribuíram valores para cada variável definida no método, de acordo:

uma matriz em relação ao objetivo, cinco matrizes em relação aos critérios e catorze matrizes relativamente às alternativas de estratégia de manutenção. A Tabela 9 apresenta as comparações dos três especialistas entre os critérios efetuados relativamente ao objetivo deste estudo.

Tabela 9 - Julgamento dos critérios pelos especialistas

E1	W1	W2	W3	W4	W5	E2	W1	W2	W3	W4	W5	E3	W1	W2	W3	W4	W5
W1	1	0,33	0,20	0,14	3	W1	1	0,20	0,33	2	1	W1	1	0,20	0,20	4	3
W2	3	1	0,33	0,20	5	W2	5	1	3	3	5	W2	5	1	3	5	7
W3	5	3	1	0,50	7	W3	3	0,33	1	4	3	W3	5	0,33	1	5	5
W4	7	5	2	1	7	W4	0,50	0,33	0,25	1	3	W4	0,25	0,20	0,20	1	2
W5	0,33	0,20	0,4	0,14	1	W5	1	0,20	0,33	0,33	1	W5	0,33	0,14	0,20	0,50	1

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 10 apresenta as comparações agregadas referente aos três especialistas. Os critérios Segurança (W2) e Confiabilidade (W3) apresentam maior prioridade, o que corresponde à exigência de uma estratégia de manutenção de sistemas hidráulicos aplicada ao setor siderúrgico.

Tabela 10 - Prioridade agregada dos critérios

Agregado	W1	W2	W3	W4	W5	Autovetor	Prioridade
W1	1	0,24	0,24	1,05	2,08	0,657	10,65%
W2	4,22	1	1,44	1,44	5,59	2,179	35,31%
W3	4,22	0,69	1	2,15	4,72	1,971	31,94%
W4	0,96	0,69	0,46	1	3,48	1,014	16,43%
W5	0,48	0,18	0,21	0,29	1	0,350	5,67%
Soma	10,87	2,80	3,35	5,93	16,87		

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a matriz de comparações agregada apresentada na Tabela 10, obtém-se $I_{\max}$ por meio do vetor soma e do autovetor normalizado, onde é calculado a matriz de multiplicação apresentada abaixo na Matriz 4:

$$I_{\max} = [10,87; 2,80; 3,35; 5,93; 16,87] \cdot \begin{bmatrix} 0,657 \\ 2,179 \\ 1,971 \\ 1,014 \\ 0,350 \end{bmatrix} \approx 5,15 \quad (4)$$

Calculou-se o CI de acordo com a Equação 5:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} = \frac{(5,15-5)}{(5-1)} = 0,037 \quad (5)$$

Calculou-se o CR conforme a Equação 6:

$$CR = \frac{CI}{IR} = \frac{0,037}{1,12} = 0,033 \quad (6)$$

Portanto, os julgamentos não necessitam de revisão. Assim sendo, verificam-se que os critérios segurança e confiabilidade, correspondem à maior prioridade.

Em seguida, os especialistas compararam os subcritérios de acordo com a importância relativa no critério. A Tabela 11 ilustra as comparações agregadas para o Critério Custo (W1). A prioridade local é obtida com a normalização do autovetor direito da matriz de comparações. A prioridade global é obtida com a multiplicação da prioridade local do subcritério pela prioridade do critério, no caso 10,65%.

Tabela 11 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Custo

Custo	W11	W12	Local	Global
W11	1	1,65	62,28%	6,63%
W12	0,61	1	37,72%	4,02%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a matriz de comparações agregada apresentada na Tabela 13 não se faz necessária análise de consistência pois para $n = 2$, portanto $CI = RI = CR = 0$. Portanto, os julgamentos não necessitam de revisão. Repetiram-se as comparações dos subcritérios de acordo com a importância relativa para cada critério, que se encontram demonstrados nas Tabelas de 12 a 15.

Tabela 12 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Segurança

Segurança	W21	W22	W23	Local	Global
W21	1	0,38	3	27,46%	9,7%
W22	2,62	1	5,00	61,89%	21,85%
W23	0,33	0,20	1	10,64%	3,76%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Confiabilidade

Confiabilidade	W31	W32	W33	W34	Local	Global
W31	1,00	4,38	4,22	1,71	48,19%	15,39%
W32	0,23	1,00	0,33	0,28	7,77%	2,48%
W33	0,24	3,00	1,00	0,63	16,63%	5,31%
W34	0,58	3,56	1,59	1,00	27,40%	8,75%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Qualidade

Qualidade	W41	W42	W43	Local	Global
W41	1,00	3,56	3,30	63,05%	10,36%
W42	0,28	1,00	0,79	16,83%	2,76%
W43	0,30	1,26	1,00	20,12%	3,31%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 - Prioridade agregada dos subcritérios do Critério Viabilidade

Viabilidade	W51	W52	Local	Global
W51	1,00	0,69	40,95%	2,32%
W52	1,44	1,00	59,05%	3,35%

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio dos valores apresentados nas tabelas, verifica-se que o subcritério que apresenta maior valor agregado para o critério custo (W1) são os sobressalentes (W11), o subcritério que apresenta maior valor agregado para o critério segurança (W2) é o pessoal (W22), o subcritério que apresenta maior valor agregado para o critério confiabilidade (W3) é a Disponibilidade de Sobressalentes (W31), o subcritério que apresenta maior valor agregado para o critério Qualidade (W4) é a Mão de Obra Especializada (W41), finalmente, o subcritério que apresenta maior valor agregado para o critério Viabilidade (W5), é a Modernização de Equipamentos (W52).

Os subcritérios sobressalentes, e disponibilidade de sobressalente, se adequam como itens de relevância para a gestão de estoque, indicando que estes itens são de supra importância. Por outro lado, a mão de obra especializada e a segurança com as pessoas, revelam que os sistemas hidráulicos são ativos que requerem uma gestão e manutenção especializada. A modernização de equipamentos demonstra que estes ativos se encontram em evolução contínua.

Posteriormente, matrizes análogas foram preenchidas pelos especialistas onde compararam as alternativas de acordo com cada subcritério, resultando na matriz de decisão apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Prioridade agregada das alternativas

Estratégia	W11	W12	W21	W22	W23	W31	W32	W33	W34	W41	W42	W43	W51	W52	Global
Autônoma	8%	11%	20%	21%	27%	8%	11%	16%	28%	17%	12%	11%	28%	51%	18%
Corretiva	15%	9%	6%	5%	4%	35%	13%	6%	5%	12%	7%	6%	5%	6%	9%
Preventiva	28%	34%	29%	44%	32%	32%	53%	31%	15%	20%	37%	32%	23%	11%	30%
Preditiva	49%	46%	45%	30%	37%	26%	24%	47%	52%	50%	43%	51%	45%	32%	43%

Fonte: Elaborado pelo autor

A matriz de decisão contextualiza que a estratégia de manutenção preditiva apresenta o maior valor agregado com 43%, sendo este um valor expressivo comparativamente aos outros resultados. Este facto deixa evidente que esta estratégia de manutenção deverá ser priorizada.

Relativamente às estratégias de manutenção preventiva e autônoma, existiam dúvidas pela parte de alguns gestores relativamente ao resultado. Pelos resultados obtidos, verifica-se que a estratégia de manutenção preventiva prevalece relativamente à estratégia de manutenção autônoma. Isto se dá pela importância de mão de obra especializada para atuar na gestão e manutenção destes ativos.

A estratégia de manutenção corretiva apresentou um valor agregado muito baixo, indicando que este tipo de manutenção deve ser evitado.

Estes dados obtidos corroboram as técnicas preditivas como fundamentais para a disponibilidade, confiabilidade e segurança dos ativos relacionados a sistemas hidráulicos. Assim, espera-se evitar que ocorram perdas de produção que gerariam prejuízos para a indústria siderúrgica.

Os sistemas hidráulicos possuem um papel determinante em grande parte das organizações, onde a monitorização dos seus equipamentos desempenha um papel fundamental, prevenindo assim avarias num modo antecipado. Neste contexto, a manutenção preditiva para este tipo de ativos exerce uma importância imprescindível para o setor industrial (Alenany *et al.*, 2021).

As organizações estão a adotar cada vez mais técnicas de monitorização avançadas para personalizar as estratégias de manutenção. A manutenção preditiva tornou-se uma solução promissora para as indústrias transformadoras, onde o desempenho dos sistemas hidráulicos é fundamental (Noura *et al.*, 2024).

O material suplementar para o cálculo se encontra disponibilizado numa planilha em Excel - [Link](#).

4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA PRIORIZAÇÃO NA SELEÇÃO DE PROJETOS HIDRÁULICOS

Após terem sido realizado as entrevistas, três especialistas deram valores para cada variável relativamente à aplicação do modelo AHP-BOCR. As comparações agregadas são apresentadas na Tabela 17, onde os subcritérios B3, O1, C1, e R2 demonstraram a maior prioridade. Os resultados alcançados estão de acordo com as exigências de fiabilidade operacional para projetos hidráulicos na indústria siderúrgica.

Tabela 17 - Prioridade agregada de subcritérios

B	B1	B2	B3
19,23%	6,53%	4,42%	8,28%
O	O1	O2	O3
39,98%	27,89%	2,66%	8,43%
C	C1	C2	C3
30,71%	13,63%	4,06%	13,03%
R	R1	R2	R3
11,08%	4,25%	4,44%	2,39%

Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação obteve um índice de julgamento consistente, uma vez que *CR* se encontra dentro do valor aceitável ($\leq 0,1$), validando assim o julgamento dos especialistas.

Posteriormente, foram atribuídos os pesos alternados para os projetos selecionados de acordo com a Tabela 18.

Tabela 18 - Pesos alternados

Nível	Descrição	Prioridade
1	Fraco	40%
2	Regular	50%
3	Bom	70%
4	Muito Bom	85%
5	Excelente	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 19 mostra as pontuações alcançadas dos subcritérios, a prioridade, e a classificação final de acordo com cada projeto.

Tabela 19 - Prioridade do projeto

		Prioridade Local	Prioridade Geral	1	2	3
	B1	6,53%		85,00%	50,00%	70,00%
B	B2	4,42%	19,23%	85,00%	50,00%	70,00%
	B3	8,28%		100,00%	85,00%	100,00%
	O1	27,89%		100,00%	100,00%	100,00%
O	O2	2,66%	38,98%	100,00%	70,00%	40,00%
	O3	8,43%		100,00%	100,00%	100,00%
	C1	13,63%		100,00%	100,00%	100,00%
C	C2	4,06%	30,71%	40,00%	70,00%	70,00%
	C3	13,03%		100,00%	100,00%	100,00%
	R1	4,25%		85,00%	85,00%	85,00%
R	R2	4,44%	11,08%	40,00%	40,00%	40,00%
	R3	2,39%		70,00%	70,00%	70,00%
			Agregado	91,90%	87,25%	89,88%
			Prioridade	1	3	2

Fonte: Elaborado pelo autor

O Projeto 3 tem a maior prioridade, onde a ordem final de prioridade global é apresentada como: $1 > 3 > 2$.

O material suplementar para o cálculo se encontra disponibilizado numa planilha em Excel - [Link](#).

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA SELEÇÃO DE FORNECEDORES PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS

Relativamente à aplicação do método AHP, entrevistaram-se três especialistas que atribuíram valores para cada critério e subcritério pré-definido. A atribuição de valores ocorreu de acordo com o seguinte: uma matriz relativa ao objetivo, cinco matrizes relativas aos critérios, e vinte e uma matrizes relativas às alternativas do fornecedor. Inicialmente, os especialistas compararam os critérios relativos à sua importância com o objetivo.

Posteriormente, os especialistas compararam os subcritérios relativamente à sua importância, relativamente ao critério pertinente. A Tabela 20 apresenta as prioridades agregadas.

Tabela 20 - Prioridades dos critérios e subcritérios

Critério	Subcritério	Local	Global
X1 (44%)	X21	31%,	13,5%
	X22	41%	18,2%
	X23	14%	6%
	X24	8%	3,5%
	X25	6%	2,6%
X2 (17%)	X31	38%	6,6%
	X32	39%	6,8%
	X33	14%	2,5%
	X34	8%	1,5%
	X35	42%	5,3%
X3 (13%)	X36	7%	0,9%
	X37	12%	1,5%
	X38	38%	4,8%
	X41	49%	2,3%
X4 (5%)	X42	20%	0,9%
	X43	31%	1,5%
	X51	20%	4,3%
X5 (22%)	X52	36%	7,7%
	X53	27%	5,9%
	X54	8%	1,7%
	X55	9%	2%

Fonte: Elaborado pelo autor

Os subcritérios Inspeção do Processo, Planeamento, Proatividade, Custo, e Profissionais Qualificados, possuem as prioridades mais elevadas. Estes subcritérios indicam as características mais influentes do equipamento para sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica.

Finalmente, os especialistas compararam os Fornecedores de A à D, relativamente ao seu desempenho de acordo com os subcritérios. A Tabela 21 apresenta as prioridades que resultaram na matriz de decisão.

Tabela 21 - Prioridades locais dos fornecedores

(continua)

Fornecedor	X11	X12	X13	X14	X15	X21	X22	X23	X24	X31	X32
A	42%	49%	45%	43%	36%	42%	48%	44%	44%	49%	48%
B	21%	14%	26%	25%	29%	21%	18%	22%	24%	26%	31%
C	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	11%	7%	7%
D	25%	25%	17%	22%	23%	26%	23%	25%	22%	18%	14%

Tabela 21 - Prioridades locais dos fornecedores

(conclusão)

X33	X34	X41	X42	X43	X51	X52	X53	X54	X55
42%	38%	18%	25%	51%	43%	46%	55%	58%	55%
37%	34%	23%	25%	6%	15%	17%	12%	19%	21%
8%	10%	34%	25%	11%	17%	14%	10%	9%	10%
13%	19%	26%	25%	32%	25%	23%	23%	14%	14%

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio do *framework* proposto e do método AHP, tornou-se possível identificar quais os critérios e subcritérios que mais influenciam na tomada de decisões para a seleção de fornecedores de sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica.

A Tabela 22 apresenta as prioridades globais dos fornecedores, obtidas por meio da ponderação das prioridades locais pelas prioridades globais dos subcritérios, e adicionando-as.

Tabela 22 - Prioridades globais dos fornecedores

Fornecedor	Prioridade	Posição
A	45%	1
B	22%	2
C	12%	4
D	22%	2

Fonte: Elaborado pelo autor

O Fornecedor A possui a maior prioridade, e o Fornecedor C tem a menor prioridade. Os fornecedores B e D se encontram empatados em segundo lugar. Este empate promove incerteza se ocorrer algum problema com o Fornecedor A. A seleção do Fornecedor A está de acordo com o gestor de engenharia da empresa, incluindo o empate entre os Fornecedores B e D.

O material suplementar para o cálculo se encontra disponibilizado numa planilha em Excel - [Link](#).

4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA AVALIAÇÃO DE CRITICIDADE DE PEÇAS SOBRESSALENTES PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS

Entrevistaram-se três especialistas que proporcionaram pesos para cada variável de acordo com a aplicação do método AHP. As comparações agregadas são

apresentadas na Tabela 23, onde os resultados se dão entre os critérios e a sua importância com o objetivo. Posteriormente, os especialistas compararam os subcritérios de acordo com a importância dos critérios, onde as comparações agregadas se apresentam na Tabela 23.

Tabela 23 - Prioridade agregada de critérios e subcritérios

Y1	Y11	Y12	Y13
50%	27,46%	61,89%	10,64%
Y2	Y21	Y22	Y23
14%	14,88%	17,36%	67,77%
Y3	Y31	Y32	Y33
36%	63,05%	16,83%	20,12%

Fonte: Elaborado pelo autor

O critério Criticidade do equipamento demonstrou a maior prioridade. O critério Logística demonstrou o índice de prioridade mais baixo. Os subcritérios - Falha de Previsibilidade, Fornecedores, e Política de Manutenção apresentam prioridade mais alta.

A comparação obteve um índice de julgamento consistente, uma vez que RC se encontra dentro do valor aceitável ($\leq 0,1$), validando assim o julgamento dos especialistas.

Estes fatores indicam as características mais influentes para a avaliação da criticidade das peças sobressalentes dos sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica.

Posteriormente, os especialistas atribuíram valores à criticidade das peças sobressalentes de acordo com as classificações propostas nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 - Prioridade *Rating's* (ABC)

Sobressalente	Y11	Y12	Y13	Y21	Y22	Y32	Y33
A	1	2	3	3	3	2	2
B	3	3	2	2	2	3	1
C	2	1	1	1	1	3	1
D	1	1	3	3	3	1	3

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 - Prioridade *Rating's* (VED)]

Sobressalente	Y23	Y31
A	2	1
B	1	2
C	2	2
D	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor

Calcularam-se os valores para cada subcritério de acordo com a criticidade das peças sobressalentes (A, B, C e D), utilizando os pesos dos *rating's*. Finalmente, somaram-se os resultados.

Os valores prioritários alcançados foram calculados utilizando a técnica peso de equilíbrio de acordo com a Equação (4). A Tabela 26 mostra as pontuações alcançadas dos subcritérios, a prioridade, e a classificação final de acordo com cada peça sobressalente.

Tabela 26 - Prioridade das peças sobressalentes

Peça Sobressalente	Y11	Y12	Y13	Y21	Y22	Y23	Y31	Y32	Y33	Σ
A	0,04	0,18	0,06	0,08	0,09	0,20	0,34	0,05	0,06	1,11
B	0,15	0,33	0,03	0,04	0,05	0,37	0,19	0,09	0,03	1,29
C	0,08	0,10	0,02	0,02	0,03	0,20	0,19	0,09	0,03	0,76
D	0,04	0,10	0,06	0,08	0,09	0,11	0,10	0,03	0,11	0,73

Peça Sobressalente	Prioridade	Posição
A	28,57%	2
B	33,07%	1
C	19,67%	3
D	18,70%	4

Fonte: Elaborado pelo autor

A peça sobressalente B possui a maior criticidade, onde a ordem final de prioridade global é apresentada conforme: B > A > C > D. As peças sobressalentes C e D estão praticamente empatadas, apenas apresentando uma diferença de 0,97%, o que pode criar uma incerteza na prioridade entre elas.

O material suplementar para o cálculo se encontra disponibilizado numa planilha em Excel - [Link](#).

4.5 PONDERAÇÕES DA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Diversas publicações, como Shahin *et al.* (2018); Dai *et al.* (2019); Bona *et al.* (2021) e Mattioli *et al.* (2020), destacam a importância de uma gestão eficaz da manutenção. O método AHP, desenvolvido por Saaty (1980), é um dos principais métodos de MCDM, que tem sido aplicado para resolver vários problemas de decisão que envolvem múltiplos atributos.

Nos últimos anos, houve várias publicações de alguns pesquisadores como Pereira *et al.* (2023), que utilizam o método AHP-Gaussiano para selecionar um sensor inteligente para um motor elétrico. Outros como Gündoğdu e Kahraman (2020), aplicam o método Fuzzy-AHP Esférico num problema de seleção de robôs industriais.

Outro ponto é que autores como Ilgin (2019); Durán (2015); Gong *et al.* (2022), e Asmara e Kusumah (2021), tendem a hibridizar o AHP com Fuzzy, TOPSIS e outros métodos de classificação bem conhecidos, o que promove uma solução complexa e desnecessária.

Esta Tese, em contraste com estudos anteriores, apresenta uma fundamentação teórica com inovação sobre novas perspectivas gerenciais da gestão da manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas. A aplicação do método AHP por meio de inovadores *frameworks* aplicados na gestão deste tipo de ativos, demonstrou consistência e eficácia na aplicação do método, centrando-se na obtenção de uma solução robusta e adequada na utilização de todos os especialistas envolvidos, que por sua vez não possuem competências específicas na aplicação de MCDM.

5 CONCLUSÃO

Por meio da pesquisa bibliográfica identificaram-se os principais métodos de decisão multicritérios para resolver problemas com incerteza, onde se escolheu o método AHP devido a ser o método mais amplamente utilizado a nível mundial. Também se identificou os critérios e subcritérios pertinentes para cada *framework* desenvolvido, visando atender às premissas para cada problema proposto. A limitação relativamente à área de atuação, se compreende em uma indústria siderúrgica, com opiniões de diferentes especialistas de manutenção, abrangendo a utilização do método AHP.

Quanto ao objeto de estudo, a delimitação da Tese será a análise multicritério aplicada à gestão da manutenção de sistemas hidráulicos.

Pela análise dos métodos aplicados na área de gestão de manutenção, observa-se que o método adequado para se responder às questões de pesquisa e atingir os objetivos propostos nesta Tese, é o DSR. Isto se deve ao fato de que existe uma abordagem teórica com características específicas para um determinado contexto (Auxiliar os gestores nas tomadas de decisões de acordo com o nível de serviço desejado, com o menor risco possível).

Este capítulo é composto pela verificação do objetivo geral, objetivos específicos e pela resposta à questão de pesquisa. Também contempla as considerações visando o meio acadêmico e organizacional, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 VERIFICAÇÃO DO OBJETIVO GERAL E DOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por meio deste documento, diagnosticou-se que se atingiu o objetivo geral uma vez que foram propostos modelos para suporte à tomada de decisão, visando melhorar a gestão da manutenção dos sistemas hidráulicos, em usinas siderúrgicas.

Pela aplicação do método DSR, foram propostos *frameworks* para a seleção de estratégia de manutenção, priorização na seleção de projetos hidráulicos, seleção de fornecedores para sistemas hidráulicos e avaliação de criticidade de peças sobressalentes para sistemas hidráulicos.

Relativamente aos objetivos específicos, consideraram-se as seguintes conclusões:

a) Propor testar e validar modelos, para a gestão de manutenção dos sistemas hidráulicos abordando os seguintes pontos:

➤ Seleção de estratégia de manutenção;

A seleção de uma estratégia de manutenção adequada, aumenta a disponibilidade dos equipamentos e reduz os custos de manutenção de uma organização. A aplicação do método AHP ajudou a identificar a priorização das estratégias de manutenção abordadas, onde por meio dos resultados obtidos verificaram-se que os critérios segurança e confiabilidade, correspondem à maior prioridade. A ordem de classificação das estratégias de manutenção se deu conforme: Manutenção Preditiva, Manutenção Preventiva, Manutenção Autônoma e Manutenção Corretiva. Essa última apresentou um valor agregado muito baixo, indicando que este tipo de manutenção deve ser evitado para sistemas hidráulicos aplicados na indústria siderúrgica.

Neste contexto, priorizou-se a manutenção preditiva para este tipo de ativos, o que promoveu uma monitorização dos sistemas hidráulicos em tempo real por meio de sensores, aumentando a interação homem-máquina e a confiabilidade operacional. Esta ação também permitiu uma visualização das anomalias *in loco*, diminuindo assim o tempo de resposta na resolução de avarias, o que contribuiu para uma redução das paragens dos equipamentos, aumentando o valor acrescentado para o cliente final.

➤ Priorização de seleção de projetos – *Framework*;

Desenvolveu-se um *framework* de avaliação para a priorização na seleção de projetos hidráulicos na indústria do aço, utilizando o modelo AHP-BOCR com pesos. Relativamente ao MCDM para a resolução de problemas com incerteza, utilizou-se o modelo AHP-BOCR devido à sua aplicabilidade consolidada. A hierarquia de decisão elaborada permitiu a segmentação de prioridades onde os subcritérios que demonstraram a maior relevância foram: B1 - satisfação dos funcionários, O1 - cumprimento das normas, C1 - operação e manutenção, e R2 - supervisão e gestão inadequadas. A ordem de prioridade de projetos foi a seguinte - 1, 3, e 2. A metodologia do modelo AHP-BOCR facilitou a

identificação dos subcritérios mais relevantes, o que se revela ser uma ferramenta útil para ajudar os gestores com problemas de tomada de decisão.

A clareza demonstrada pelos critérios e subcritérios associados às alternativas pertinentes à priorização na seleção de projetos por meio deste *framework*, proporcionou uma nova visão com clareza e robustez para os tomadores de decisão, contribuindo grandemente para uma tomada de decisão assertiva.

O meio empresarial objetiva cada vez mais uma padronização para a priorização na seleção de projetos, de modo a se tornar mais competitivo e depender "menos do homem e mais da máquina" – redução de custo, com menor margem de erro.

➤ Seleção de fornecedores – *Framework*;

Aplicou-se a metodologia AHP para este problema de tomada de decisão, que neste caso apresenta quatro fornecedores associados a vários critérios e subcritérios dispostos numa árvore hierárquica. O *framework* proposto para a seleção de fornecedores, possibilitou identificar quais os critérios ou subcritérios que têm mais influência na tomada de decisões assertivas para os sistemas hidráulicos para indústria siderúrgica. Os critérios com maior prioridade foram Qualidade (C1), e Capacidade & Tecnologia (C5). Além disso, o Preço (C4) foi o critério com a prioridade mais baixa. Os subcritérios Inspeção de Processos (C1), Planeamento, Proatividade, Custo, e Profissionais Qualificados apresentaram uma prioridade mais elevada. Assim, estes fatores tornaram-se relevantes para os fornecedores de sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica. A ordem de classificação dos fornecedores foi a seguinte: Fornecedor A no primeiro lugar, Fornecedor B e D no segundo lugar com valores semelhantes, e Fornecedor C no último lugar. Se o fornecedor A não estiver disponível, os gestores devem escolher entre fornecedor B ou D, que mostraram resultados empatados. Contudo, em alguns casos, o método AHP necessitou de uma revisão dos juízos uma vez que o valor CR atingiu valores superiores a 0,1, onde se fez necessário efetuar uma revisão dos julgamentos.

Na indústria do aço, é necessário manter uma relação comercial com um conjunto de fornecedores qualificados para sistemas hidráulicos, uma vez que pode existir a possibilidade de insolvência de um deles, ou a prática de preços abusivos. Além disso, a concorrência entre fornecedores favorece a rivalidade entre eles, beneficiando o cliente final em múltiplos fatores, dentre os quais se destaca a qualidade, agilidade de entrega e o custo.

O desenvolvimento deste *framework* demonstrou ser uma ferramenta adequada e útil para a organização, dada a existência de uma vasta gama de possíveis cenários de fornecimento pela parte dos fornecedores, que por vezes geram incerteza na tomada de decisão por parte dos gestores.

➤ Avaliação de criticidade de peças sobressalentes - *Framework*.

O estudo apresentou uma abordagem de avaliação de peças sobressalentes de criticidade hidráulica utilizando o método AHP com *ranking's*, objetivando maximizar a disponibilidade de peças sobressalentes para manutenção, minimizando assim os custos de gestão de sobressalentes. A incerteza na gestão de peças sobressalentes para sistemas hidráulicos na indústria do aço é um problema de tomada de decisão. Na análise da criticidade, foram selecionadas quatro peças sobressalentes de baixa rotação. Relativamente aos métodos de decisão multicritérios MCDM para resolver problemas com incerteza, o método AHP foi preferido devido à sua aplicação consolidada. O *framework* elaborado permitiu a segmentação de prioridades onde os critérios que demonstraram a maior relevância foram: Criticidade do Equipamento, por outro lado, os subcritérios mais relevantes são: Falha de Previsibilidade, Fornecedores, e Polícia de Manutenção. Estes resultados correspondem ao funcionamento dos sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica, o que requer elevada fiabilidade e segurança operacional. A ordem de classificação das peças sobressalentes críticas foi a seguinte B, A, C, e D. O método *Fuzzy AHP* pode ser utilizado para melhorar uma melhor correspondência entre as alternativas C e D, ou outras técnicas de decisão MCDM, tais como MAUT ou MAVT.

O *framework* elaborado contribuiu para a superação das principais dificuldades da gestão de sobressalentes para este tipo de ativos, como por exemplo, os elevados custos de aquisição, longos períodos de fornecimento e avaliação do risco de uma eventual ruptura de estoque. Ao se adotar políticas de gestão apropriadas para os sobressalentes, tona-se possível priorizar recursos, maximizar a disponibilidade de equipamentos para a manutenção, e minimizar de custos de estoque.

- c) Aplicar o método AHP por meio da identificação dos objetivos, dos critérios e subcritérios pertinentes ao problema, que atendam às necessidades da gestão da manutenção de sistemas hidráulicos:
- A aplicação do método AHP abrangeu os *frameworks* propostos, onde permitiu a segmentação de prioridades de critérios, subcritérios e alternativas por meio de determinadas discussões com alguns gestores e especialistas da indústria siderúrgica. Inicialmente a seleção de critérios surgiu com alguma incerteza e discussão, quais seriam os mais apropriados, ou aqueles que deveriam ser excluídos. Ao ilustrar evidências de aplicações em artigos de alto impacto, os especialistas passaram a ter uma visão mais holística sobre cada tema apresentado, o que edificou muito a elaboração e compreensão de cada *framework*. Outra dificuldade se deu na associação de subcritérios a cada critério, o que gerou muitas dúvidas. Algo por vezes que parecia ser evidente, diagnosticou-se que não corroborava com a literatura existente, tornando-se esta fundamental para providenciar uma resposta concisa e prática aos especialistas. Por exemplo, na elaboração do *framework* para a seleção de fornecedores não estava claro se o subcritério do planejamento se encontrava associado ao critério da entrega ou da qualidade. Já na elaboração do *framework* para a avaliação de peças sobressalentes, alguns especialistas desconheciam a aplicação de *rating's*, o que gerou uma satisfação pela sua aplicabilidade e diagnóstico. Finalmente, o critério ou subcritério que por vezes parecia que iria ter um maior impacto, diagnosticou-se por meio da prioridade agregada que apresentava resultados divergentes, como no caso da

verificação dos subcritérios tendência de mercado e modernização de equipamentos, aplicados ao critério da viabilidade associados ao *framework* da seleção da estratégia de manutenção.

- d) Validar as opiniões de diferentes especialistas de manutenção, abrangendo a utilização do método AHP.
- Essa descoberta disponibilizou uma nova direção para fins de planejamento de algumas esferas de manutenção de sistemas hidráulicos. Muitos critérios e subcritérios identificados e suportados na literatura vigente proporcionaram uma visão holística para este tipo de ativos, contribuindo assim para uma manutenção com maior assertividade e disponibilidade.
 - O método AHP é um método de grande valia pela sua aplicação e consolidada utilização, proporcionando um auxílio eficaz para os gestores na tomada de decisão. Muitos especialistas nunca tinham realizado uma aplicação real do método, o que foi um fator que gerou curiosidade e aprendizado para o departamento de manutenção. Embora todos os especialistas fizessem parte da mesma organização, a cultura da empresa não influenciou nos resultados, uma vez que se formou um comitê com uma visão clara para a mudança organizacional, almejando promover a gestão da manutenção de sistemas hidráulicos.

5.2 RESPOSTA À QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa proposta para esta Tese se expressa:

- De que forma se pode melhorar a gestão de manutenção dos sistemas hidráulicos em usinas siderúrgicas?

Algumas lições aprendidas se proporcionaram por meio de discussões com alguns gestores de manutenção da indústria siderúrgica. Estas lições se encontram associadas aos principais problemas enfrentados na gestão da manutenção de sistemas hidráulicos.

A aplicação do método DSR possibilitou desenvolver modelos inovadores que integram a literatura vigente com a opinião de especialistas, promovendo novas perspectivas para o gerenciamento de manutenção de sistemas hidráulicos em indústrias siderúrgicas. Além disso, a metodologia consolidada do método de decisão multicritério aplicado AHP, facilitou a identificação dos critérios e subcritérios mais relevantes, o que se demonstrou ser uma ferramenta útil para ajudar os gestores de manutenção com problemas de tomada de decisão.

Neste contexto, gerou-se um protocolo a partir de parâmetros pré-estabelecidos para cada modelo proposto, almejando o orientar os usuários relativamente à seleção de estratégias de manutenção, priorização da seleção de projetos, seleção de fornecedores e avaliação de criticidade de peças sobressalentes.

Este documento terá uma importância significativa para profissionais e pesquisadores envolvidos em tomadas de decisão e gerenciamento de manutenção.

5.3 CONSIDERAÇÕES

Verifica-se que a relevância dos temas apresentados nesta Tese, contribuem significativamente para o meio acadêmico e científico. Destacam-se os conceitos abordados na análise bibliométrica, uma vez que podem auxiliar a estabelecer análises comparativas e identificar seguimentos que se encontra em franca expansão, proporcionando assim vastos campos de estudo. Outro ponto se remete aos *frameworks* propostos, onde pesquisadores e organizações podem vir a aplicar os mesmos conceitos apresentados de modo a poderem aperfeiçoar e otimizar os seus programas de manutenção. Finalmente, por meio das planilhas de cálculo disponibilizadas no software Microsoft Excel, pesquisadores podem ter acesso a ferramentas que podem contribuir para o desenvolvimento de suas pesquisas.

Além das contribuições acadêmicas, esta Tese também apresenta contribuições organizacionais, nomeadamente para o gerenciamento de manutenção de sistemas hidráulicos. Observou-se que a manutenção preditiva é a mais indicada para este tipo de ativos, onde também referenciou que a manutenção corretiva deverá ser evitada uma vez que apresentou um valor agregado muito baixo. Abordou-se a relevância da priorização na seleção de projetos hidráulicos, levando a um direcionamento correto para a alocação de recursos de modo a poder maximizar o valor entregue para a organização. A seleção de fornecedores contribuiu para

evidenciar qual seria o fornecedor mais adequado para uma determinada aplicação, colaborando para a um aumento da confiabilidade operacional dos ativos com diminuição de risco associado a quebras e falhas de equipamentos. A avaliação da criticidade das peças de reposição demonstrou uma oportunidade de minimizar os custos de estoque, gerando valor para a organização.

De uma maneira geral, demonstrou-se que os modelos propostos geraram impacto na tomada de decisão para a gestão de manutenção deste tipo de ativos, promovendo aprendizado e crescimento profissional por parte dos usuários de manutenção. Neste contexto, implementou-se indicadores de desempenho como: gestão de giro de estoque, tempo de estoque mínimo e máximo, taxa de devolução de sobressalentes, tempo de entrega, pesquisa de satisfação por parte do usuário relativo à performance de equipamento e retorno sobre investimento de projetos, se encontrando estes em avaliação.

Faz-se necessário ressaltar que estes indicadores podem variar, uma vez que sempre será necessário fazer adequações específicas às características de cada aplicação, como por exemplo: meio empresarial, área de produção, tipo de ativos, dentre outros.

A promoção de interações entre uma organização e a academia, otimiza o engajamento, a cooperação e o compartilhamento de conhecimento, promovendo assim o desenvolvimento tecnológico e ecossistemas de inovação.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora a aplicação do método AHP para a tomada de decisão tenha proporcionado resultados muito satisfatórios como se demonstrou nesta Tese, não se verificou a consistência dos resultados por meio da análise de sensibilidade dos pesos dos critérios, ou de uma escolha mais criteriosa dos especialistas. Também não se pretende afirmar que o método utilizado é o único, ou mesmo o melhor, uma vez que podem existir outros métodos que proporcionem resultados similares. Porém, não era objetivo desta Tese escolher qual seria o método de MCDM mais apropriado para a tomada de decisão. Assim, para estudos futuros propõem-se aplicar outras técnicas de decisão MCDM, como os da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* ou a Teoria da Utilidade Multi-Atributo, ou método *Fuzzy* AHP para discriminar os resultados entre algumas alternativas que necessitem de uma maior apuração.

Outra opção seria a ampliação deste estudo para o desenvolvimento de um estudo de caso longitudinal, almejando efetuar o acompanhamento dos indicadores ao longo do tempo, de modo a poder verificar se os resultados se mantêm ao longo do tempo.

A ampliação deste estudo com integrantes de outros setores da empresa como a produção, parte comercial ou logística, de modo a poder promover um alinhamento entre o julgamento do comitê selecionado e as preferências organizacionais, fazendo com que a modelagem de decisão fosse mais próxima das necessidades da organização, também poderá servir como uma opção para estudos futuros.

A metodologia proposta, também poderia ser aplicada para outros segmentos empresariais, por meio do desenvolvimento de novos *frameworks* abrangendo o sector de produção, área financeira, recursos humanos, ou mesmo para manutenção e gestão de ativos à luz das normas existentes.

Finalmente, poder-se-ia levar em consideração promover a aplicação dos métodos MCDM aos principais conceitos da filosofia *Lean 4.0* (Indústria 4.0, associado à filosofia *Lean System*), de modo a satisfazer as futuras exigências do mercado da manutenção de sistemas hidráulicos.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, M.; SHAFIEE, M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. **Marine Structures**, Barking, v. 71, p. 102718, 2020.
- ABDULGADER, F. S.; EID, R.; ROUYENDEGH, B. D. Development of decision support model for selecting a maintenance plan using a Fuzzy MCDM approach: A theoretical framework. **Applied Computational Intelligence and Soft Computing**, London, v. 2018, p. 1–14, 2018.
- AGOSTINO, I. R. S.; SILVA, W. V.; VEIGA, C. P.; SOUZA, A. M. Forecasting models in the manufacturing processes and operations management: Systematic literature review. **Journal of Forecasting**, Chichester, v. 39, n. 7, p. 1043–1056, 2020.
- AHN, J.; YI, E.; KIM, M. Blockchain consensus mechanisms: A bibliometric analysis (2014–2024) Using VOSviewer and R Bibliometrix. **Information**, Basel, v. 15, n. 10, p. 644, 2024.
- ALENANY, A.; HELMI, A. M.; NASEF, B. M. Comprehensive analysis for sensor-based hydraulic system condition monitoring. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Cleckheaton, v. 12, n. 6, p. 133–140, 2021.
- ALIZADEH, R.; SOLTANISEHAT, L.; LUND, P. D.; ZAMANISABZI, H. Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. **Energy Policy**, Guildford, v. 137, p. 111174, 2020.
- ALYAMANI, R.; LONG, S. The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process in sustainable project selection. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 20, p. 8314, 2020.
- ANTOSZ, K.; RATNAYAKE, R. M. C. Spare parts' criticality assessment and prioritization for enhancing manufacturing systems' availability and reliability. **Journal of Manufacturing Systems**, Enschede, v. 50, p. 212–225, 2019.
- ARENA, M.; AZZONE, G.; PIANTONI, G. Shared value creation during site decommissioning: A case study from the energy sector. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 251, p. 119587, 2020.
- ASMARA, R. A.; KUSUMAH, L. H. Spare parts supplier selection design: A case study of a railway company. **Jurnal Optimasi Sistem Industri**, Jakarta, v. 20, n. 2, p. 125–135, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4413**: Sistemas de fluidos hidráulicos: Regras gerais e requisitos de segurança para sistemas e seus componentes. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9000:** Sistema de gestão da qualidade: Fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 12100:** Segurança de máquinas: Princípios gerais de projeto: Apreciação e redução de riscos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASUQUO, M. P.; WANG, J.; ZHANG, L.; PHYLIP-JONES, G. Application of a multiple attribute group decision making (MAGDM) model for selecting appropriate maintenance strategy for marine and offshore machinery operations. **Ocean Engineering**, Elmsford, v. 179, p. 246–260, 2019.

BAHUGUNA, P. C.; SRIVASTAVA, R.; TIWARI, S. Two-decade journey of green human resource management research: a bibliometric analysis. **Benchmarking: An International Journal**, Leeds, v. 30, n. 2, p. 585–602, 2023.

BAIDYA, R.; DEY, P. K.; GHOSH, S. K.; PETRIDIS, K. Strategic maintenance technique selection using combined quality function deployment, the analytic hierarchy process and the benefit of doubt approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 94, n. 1–4, p. 31–44, 2018.

BAJIC, B.; SUZIC, N.; SIMEUNOVIC, N.; MORACA, S.; RIKALOVIC, A. Real-time data analytics edge computing application for industry 4.0: The Mahalanobis-Taguchi approach. **International Journal of Industrial Engineering and Management**, Novi Sad, v. 11, n. 3, p. 146–156, 2020.

BAUER, M. W.; GASKELL, G. **Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som:** Um manual prático. 7. ed. Petrópolis: Vozes, 2002.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, Bradford, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

BONA, G. Di; CESAROTTI, V.; ARCESE, G.; GALLO, T. Implementation of industry 4.0 technology: New opportunities and challenges for maintenance strategy. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 180, p. 424–429, 2021.

BORJALILU, N.; GHAMBARI, M. Optimal maintenance strategy selection based on a Fuzzy analytical network process. A case study on a 5-MW powerhouse. **International Journal of Engineering Business Management**, London, v. 10, p. 184797901877617, 2018.

BOUZAROUR-AMOKRANE, Y.; TCHANGANI, A.; PERES, F. Decision evaluation process in end-of-life systems management. **Journal of Manufacturing Systems**, London, v. 37, p. 715–728, 2015.

BRICEÑO-LEÓN, C. X.; IGLESIAS-REY, P. L.; MARTINEZ-SOLANO, F. J.; CREACO, E. Impact of hydraulic variable conditions in the solution of pumping station design through sensitivity analysis. **Water**, Basel, v. 15, n. 17, p. 3067, 2023.

BROADUS, R. N. Toward a definition of “bibliometrics”. **Scientometrics**, Budapest, v. 12, n. 5–6, p. 373–379, 1987.

BROOKES, B. C. Bradford’s law and the bibliography of science. **Nature**, London, v. 224, n. 5223, p. 953–956, 1969.

CANCO, I.; KRUIJA, D.; IANCU, T. AHP, a reliable method for quality decision making: A case study in business. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 24, p. 13932, 2021.

CARBONERAS, M. C.; ARAGÓN, M. V. D. LA F.; MCDONELL, L. R. Multi-item inventory problem: Literature review and a proposal for practitioners. **Dirección y Organización**, Valencia, n. 74, p. 67–80, 2021.

CARPITELLA, S.; CERTA, A.; IZQUIERDO, J.; LA FATA, C. M. A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. **Reliability Engineering and System Safety**, London, v. 169, p. 394–402, 2018.

CARPITELLA, S.; MZOUGUI, I.; BENÍTEZ, J.; CARPITELLA, F.; CERTA, A.; IZQUIERDO, J.; LA CASCIA, M. A risk evaluation framework for the best maintenance strategy: The case of a marine salt manufacture firm. **Reliability Engineering and System Safety**, London, v. 205, p. 107265, 2021.

CARSTENSEN, A.-K.; BERNHARD, J. Design science research – a powerful tool for improving methods in engineering education research. **European Journal of Engineering Education**, Abingdon, v. 44, n. 1–2, p. 85–102, 2019.

CAUCHICK, P. A. M.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A.; PUREZA, V. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro, p. 226, 2010.

CHAUDHURI, A.; GERLICH, H. A.; JAYARAM, J.; GHADGE, A.; SHACK, J.; BRIX, B. H.; HOFFBECK, L. H.; ULRIKSEN, N. Selecting spare parts suitable for additive manufacturing: a design science approach. **Production Planning and Control**, London, v. 32, n. 8, p. 670–687, 2021.

CHEN, L.; FENG, H.; XIE, Z. Generalized thermodynamic optimization for iron and steel production processes: Theoretical exploration and application cases. **Entropy**, Basel, v. 18, n. 10, p. 353, 2016.

CRISAN, L. M.; CRISAN, A. E.; BREBENARIU, D.; BORZA, I. Optimize the maintenance activity with computer application. **Journal of Physics: Conference series**, Bristol, v. 1781, n. 1, p. 012068, 2021.

DAI, J.; TANG, J.; HUANG, S.; WANG, Y. Signal-based intelligent hydraulic fault diagnosis methods: Review and prospects. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, Heidelberg, v. 32, n. 1, p. 75, 2019.

DARESTANI, S. A.; PALIZBAN, T.; IMANNEZHAD, R. Maintenance strategy selection: a combined goal programming approach and BWM-TOPSIS for paper production industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Bradford, v. 28, n. 1, p. 14–36, 2022.

DEPCZYŃSKI, R. MCDA based approach to supplier evaluation – steel industry enterprise case study. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 192, p. 5081–5092, 2021.

DEPCZYŃSKI, R.; SECKA, J.; CHEBA, K.; D’ALESSANDRO, C.; SZOPIK-DEPCZYŃSKA, K. Decision-making approach in sustainability assessment in steel manufacturing companies - systematic literature review. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 15, p. 11614, 2023.

DESHMUKH, A. J.; VASUDEVAN, H. A Combined approach for supplier selection using AHP and Fuzzy AHP in Indian Gear Manufacturing MSMEs. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 376, p. 012122, 2018.

DINDORF, R.; WOS, P. A case study of a hydraulic servo drive flexibly connected to a boom manipulator excited by the cyclic impact force generated by a hydraulic rock breaker. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 7734–7752, 2022.

DINIZ, R. S.; TORRE, N. M. D. M.; BONAMIGO, A. Lean Six Sigma 4.0 in an empirical application: a case of digital measurement for thickness deviation on a galvanizing line in a steel industry. **International Journal of Lean Six Sigma**, Bingley, 2025. [Preprint]

DONG, M.; ZHENG, H.; ZHANG, Y.; SHI, K.; YAO, S.; KOU, X.; DING, G.; GUO, L. A Novel maintenance decision making model of power transformers based on reliability and economy assessment. **IEEE Access**, Piscataway, v. 7, p. 28778–28790, 2019.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A. V. Design science research. *In: DESIGN SCIENCE RESEARCH*, 2015, Cham. **Proceedings** [...] Cham, Germany: Springer International Publishing, 2015, p. 67–102.

DURÁN, O. Spare parts criticality analysis using a Fuzzy AHP approach. **Tehnicki vjesnik-Technical Gazette**, Slavonski Brod, v. 22, n. 4, p. 899–905, 2015.

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

FERREIRA, L. M. D. F.; MAGANHA, I.; MAGALHÃES, V. S. M.; ALMEIDA, M. A. Multicriteria decision framework for the management of maintenance spares: A case study. **IFAC-PapersOnLine**, Coimbra, v. 51, n. 11, p. 531–537, 2018.

GAVIRIA-MARIN, M.; MERIGO, J. M.; POPA, S. Twenty years of the *Journal of Knowledge Management*: a bibliometric analysis. **Journal of Knowledge Management**, Bingley, v. 22, n. 8, p. 1655–1687, 2018.

GE, Y.; XIAO, M.; YANG, Z.; ZHANG, L.; HU, Z.; FENG, D. An integrated logarithmic Fuzzy preference programming based methodology for optimum maintenance strategies selection. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 60, p. 591–601, 2017.

GHAMARI, R.; MAHDAVI-MAZDEH, M.; GHANNADPOUR, S. F. Resilient and sustainable supplier selection via a new framework: a case study from the steel industry. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 24, n. 8, p. 10403–10441, 2022.

GHUGE, S.; DOHALE, V.; AKARTE, M. Spare part segmentation for additive manufacturing – A framework. **Computers and Industrial Engineering**, Oxford, v. 169, p. 108277, 2022.

GOECKS, L. S.; SOUZA, M.; LIBRELATO, T. P.; TRENTO, L. R. Design science research in practice: review of applications in industrial engineering. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 28, n. 4, p. e5811, 2021.

GONG, J.; LUO, Y.; QIU, Z.; WANG, X. Determination of key components in automobile braking systems based on ABC classification and FMECA. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Beijing, v. 9, n. 1, p. 69–77, 2022.

GONTIJO, T. S.; GROPPPO, G. S.; KAYRAL, İ. E.; CÁSSIO RODRIGUES, A. Unlocking water management optimization: A data-driven exploration through bibliometric analysis. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, Oxford, v. 138, p. 103862, 2025.

GUEDES, V. L. S.; BORSCHIVER, S. Bibliometria: Uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação, de comunicação e de avaliação científica e tecnológica. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 6., p. 1–18, 2005, Salvador. **Anais [...]** Salvador, Brasil: 2005.

GÜNDOĞDU, F. K.; KAHRAMAN, C. Spherical Fuzzy analytic hierarchy process (AHP) and Its application to industrial robot selection. *In*: INTELLIGENT AND FUZZY TECHNIQUES IN BIG DATA ANALYTICS AND DECISION MAKING: PROCEEDINGS OF THE INFUS, 2020, Istanbul. **Proceedings [...]** Istanbul, Turkey: Springer International Publishing, 2020. p. 988–996.

HE, Y.; HAN, X.; GU, C.; CHEN, Z. Cost-oriented predictive maintenance based on mission reliability state for cyber manufacturing systems. **Advances in Mechanical Engineering**, London, v. 10, n. 1, 2018.

HOU, J.; ZHANG, Z.; ZHOU, H.; NING, D.; GONG, Y. Hydraulic systems control based on the characteristics of major-motion mechanism for an open-die forging manipulator. **Advances in Mechanical Engineering**, London, v. 9, n. 2, 2017.

HU, Q.; BOYLAN, J. E.; CHEN, H.; LABIB, A. OR in spare parts management: A review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 266, n. 2, p. 395–414, 2018.

ILGIN, M. A spare parts criticality evaluation method based on Fuzzy AHP and Taguchi loss functions. **Eksploracja i Niezawodność: Maintenance and Reliability**, Lublin, v. 21, n. 1, p. 145–152, 2019.

JOCELYN, S.; CHINNIAH, Y.; OUALI, M.-S. Contribution of dynamic experience feedback to the quantitative estimation of risks for preventing accidents: A proposed methodology for machinery safety. **Safety Science**, Amsterdam, v. 88, p. 64–75, 2016.

KANNAN, A. S. K.; BALAMURUGAN, S. A. A.; SASIKALA, S. A customized metaheuristic approaches for improving supplier selection in intelligent decision making. **IEEE Access**, Piscataway, v. 9, p. 56228–56239, 2021.

KHAN, S.; FARNSWORTH, M.; MCWILLIAM, R.; ERKOYUNCU, J. On the requirements of digital twin-driven autonomous maintenance. **Annual Reviews in Control**, Oxford, v. 50, p. 13–28, 2020.

KOTHARI, C. R.; GARG, Gaurav. **Research methodology: methods and techniques**. Jaipur: New Age International (P) Limited, 2004.

KOTTNER, J.; EL GENEDY-KALYONCU, M. The uptake of the international pressure ulcer/injury prevention and treatment guidelines in the scientific literature: A systematic analysis of two major citation databases. **Journal of Tissue Viability**, London, v. 31, n. 4, p. 763–767, 2022.

KUECHLER, W.; VAISHNAVI, V. A framework for theory development in design science research: Multiple perspectives. **Journal of the Association for Information Systems**, Atlanta, v. 13, n. 6, p. 395–423, 2012.

KUECHLER, B.; VAISHNAVI, V. On theory development in design science research: anatomy of a research project. **European Journal of Information Systems**, Abingdon, v. 17, n. 5, p. 489–504, 2008.

KUMAR, D. Buyer-supplier relationship selection for a sustainable supply chain: a case of the Indian automobile industry. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 11, n. 2, p. 215–227, 2019.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LEE, J.; NI, J.; SINGH, J.; JIANG, B.; AZAMFAR, M.; FENG, J. Intelligent maintenance systems and predictive manufacturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, New York, v. 142, n. 11, 2020.

LESTARI, F.; ULFAH, -; SUHERMAN, -; AZWAR, B.; FITHRI, P. Combining ABC and VED analysis for managing medicine inventory (case study at community development elderly in Indonesia). **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, Jakarta, v. 9, n. 3, p. 952–959, 2019.

LIN, C.-T.; CHIANG, C.-T.; WANG, S.-M. Comparing the aggregation methods in the Analytic Hierarchy Process under normal and uniform distribution. *In*: INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE ON SOCIETY, CYBERNETICS AND INFORMATICS, 2., p. 180–185, 2008, Orlando. **Proceedings** [...] Brussels: Union of International Associations, 2008.

LOPES, I.; FIGUEIREDO, M.; SÁ, V. Criticality evaluation to support maintenance management of manufacturing systems. **International Journal of Industrial Engineering and Management**, Novi Sad, v. 11, n. 1, p. 3–18, 2020.

MACEIKA, A.; BUGAJEV, A.; ŠOSTAK, O. R.; VILUTIENĖ, T. Decision tree and AHP methods application for projects assessment: A case study. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 10, p. 5502, 2021.

MALLICK, B.; SOURAV D.; SARKAR, B.; SANTANU D. Application of the modified similarity-based method for multi-criteria inventory classification. **Decision Science Letters**, Vancouver, v. 8, n. 4, p. 455–470, 2019.

MANSON, N. Is operations research really research?. **ORION**, Franeker, v. 22, n. 2, p. 155–180, 2006.

MARTINS, J.; GONÇALVES, R.; BRANCO, F. A bibliometric analysis and visualization of e-learning adoption using VOSviewer. **Universal Access in the Information Society**, Heidelberg, v. 23, n. 3, p. 1177–1191, 2024.

MAS-TUR, A.; KRAUS, S.; BRANDTNER, M.; EWERT, R.; KÜRSTEN, W. Advances in management research: a bibliometric overview of the review of managerial science. **Review of Managerial Science**, Heidelberg, v. 14, n. 5, p. 933–958, 2020.

MATTIOLI, J.; PERICO, P.; ROBIC, P.O. Improve total production maintenance with artificial intelligence. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR INDUSTRIES (AI4I), 3., p. 56–59, 2020. **Proceedings** [...] Irvine, USA: IEEE, 2020.

MEHDIZADEH, M. Integrating ABC analysis and rough set theory to control the inventories of distributor in the supply chain of auto spare parts. **Computers and Industrial Engineering**, Oxford, v. 139, p. 105673, 2020.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel**, 2024. Disponível em: <https://office.microsoft.com/excel>. Acesso em: 26 de maio de 2024.

MIRHOSSEINI, M.; KEYNIA, F. Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review. **IET Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 15, n. 16, p. 2287–2297, 2021.

MOR, R. S.; BHARDWAJ, A.; KHARKA, V.; KHARUB, M. Spare parts inventory management in warehouse: a lean approach. **International Journal of Industrial Engineering and Production Research**, Tehran, v. 32, n. 2, p. 4, 2021.

MOR, R. S.; KUMAR, D.; YADAV, S.; JAISWAL, S. K. Achieving cost efficiency through increased inventory leanness: Evidence from manufacturing industry. **Production Engineering Archives**, Czestochowa, v. 27, n. 1, p. 42–49, 2021.

MUKHERJEE, D.; LIM, W. M.; KUMAR, S.; DONTU, N. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research. **Journal of Business Research**, New York, v. 148, p. 101–115, 2022.

NARISWARI, N. P. A.; BAMFORD, D.; DEHE, B. Testing an AHP model for aircraft spare parts. **Production Planning and Control**, London, v. 30, n. 4, p. 329–344, 2019.

NAWASER, K.; JAFARKHANI, F.; KHAMOUSHI, S.; YAZDI, A.; MOHSENIFARD, H.; GHARLEGHI, B. The dark side of digitalization: A visual journey of research through digital game addiction and mental health. **IEEE Engineering Management Review**, Piscataway, p. 1–27, 2024.

NEDJWA, E.; BERTRAND, R.; BOUDEMAGH, S. S. Impacts of industry 4.0 technologies on lean management tools: a bibliometric analysis. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, Paris, v. 16, n. 1, p. 135–150, 2022.

NETO, J. M.; SALOMON, V. A. P.; ORTIZ-BARRIOS, M. A.; PETRILLO, A. Compatibility and correlation of multi-attribute decision making: a case of industrial relocation. **Annals of Operations Research**, New York, v. 326, n. 2, p. 831–852, 2023.

NETTO, A. L.; SALOMON, V. A. P.; ORTIZ-BARRIOS, M. A.; FLOREK-PASZKOWSKA, A. K.; PETRILLO, A.; OLIVEIRA, O. J. Multiple criteria assessment of sustainability programs in the textile industry. **International Transactions in Operational Research**, Chichester, v. 28, n. 3, p. 1550–1572, 2021.

NEVES-SILVA, R.; CAMARINHA-MATOS, L. M. Simulation-based decision support system for energy efficiency in buildings retrofitting. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 19, p. 12216, 2022.

NOURA, H. N.; CHU, T.; ALLAL, Z.; SALMAN, O.; CHAHINE, K. A comparative study of ensemble methods and multi-output classifiers for predictive maintenance of hydraulic systems. **Results in Engineering**, Amsterdam, v. 24, p. 102900, 2024.

OHTA, R. Selection of industrial maintenance strategy: classical AHP and Fuzzy AHP applications. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 10, n. 2, 2018.

OHTA, R.; SALOMON, V. A. P.; SILVA, M. B. Classical, Fuzzy, hesitant Fuzzy and intuitionistic Fuzzy analytic hierarchy processes applied to industrial maintenance management. **Journal of Intelligent and Fuzzy Systems**, Thousand Oaks, v. 38, n. 1, p. 601–608, 2020.

ORTIZ-BARRIOS, M.; CABARCAS-REYES, J.; ISHIZAKA, A.; BARBATI, M.; JARAMILLO-RUEDA, N.; CARRASCAL-ZAMBRANO, G. J. A hybrid Fuzzy multi-criteria decision making model for selecting a sustainable supplier of forklift filters: a case study from the mining industry. **Annals of Operations Research**, New York, v. 307, n. 1–2, p. 443–481, 2021.

OZCAN, E.; YUMUŞAK, R.; EREN, T. A novel approach to optimize the maintenance strategies: a case in the hydroelectric power plant. **Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability**, Lublin, v. 23, n. 2, p. 324–337, 2021.

PATIL, R. B.; KYEONG, S.; PECHT, M.; GUJAR, R. A.; MANE, S. Assessment of reliability allocation methods for electronic systems: A systematic and bibliometric analysis. **Stats**, Basel, v. 8, n. 1, p. 11, 2025.

PAVLOV, A. I.; POLYANIN, I. A.; KOZLOV, K. E. Improving the Reliability of Hydraulic Drives Components. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 206, p. 1629–1635, 2017.

PEREIRA, R. C. A.; SILVA, O. S.; BANDEIRA, R. A. M.; SANTOS, M.; SOUZA ROCHA, C.; CASTILLO, C. S.; GOMES, C. F. S.; PEREIRA, D. A. M.; MURADAS, F. M. Evaluation of smart sensors for subway electric motor escalators through AHP-Gaussian method. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 8, p. 4131, 2023.

QUATRINI, E.; COSTANTINO, F.; POCCI, C.; TRONCI, M. Predictive model for the degradation state of a hydraulic system with dimensionality reduction. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 42, p. 516–523, 2020.

RAHIMI, M. Selecting the most appropriate maintenance strategies using Fuzzy Analytic Network Process: A case study of Saipa vehicle industry. **Decision Science Letters**, Vancouver, v. 3, n. 2, p. 237–242, 2014.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, Oxford, v. 53, p. 49–57, 2015.

RIOS, M. P.; CAIADO, R. G. G.; VIGNON, Y. R.; CORSEUIL, E. T.; SANTOS, P. I. N. Optimising maintenance planning and integrity in offshore facilities using machine learning and design science: A predictive approach. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, n. 23, p. 10902, 2024.

RUDNIK, K.; BOCEWICZ, G.; KUCIŃSKA-LANDWÓJTOWICZ, A.; CZABAK-GÓRSKA, I. D. Ordered Fuzzy WASPAS method for selection of improvement projects. **Expert Systems with Applications**, Oxford, v. 169, p. 114471, 2021.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Maryland Heights, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977.

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

SAATY, T. L. **Mathematical principles of decision making (Principia Mathematica Decernendi)**. Kindleed. Pittsburgh: RWS publications, 2013.

SAATY, T. L. Measuring the fuzziness of sets. **Journal of Cybernetics**, New York, v. 4, n. 4, p. 53–61, 1974.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L.; ÖZDEMİR, M. S. How many judges should there be in a group ?. **Annals of Data Science**, Heidelberg, v. 1, n. 3–4, p. 359–368, 2014.

SAATY, T. L.; PENIWAT, K. **Group decision making: Drawing out and reconciling differences**. Pittsburgh: RWS publications, 2008.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process**. Boston: Springer Nature, 2012. International Series In Operations Research and Management Science, 2012, v. 175.

SAHIN, S. Utilizing AHP and conjoint analysis in educational research: Characteristics of a good mathematical problem. **Education and Information Technologies**, New York, v. 29, n. 18, p. 25375–25401, 2024.

SALOMON, V. A. P.; TORRE, N. M. M. Análise multicritério da manutenção de sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 42., 2022, p. 4–7, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** São José dos Campos: ABEPRO, 2022.

SARDA, K.; ACERNESE, A.; NOLE, V.; MANFREDI, L.; GRECO, L.; GLIELMO, L.; VECCHIO, C. Del. A Multi-step anomaly detection strategy based on robust distances for the steel industry. **IEEE Access**, Piscataway, v. 9, p. 53827–53837, 2021.

SEN, K.; GHOSH, S.; SARKAR, B. Evaluation strategy of hydraulic crane through mathematical programming: an automated approach to meet customer requirement. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, New Delhi, v. 100, n. 4, p. 647–664, 2019.

SHAHIN, A.; AMINSABOURI, N.; KIANFAR, K. Developing a decision making grid for determining proactive maintenance tactics. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 29, n. 8, p. 1296–1315, 2018.

SHANMUGAM, S. P.; NURNI, V. N.; MANJINI, S.; CHANDRA, S.; HOLAPPA, L. E. K. Challenges and outlines of steelmaking toward the year 2030 and beyond - Indian perspective. **Metals**, Basel, v. 11, n. 10, p. 1654, 2021.

SHAO, Y.; XU, Q.; WEI, X. Progress of mine land reclamation and ecological restoration research based on bibliometric analysis. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 13, p. 10458, 2023.

SHUKLA, K.; NEFTI-MEZIANI, S.; DAVIS, S. A heuristic approach on predictive maintenance techniques: Limitations and scope. **Advances in Mechanical Engineering**, London, v. 14, n. 6, p. 168781322211010, 2022.

SINGH, S.; BERNDT, C. C.; RAMAN, R. K.S.; SINGH, H.; ANG, A. S. M. Applications and developments of thermal spray coatings for the iron and steel industry. **Materials**, Basel, v. 16, n. 2, p. 516, 2023.

SIWIEC, D.; PACANA, A. Method of improve the level of product quality. **Production Engineering Archives**, Czesochowa, v. 27, n. 1, p. 1–7, 2021.

TABATABAEE, S.; MAHDIYAR, A.; DURDYEV, S.; MOHANDÉS, S. R.; ISMAIL, S. An assessment model of benefits, opportunities, costs, and risks of green roof installation: A multi criteria decision making approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 238, p. 117956, 2019.

TAHERDOOST, H.; BRARD, A. Analyzing the process of supplier selection criteria and methods. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 32, p. 1024–1034, 2019.

TAKEDA, H.; VEERKAMP, P.; TOMIYAMA, T.; YOSHIKAWA, H. Modeling design processes. **AI magazine**, Hoboken, v. 11, p. 37, 1990.

TAN, X.; LI, H.; GUO, J.; GU, B.; ZENG, Y. Energy-saving and emission-reduction technology selection and CO2 emission reduction potential of China's iron and steel industry under energy substitution policy. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 222, p. 823–834, 2019.

THANKI, S.; GOVINDAN, K.; THAKKAR, J. An investigation on lean-green implementation practices in Indian SMEs using analytical hierarchy process (AHP) approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 135, p. 284–298, 2016.

TORRE, N. M. M. **Lean 4.0 in operational performance on hydraulic systems of a steel plant for decision-making support**. 2023. 0–89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2023.

TORRE, N. M. M.; BONAMIGO, A. Action research of lean 4.0 application to the maintenance of hydraulic systems in steel industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Bradford, v. 30, n. 2, p. 341–366, 2024.

TORRE, N. M. M.; BRANDALISE, N.; BONAMIGO, A. Economic feasibility analysis for insourcing hydraulic maintenance services using the Monte Carlo method. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 30, p. e1623, 2023.

TORRE, N. M. M.; QUEZADA, L.; SALOMON, V. Hydraulic projects prioritization in the steel industry: an analytic hierarchy process approach. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY MANAGEMENT AND OPERATIONS, 2023, Vila Nova de Famalicão. **Proceedings** [...]. Vila Nova de Famalicão: ICOTEM, 2023.

TORRE, N. M. M.; SALOMON, V. A. P. Análise bibliométrica da aplicação do método AHP na gestão da manutenção de ativos na indústria siderúrgica. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, Porto Alegre, 44., 2024. **Anais [...]** São José dos Campos: ABEPRO, 2024.

TRAMARICO, C. L.; KARPAK, B.; SALOMON, V. A. P.; SILVEIRA, C. A. M.; MARINS, F. A. S. Multi-criteria analysis of professional education on supply chain management. **Production**, Sao Paulo, v. 29, 2019.

ULUTAŞ, A. Supplier selection by using a Fuzzy Integrated model for a textile company. **Engineering Economics**, Kaunas, v. 30, n. 5, p. 579–590, 2019.

VAN AKEN, J.; CHANDRASEKARAN, A.; HALMAN, J. Conducting and publishing design science research. **Journal of Operations Management**, Hoboken, v. 47–48, n. 1, p. 1–8, 2016.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. **Scientometrics**, Budapest, v. 111, n. 2, p. 1053–1070, 2017.

VERGARA, I. G. P.; ARIAS SÁNCHEZ, J. A.; POVEDA-BAUTISTA, R.; DIEGO-MAS, J.-A. Improving distributed decision making in inventory management: A combined ABC-AHP approach supported by teamwork. **Complexity**, Oxford, v. 2020, p. 1–13, 2020.

VERMA, A.; KHAN, S.; MAITI, J.; KRISHNA, O. B. Identifying patterns of safety related incidents in a steel plant using association rule mining of incident investigation reports. **Safety Science**, Amsterdam, v. 70, p. 89–98, 2014.

WANG, C.-N.; NGUYEN, T.-L.; DANG, T.-T. Two-stage Fuzzy MCDM for green supplier selection in steel industry. **Intelligent Automation and Soft Computing**, Henderson, v. 33, n. 2, p. 1245–1260, 2022.

WEI, Q. Sustainability evaluation of photovoltaic poverty alleviation projects using an integrated MCDM method: A case study in Guangxi, China. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 302, p. 127040, 2021.

YANG, C.; DUAN, R.; LIN, Y.; CHEN, L. A maintenance strategy for hydraulic systems based on generalized stochastic Petri nets under epistemic uncertainty. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 46, n. 2, p. 99, 2024.

YUNUSA-KALTUNGO, A.; LABIB, A. A hybrid of industrial maintenance decision making grids. **Production Planning and Control**, London, v. 32, n. 5, p. 397–414, 2021.

ZHAO, J.; GAO, C.; TANG, T. A review of sustainable maintenance strategies for single component and multicomponent equipment. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 5, p. 2992, 2022.

APÊNDICE

Publicações desenvolvidas durante a pesquisa de doutorado:

SALOMON, V. A. P.; TORRE, N. M. M. Análise multicritério da manutenção de sistemas hidráulicos na indústria siderúrgica. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 42., 2022, p. 4–7, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** São José dos Campos: ABEPRO, 2022.

TORRE, N. M. M; MARINS, F. A. S.; SALOMON, V. A. P. Maintenance strategy selection of hydraulic systems in the steel industry: a design science research approach. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, 2025 [Preprint].

TORRE, N. M. M; QUEZADA, L. E.; SALOMON, V. A. P. Analytic hierarchy statistics tools application for literature review: A case on industrial management decision-making. **Stats**, Basel, 2025 [Preprint].

TORRE, N. M. M.; QUEZADA, L.; SALOMON, V. Hydraulic projects prioritization in the steel industry: An analytic hierarchy process approach. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY MANAGEMENT AND OPERATIONS*, 2023, Vila Nova de Famalicão. **Proceedings [...]** [S.l.]: ICOTEM, 2023.

TORRE, N. M. M.; SALOMON, V. A. P. Análise bibliométrica da aplicação do método AHP na gestão da manutenção de ativos na indústria siderúrgica. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, Porto Alegre, 44., 2024. **Anais [...]** São José dos Campos: ABEPRO, 2024.

TORRE, N. M. M.; SALOMON, V. A. P. Hydraulic supplier selection: An analytic hierarchy process approach. *In: ECONOMIC POLICY, BUSINESS, AND MANAGEMENT IN THE POST-PANDEMIC PERSPECTIVE*, 2023, p. 131-148, Varsóvia. **Proceedings [...]**. Varsóvia: Institute of Economics, Polish Academy of Sciences, 2023.

TORRE, N. M. M.; SALOMON, V. A. P. Multi-criteria assessment of spare parts of hydraulic systems. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*, 2022, Virtual. **Proceedings [...]** [S.l.]: ISAHP, 2022.

TORRE, N. M. M; SALOMON, V. A. P; FLOREK-PASZKOWSKA, A. K. Multi-criteria classification of spare parts in the steel industry. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 2344-2344, 2025.

TORRE, N. M. M.; SALOMON, V. A. P.; LOCHE, E.; GAZALE, S. A.; PALERMO, V. Warehouse location for product distribution by e-commerce in Brazil: Comparing symmetrical MCDM applications. **Symmetry**, Basel, v. 14, n. 10, p. 1987, 2022.