

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**HENRIQUE SEIDI AYABE
IAGO TOSHIO YABIKU
MURILLO JOSÉ DE AZEVEDO**

**PRIORIZAÇÃO DE ATIVOS EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: IMPLEMENTAÇÃO
DE MÉTODOS MULTICRITÉRIO COM INFORMAÇÃO PARCIAL - MÉTODO
FITRADEOFF**

**CURITIBA
2022**

**HENRIQUE SEIDI AYABE
IAGO TOSHIO YABIKU
MURILLO JOSÉ DE AZEVEDO**

**PRIORIZAÇÃO DE ATIVOS EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: IMPLEMENTAÇÃO
DE MÉTODOS MULTICRITÉRIO COM INFORMAÇÃO PARCIAL - MÉTODO
FITRADEOFF**

**PRIORITIZATION OF ASSETS IN INDUSTRIAL MAINTENANCE:
IMPLEMENTATION OF MULTI-CRITERIA METHODS WITH PARTIAL
INFORMATION - FITRADEOFF METHOD**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação dos Cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures

Co-orientador: Me. Cleiton Ferreira dos Santos

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**HENRIQUE SEIDI AYABE
IAGO TOSHIO YABIKU
MURILLO JOSÉ DE AZEVEDO**

**PRIORIZAÇÃO DE ATIVOS EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL -
IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS MULTICRITÉRIO COM INFORMAÇÃO
PARCIAL E MÉTODO FITRADEOFF**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação dos Cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26 de novembro de 2022.

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures
Orientador
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Me. Cleiton Ferreira dos Santos
Co-orientador
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR)

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**CURITIBA
2022**

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, amigos
e companheiras que nos deram suporte em toda
nossa trajetória na universidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures que esteve presente nos ensinando e guiando durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Agradecemos ao nosso coorientador Me. Cleiton Ferreira dos Santos que nos ajudou compartilhando seus conhecimentos e suas experiências para a execução do trabalho.

Agradecemos aos nossos pais que nos educaram, apoiaram e proporcionaram toda a base necessária para chegarmos até aqui.

Agradecemos aos nossos amigos que estavam presentes e nos incentivaram para concluir essa etapa das nossas vidas.

RESUMO

Nos dias atuais, com a Indústria 4.0, as empresas de destaque sempre buscam a melhor estratégia para obterem os melhores resultados através de soluções que visam aumentar a produtividade e diminuir os gastos. Logo, para a empresa manter-se competitiva a boa gestão das máquinas é imprescindível. Para realizar a gestão de um grande número de ativos de uma empresa é recomendável a utilização de ferramentas que auxiliam na análise. Os métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão são ferramentas extremamente valiosas para este tipo de análise, porém requerem tomadas de decisões, critérios, ponderações e escolhas difíceis, tornando para o decisor uma tarefa complexa. Logo, existem métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão com informações parciais ou imprecisas a respeito das preferências do decisor. Em geral, o objetivo das abordagens que utilizam informação parcial é reduzir a complexidade da tomada de decisão na prática, tornando o processo decisório mais fácil para o decisor. Com isso, o presente trabalho apresenta um *framework* para realizar a priorização dos ativos com aplicação em duas etapas que utilizam dois métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão com informações parciais: FITradeoff Classificação e FITradeoff Ordenação. Na primeira etapa utilizou-se o FITradeoff Classificação para separar os ativos da empresa em categorias com criticidade semelhantes. Em seguida, para obter o ranqueamento dos ativos, na segunda etapa, foi aplicado duas vezes o método FITradeoff Ordenação. A primeira aplicação foi para obter o ranqueamento dos ativos, do mais crítico para o menos crítico, para cada categoria resultante da primeira etapa. Por fim, para a segunda aplicação selecionou-se os cinco ativos mais críticos de cada categoria da aplicação anterior, para obter o ranqueamento das máquinas da empresa. Os resultados obtidos nos dois métodos foram apresentados e validados. Portanto, os objetivos do estudo foram atingidos.

Palavras-chave: Métodos Multicritérios de apoio à tomada de decisão com informações parciais; FITradeoff Classificação; FITradeoff Ordenação; Priorização.

ABSTRACT

Nowadays, with Industry 4.0, prominent companies always seek the best strategy to obtain the best results through solutions that aim to increase productivity and reduce expenses. Therefore, for the company to remain competitive, good management of the machines is essential. To manage a large number of assets in a company, it is recommended to use tools that help in the analysis. The Multi-criteria decision making support methods are extremely valuable tools for this type of analysis, however, they require making decisions, criteria, weights and difficult choices, making a complex task for the decision maker. Therefore, there are multi-criteria methods to support decision making with partial or imprecise information about the decision maker's preferences. In general, the objective of approaches that use partial information is to reduce the complexity of decision making in practice, making the decision process easier for the decision maker. With this, the present work presents a *framework* to carry out the prioritization of assets with application in two stages that use two multicriteria methods to support decision making with partial information: FITradeoff for Sorting problematic and FITradeoff for Ranking problematic. In the first step, the FITradeoff Classification was used to separate the company's assets into categories with similar criticality. Then, to obtain the ranking of the assets, in the second step, the FITradeoff Sorting method was applied twice. The first application was to obtain the ranking of assets, from the most critical to the least critical, for each category resulting from the first step. Finally, for the second application, the five most critical assets of each category of the previous application were selected, to obtain the ranking of the company's machines. The results obtained in both methods were presented and validated. Therefore, the objectives of the study were achieved.

Key-words: Multicriteria methods to support decision making with partial information; FITradeoff Ranking; FITradeoff Sorting. Prioritization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Abordagem Metodológica Utilizada.....	15
Figura 2 - <i>framework</i> para classificação de métodos de informação parcial. ...	22
Figura 3 - <i>framework</i> para classificação de métodos de informação parcial. ...	23
Figura 4 - Definição de classe e valores de limite.	25
Figura 5 - Regra de decisão.	25
Figura 6 - Processo de elicitação flexível para problemas de classificação.	26
Figura 7 - Processo de elicitação flexível para problemas de ordenação.	27
Figura 8 - Sequência conceitual de etapas para aplicação do FMEA.	29
Figura 9 - Classificação da Chave de Avaliação na Categoria de Prioridade. ...	30
Figura 10 - Classificação da Chave de Avaliação na Categoria de Falha.	30
Figura 11 - <i>Framework</i> para abordagem quali-quantitativa.	31
Figura 12 - <i>Framework</i> de avaliação de criticidade de ativos.	34
Figura 13 - Fluxograma das etapas de aplicação.	37
Figura 14 - Ativos configurados em salas.	38
Figura 15 - Quantidade de máquinas das salas selecionadas.	39
Figura 16 - Planilha padrão do Excel para problemática de classificação utilizada nesse estudo.	41
Figura 17 - Layout do software FITradeoff para classificação.	41
Figura 18 - Etapa 1: Ponderações dos critérios.	42
Figura 19 - Etapa 2: Perguntas para a comparação par a par dos critérios.	43
Figura 20 - Resultado final do método FITradeoff Classificação.	43
Figura 21 - Planilha exportada do FITradeoff com os resultados.	44
Figura 22 - Quantidade de máquinas por classes.	44
Figura 23 - Planilha padrão do Excel para problemática de ordenação utilizada nesse estudo.	46
Figura 24 - Layout do software FITradeoff para ordenação.	47
Figura 25 - Ponderação dos critérios.	48
Figura 26 - Perguntas para a comparação par a par dos critérios.	48
Gráfico 1 - Classe 1.....	49
Gráfico 2 - Classe 2.....	49
Gráfico 3 - Classe 3.....	50
Gráfico 4 - Classe 4.....	50
Gráfico 5 - Classe 5.....	51
Gráfico 6 - Classe 6.....	51
Gráfico 7 - Classe 7.....	52
Gráfico 8 - Classe 8.....	52
Gráfico 9 - Ranqueamento global dos ativos.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios divididos em categorias.....	37
Tabela 2 - Tipos de critério.....	40
Tabela 3 - Máquinas das classes menos críticas e mais críticas.....	45
Tabela 4 - As 8 classes com os seus 5 ativos mais críticos.....	53
Tabela 5 - Resultados da classificação e ordenação.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CIC	Cidade Industrial de Curitiba
DM	<i>Decision Maker</i>
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing Reality</i>
FITradeoff	<i>Flexible and Interactive Tradeoff</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
IA	Inteligência Artificial
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision-Making</i>
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MMAD	Métodos multicritério de apoio à decisão
MPI	<i>Maintenance Performance Indicator</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NBR	Norma Brasileira
PPL	Problemas de programação linear
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation</i>
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problematização	13
1.2	Objetivos	13
1.3	Justificativa	14
1.4	Metodologia da Pesquisa	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Manutenção	16
2.1.1	Manutenção Corretiva	16
2.1.2	Manutenção Preventiva	17
2.1.3	Manutenção Preditiva	18
2.2	Indicadores de Manutenção	18
2.2.1	Confiabilidade	19
2.2.2	Mantenabilidade	19
2.2.3	Disponibilidade	20
2.3	Criticidade	20
2.4	Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão com informação parcial - Método FITradeoff	21
2.4.1	Fitradeoff	22
2.4.1.1	FITradeoff para problemática de classificação	24
2.4.1.2	FITradeoff para problemática de ordenação	27
2.5	Análise de Criticidade e Priorização de ativos em Manutenção - abordagens	28
2.5.1	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)	28
2.5.2	Árvore de Decisão	29
2.5.3	Modelo quali-quantitativo MMAD	31
2.6	Síntese e conclusão do capítulo	32
3.	FRAMEWORK GERAL DO PROCESSO DE APLICAÇÃO	34
3.1	Síntese e conclusão do capítulo	35
4.	CASE DE APLICAÇÃO	36
4.1	Priorização dos ativos	36
4.1.1	Obtenção dos dados	37
4.1.2	Análise e seleção dos grupos para priorização dos ativos	39
4.1.3	Classificação dos ativos pelo FITradeoff Classificação	39

4.1.4	Ranqueamento dos ativos pelo FITradeoff Ordenação	45
4.2	Análise dos resultados	54
5.	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A - CLASSIFICAÇÃO DOS ATIVOS	63
	APÊNDICE B - DIAGRAMA DE HASSE	67
	APÊNDICE C - VALOR LIMITE	82

1. INTRODUÇÃO

A manutenção industrial nasce no século XIX, durante a Primeira Revolução Industrial, com a mecanização das indústrias. Com a intenção de evitar as paralisações que ocorriam por falhas em equipamentos e interrompiam as linhas de produção, surge a necessidade dos primeiros reparos emergenciais.

Segundo Kardec e Nascif (2009), a história da manutenção é dividida em quatro gerações. A primeira geração seria durante o período da Segunda Guerra Mundial, é caracterizada pela fabricação e instalação de máquinas extremamente simples e confiáveis. Nesse período, não havia nenhum método de manutenção e as ações eram mais focadas em limpeza e lubrificação, com reparos após a quebra, introduzindo uma manutenção corretiva não programada.

A segunda geração (1950 - 1970), pós 2ª Guerra Mundial, é caracterizada pelo desenvolvimento da indústria, impulsionado pela alta demanda de produção para a reconstrução dos países e suas economias. Nesse período, surge a necessidade de maior disponibilidade, confiabilidade e produtividade. Assim, os processos rotineiros de operação e manutenção ficaram mais organizados e eficientes, por consequência, apareceram os primeiros métodos de manutenção preventiva.

A terceira geração (1970), explorou os indicadores de qualidade, segurança, disponibilidade, confiabilidade e, principalmente, redução de custos, para iniciar uma nova fase com busca de eficiência e performance focando os altos resultados na indústria. Percebeu-se a necessidade de monitoramento de condições, dando origem à manutenção preditiva, facilitada pelas tecnologias.

A quarta geração é caracterizada por minimizar as manutenções corretivas e preventivas buscando uma melhoria na confiabilidade e disponibilidade, realizando análise de falhas e o gerenciamento de ativos, também apresentando uma maior preocupação com segurança e meio ambiente.

Atualmente a indústria encontra-se em uma nova geração, a revolução da Indústria 4.0 que surgiu em meados de 2010 na Alemanha. A Indústria 4.0 cria o que foi chamado de “fábrica inteligente”. Dentro das fábricas inteligentes, os sistemas ciberfísicos monitoram em tempo real os processos físicos, criam uma “cópia virtual” do mundo físico e tomam decisões descentralizadas (RODRIGO PORTES, 2021).

Neste contexto, as organizações dão atualmente especial ênfase à disponibilidade e confiabilidade de seus ativos e o conceito de criticidade torna-se central na manutenção industrial. Tal ênfase, criticidade, direciona esforços para priorização das ações de intervenção da manutenção que envolve perspectivas multicritério no apoio decisional para definição dos ativos sob condição prioritária de atendimento. O monitoramento dos critérios envolvidos, sob abordagem MMAD (do inglês, “*Multi-Criteria Decision-Making*” - MCDM), caracteriza um modelo do ativo que pode inferir sobre uma situação preditiva de anormalidade à luz da criticidade.

Nesse contexto, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) suportada por métodos multicritério de apoio à decisão (MMAD) são ferramentas úteis e efetivas para a escolha da estratégia/tarefa mais adequada considerando o domínio de análise, visto que estas metodologias visam a otimização dos recursos e a confiabilidade dos componentes e máquinas (SANTOS, 2019).

1.1 Problematização

Sabe-se que a falha de um equipamento pode acarretar riscos pessoais e/ou riscos ao meio ambiente, causar diminuição ou parada total da produção, bem como afetar a qualidade de um produto. Tendo isso em vista, a manutenção orientada à priorização de ativos sob a ótica de criticidade é de extrema importância para aumentar a confiabilidade, melhorar a qualidade, diminuir os custos, aumentar a vida útil e melhorar a segurança.

A maioria dos métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão que auxiliam nas atividades de manutenção requerem um alto esforço cognitivo do decisor, um grande tempo durante o processo de elicitação e tem uma alta taxa de inconsistência. Dessa maneira, ocorre um desencorajamento do decisor em realizar o processo de tomada de decisão.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo auxiliar a tomada de decisão na manutenção de ativos de uma empresa multinacional, localizada em Curitiba. Esse auxílio se dá através da aplicação do método multicritério de apoio à decisão com informação parcial, FITradeoff, utilizado para obter um ranqueamento das máquinas de acordo com o nível de criticidade

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar as dimensões de decisão em Manutenção sob a ótica da criticidade;
- Estudar os métodos multicritérios de informação parcial;
- Estudar aprofundadamente o método multicritério FITradeoff, para as problemáticas de classificação e ordenação;
- Coletar os dados e informações da empresa;
- Utilizar os dados na plataforma FITradeoff;
- Classificar e ordenar as máquinas segundo o nível de criticidade;
- Analisar os resultados e avaliar a robustez do ranqueamento final.

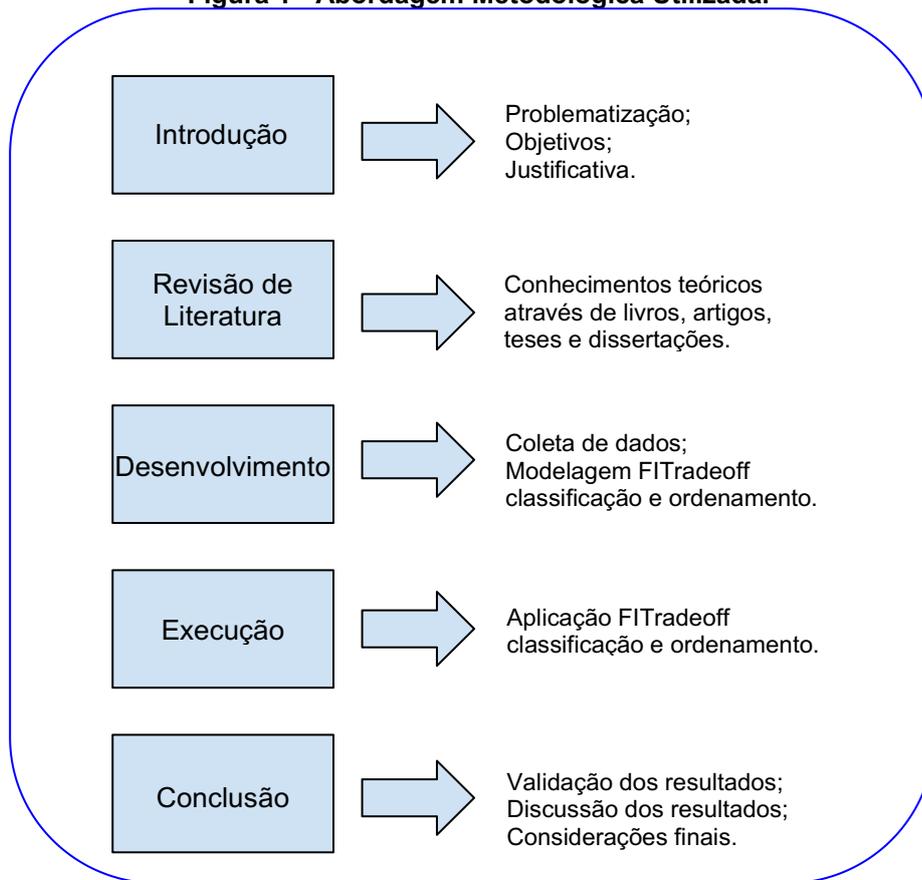
1.3 Justificativa

Este trabalho está sendo desenvolvido com o propósito de avaliar a aplicação do método de multicritério de informação parcial FITradeoff, para auxílio à tomada de decisão na manutenção de ativos, observando se tornará a atividade mais ágil e menos complicada para os decisores de uma empresa, a qual atua nos ramos de engenharia e tecnologia.

A concretização da solução proposta neste estudo mostra que o FITradeoff é um método de priorização de ativos adequado para a aplicação no dia-a-dia da indústria, devida a sua praticidade e rapidez para aplicação. Logo, a sua adoção otimiza os custos, atividades, recursos, produtividade, entre outros.

1.4 Metodologia da Pesquisa

Para desenvolvimento desta pesquisa, o documento está estruturado como segue: o capítulo 1 dedica-se a introdução e contextualização da problemática; na sequência, o capítulo 2 dedica-se a revisão de literatura, por meio de livros e artigos relacionados ao tema manutenção preventiva; em seguida, o capítulo 3 consiste no estudo do método de decisão multicritério de informação parcial FITradeoff e do *framework* proposto neste trabalho, além da coleta de dados necessários para o estudo de caso; na próxima seção, capítulo 4, o estudo de caso é realizado com a aplicação dos dois métodos FITradeoff Classificação e Ordenação; Por fim, no capítulo 5 é realizada a análise de todos os resultados obtidos ao longo do processo e a conclusão do que foi desenvolvido no presente projeto.

Figura 1 - Abordagem Metodológica Utilizada.

Fonte: Os autores. (2021)

A Figura 1 apresenta a estrutura utilizada nesse trabalho, com uma breve explicação dos pontos abordados em cada um dos cinco capítulos. A revisão da literatura foi realizada através da base de dados de resumos e citações de literaturas revisada, Scopus. A coleta de dados ocorreu com reuniões remotas com o orientador e coorientador. A execução foi a inserção e simulação dos dados na plataforma FITradeoff Classificação e FITradeoff Ordenação. E a conclusão é a validação do trabalho com a comparação final entre os resultados dos dois métodos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será exibido uma revisão bibliográfica de alguns temas que são considerados relevantes para a realização do trabalho em questão.

Primeiramente será abordado o conceito de criticidade, juntamente com manutenção geral, explorando as definições, especificações e suas respectivas classificações: Corretiva, Preventiva e Preditiva.

Na sequência, será abordado o método de multicritério de informação parcial a ser utilizado neste estudo, apresentando a funcionalidade e diferença dele para outros métodos.

Prosseguindo, no próximo tópico, será retomado com um foco maior a questão da criticidade e a sua aplicação no método FITradeoff.

2.1 Manutenção

Segundo Almeida (2014), a manutenção é o conjunto de cuidados e procedimentos técnicos necessários para o bom funcionamento dos equipamentos e peças do sistema produtivo. A manutenção tornou-se essencial para o bom funcionamento das empresas, pois seu principal objetivo é otimizar e garantir a confiabilidade dos processos, mantendo a disponibilidade dos equipamentos e eliminando as possíveis falhas dos mesmos.

Para Seleme (2015), a manutenção realizada de forma planejada, apresenta benefícios que justificam a sua aplicação, como, por exemplo: segurança, qualidade, confiabilidade e vida útil. De acordo com a norma NBR-5462, os três principais tipos de manutenção são as corretivas, preventivas e preditivas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

2.1.1 Manutenção Corretiva

A norma NBR-5462 diz que, a manutenção corretiva é a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Segundo Kardec e Nascif (2009), esse tipo de manutenção é a ação para corrigir a falha ou o desempenho menor que o exigido, ou seja, o defeito. Assim, ainda de acordo com os autores, é possível observar duas condições que podem

conduzir à manutenção corretiva. São elas, o desempenho deficiente identificado por meio do monitoramento de alguns parâmetros do equipamento, ou a ocorrência da falha.

2.1.2 Manutenção Preventiva

A norma NBR-5462 afirma que, a manutenção preventiva é a

Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

A manutenção preventiva é importante para a indústria, pois ela possibilita antecipar a correção de uma falha ou avaria em uma máquina, equipamento, veículo ou instalação através da prevenção, com o objetivo de restabelecer as condições originais do equipamento, visando reduzir a probabilidade de falha.

Segundo Gregório e Silveira (2018), a manutenção preventiva deve ser adotada quando:

- não é possível a manutenção preditiva;
- aspectos relacionados à segurança tornam mandatória a intervenção;
- surgir a oportunidade em equipamentos de difícil liberação operacional;
- há riscos ao meio ambiente;
- há parada geral em equipamentos estratégicos ou de operação contínua.

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), a principal função da manutenção preventiva é controlar o estado e garantir a disponibilidade em um equipamento ou sistema. Para isso, é necessário identificar a frequência ótima de realização de manutenções preventivas, trocas e inspeções.

Segundo a norma NBR-5462 para utilizar a manutenção preventiva é necessário observar três pontos: intervalos pré-determinados, critérios específicos e redução da probabilidade de falhas. Assim, quando surge um desses eventos listados, é um sinal avisando que um determinado equipamento deve passar por manutenção.

2.1.3 Manutenção Preditiva

A norma NBR-5462 define a manutenção preditiva como:

Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994).

Segundo Nguyen e Medjaher (2019), devido à crescente exigência de confiabilidade, disponibilidade, facilidade de manutenção e segurança dos sistemas, estratégias de manutenção corretiva estão se tornando menos eficazes e obsoletas. Além disso, a revolução da Indústria 4.0 fornece suportes mais convenientes para o amplo desenvolvimento da manutenção preditiva na prática. Por exemplo, o uso de sensores inteligentes fornece uma solução confiável para monitoramento do sistema em tempo real. Com essas informações, o gerente pode planejar as atividades de manutenção de forma mais eficaz para reduzir o tempo de máquina parada e melhorar o fluxo de produção.

Em comparação com as manutenções corretiva e preventiva, a manutenção preditiva mostra um melhor desempenho, incluindo a redução do valor não agregado nas operações de manutenção, melhorando a vida útil do equipamento e a eficiência da produção e mantendo um estado de equipamento mais estável e confiável em seu ciclo de vida. Os estudos relevantes são divididos em duas direções no campo da manutenção preditiva. O primeiro é como obter um diagnóstico preciso e previsão de estado para o equipamento alvo. A segunda é como realizar uma melhor tomada de decisão de manutenção com base no diagnóstico do estado e nas informações de previsão do equipamento alvo (Mi, et al., 2020).

2.2 Indicadores de Manutenção

Nascif (2002) afirma que os indicadores, medidas ou dados numéricos estabelecidos sobre os processos que serão controlados são dados chave para a tomada de decisão, visto que somente eles permitem uma quantificação e acompanhamento dos processos, distanciando-se da subjetividade e propiciando as correções necessárias.

Mudando o foco para a manutenção, ainda de acordo com Nascif (2002), os indicadores de performance permitirão gerenciar a manutenção de modo eficaz,

sintonizados com os objetivos estratégicos da empresa. Além de tudo, atualmente, as empresas que possuem as melhores práticas veem a manutenção como uma atividade que deve proporcionar redução nos custos de produção ou serviços, com indicadores que acompanham a performance da manutenção durante os processos.

2.2.1 Confiabilidade

A norma NBR-5462 define confiabilidade como: “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994).

Segundo Dias (2009), ao tratar de questões de manutenção, a confiabilidade reunida com técnicas de engenharia garante que uma planta fabril apresente uma menor incidência de falhas em suas máquinas, permitindo que as equipes de manutenção tenham maior êxito em suas atividades, ampliando a disponibilidade dos ativos e reduzindo custos associados a reparos e substituições.

Para Ebrahimi (2010), confiabilidade pode ser representada por uma fórmula que relaciona confiabilidade R com a base de log natural (e), a taxa de falha (λ) e a duração de tempo (t), ou outra fórmula que considera o tempo médio entre falhas (MTBF).

$$R = \int_t^{\infty} f(t)dt = e^{-\lambda t}$$

$$R = e^{-\lambda t}$$

$$R = e^{\frac{-t}{MTBF}}$$

$$MTBF = \frac{\text{Somatório de horas em bom funcionamento}}{\text{Número de paradas para manutenção corretiva}}$$

A fórmula da confiabilidade acima é válida somente se a taxa de falha for constante, não variando com o tempo.

2.2.2 Mantenabilidade

A norma NBR-5462 define a mantenabilidade como:

Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994).

De acordo com Gregório e Silveira (2018), a manutenibilidade, representada por $M(t)$, é a capacidade que um componente, produto, equipamento ou sistema tem de receber manutenção, dentro de um período de tempo determinado e com um custo preestabelecido. Ela pode ser calculada pela equação:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Onde μ é a taxa de reparos:

$$\mu = \frac{\text{número de reparos efetuados}}{\text{tempo total de reparo}} = \frac{1}{MTTR}$$

Onde MTTR (do inglês “*Mean Time To Repair*”) é a média aritmética dos tempos de reparo de um equipamento:

$$MTTR = \frac{\text{somatório de tempos de reparo}}{\text{número de intervenções realizadas}}$$

Assim como em confiabilidade, para a fórmula apresentada acima ser válida é necessário que a taxa de falha seja constante, não variando com o tempo.

2.2.3 Disponibilidade

De acordo com Gregório e Silveira (2018), a disponibilidade é quando um item está em condições de executar uma certa função em um determinado instante ou durante um intervalo de tempo preestabelecido, ou seja, é a relação entre o tempo produzindo e o tempo programado. A disponibilidade pode ser calculada pela equação:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} * 100\%$$

“Disponibilidade é um termo amplo, expressando a relação entre o serviço entregue e o serviço esperado. Essa é a fração de tempo que uma coisa ou sistema está disponível para uso, ou seja, não encerrado por falha” (EBRAHIMI, p.76, 2010).

2.3 Criticidade

No ambiente fabril, com o passar do tempo, aumentou a diversidade de máquinas existentes, criando diferentes graus de importância para os processos. Com o aumento da quantidade de máquinas, fica mais complexo para as equipes de manutenção determinarem quais são os ativos mais críticos e que necessitam de mais recursos.

Conforme Pilão (2017), as diversas máquinas existentes em um ambiente fabril, que contemplam diferentes graus de importância no processo produtivo,

devem determinar quais são esses ativos mais críticos, com o objetivo de rentabilizar os recursos e responder com uma maior eficácia às exigências do mercado.

Sendo assim, visando elaborar os planos de manutenção dos ativos, a criticidade se torna uma ferramenta essencial, visto que a mesma objetiva o alinhamento do planejamento da manutenção conforme a criticidade e o impacto de cada ativo ao negócio (PIRES et al., 2018).

Visando objetivar o planejamento e uma resposta com maior eficácia da equipe de manutenção, essa técnica se torna uma ferramenta essencial para a indústria. Tornando visível para a manutenção o ativo mais crítico, o qual deve ser priorizado na análise do nível de manutenção e na disposição de recursos.

Macedo (2011) afirma que os processos produtivos são priorizados de forma hierárquica conforme as necessidades dos clientes, podendo se alterar constantemente, visto que as demandas do mercado são variáveis, resultando na adaptação a essas mudanças para viabilizar a máxima disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

2.4 Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão com informação parcial - Método FITradeoff

No contexto da gestão industrial, as primeiras coisas que vem à cabeça são as tomadas de decisões, escolhas difíceis, critérios, ponderação, entre outros. E quanto à ciência sobre a tomada de decisões, existem métodos que auxiliam nessas ações, tornando-as mais assertivas (SANTOS, A. F., 2021).

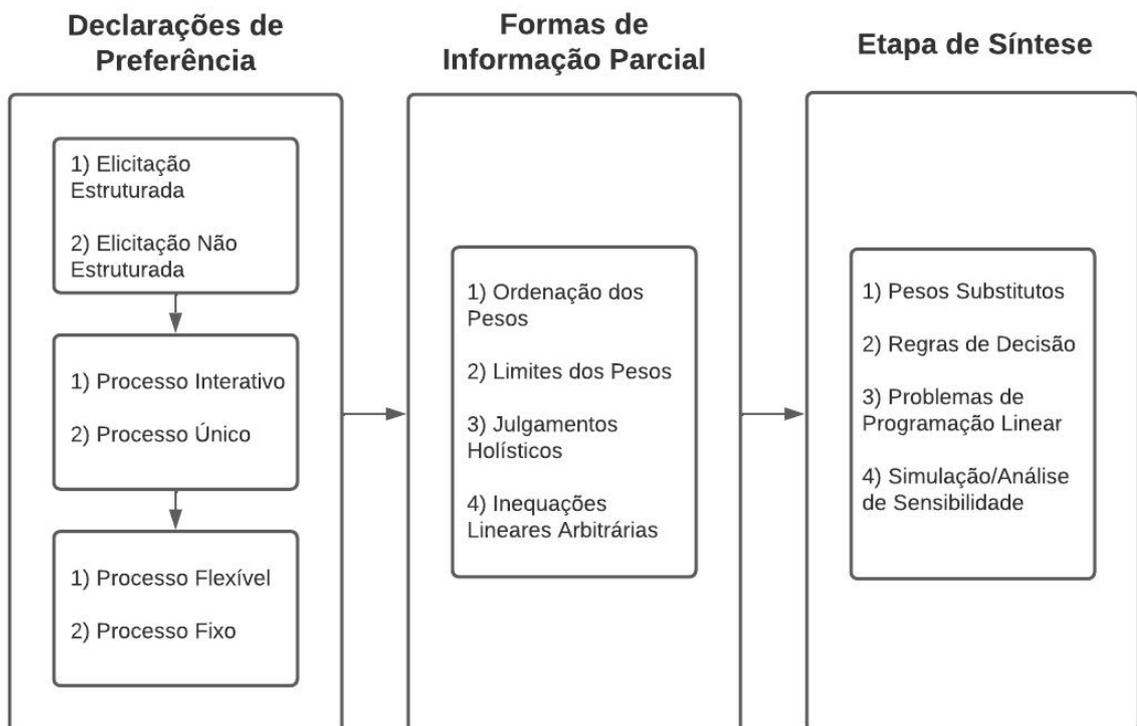
O Método Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD) surgiu com o intuito de auxiliar na obtenção de soluções para problemas que possuam mais de uma variável conflitante entre si, dependendo do decisor encontrar ou formular sua melhor relação de compromisso entre os vários critérios (CAVALCANTE, 2003).

Neste contexto, métodos multicritério de tomada de decisão surgiram como procedimentos de apoio que são vistos como ferramentas matemáticas eficazes para resolução de problemas em que existam critérios conflitantes (BRIOZO e MUSETTI, 2015).

No entanto, fornecer a informação precisa exigida por métodos tradicionais, como, por exemplo, valores de indiferença entre duas consequências no procedimento de *tradeoff* tradicional (KEENEY & RAIFFA, 1976), não é uma tarefa fácil para o decisor. Estas questões motivaram o desenvolvimento de métodos

multicritério que trabalham com informação parcial, incompleta ou imprecisa a respeito das preferências do decisor para estimar a função valor/utilidade. Em geral, o objetivo das abordagens que utilizam informação parcial é reduzir a lacuna entre metodologias teóricas de apoio à decisão e a tomada de decisão na prática, tornando o processo decisório cognitivamente mais fácil para o decisor.

Figura 2 - *framework* para classificação de métodos de informação parcial.



Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2016)

O *framework* de informação parcial é apresentado na Figura 2 que resume diferentes tipos de abordagens introduzidas para obter informações parciais no procedimento de elicitacão. Esse *framework* considera três etapas principais, declaraes de preferência pelo decisor, formas de informaes parciais e etapa final de síntese (de ALMEIDA, et al., 2016).

2.4.1 Fittradeoff

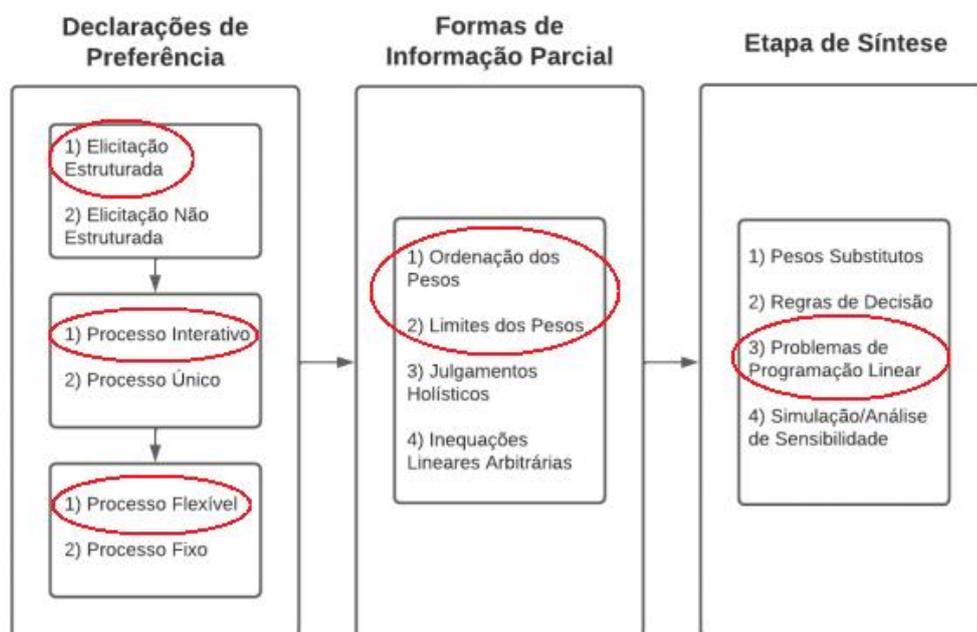
Será apresentado uma breve descrio do FITradeoff sobre a sua lógica e justificativa para o uso desse método.

O Sistema de Apoio  Decisão FITradeoff foi desenvolvido por de Almeida et al. (2016), e utiliza informaes parciais do decisor. O sistema  voltado a problemas

de decisão multicritério na problemática de escolha, considerando funções de valores marginais lineares para todos os critérios. Apesar desse padrão, para cada par de critérios o método é flexível no sentido de que o decisor não precisa seguir etapas de forma pré-determinada. Ele pode pular as perguntas quando não puder ou não quiser responder; pode olhar nos resultados atuais sempre que o espaço de pesos for atualizado; ou pode até mesmo parar o processo de elicitación se ele/ela considerar que as informações disponíveis até o momento são suficientes para seus propósitos ou não está disposto a continuar o processo.

De acordo com de Almeida et al. (2016), no método de FITradeoff a ordenação das constantes de escala dos critérios ocorre de forma similar ao que é realizado no *tradeoff* tradicional, ou seja, comparação de consequências hipotéticas resultando em uma ordenação completa das constantes de escala dos critérios. A diferença entre o método FITradeoff para o procedimento de tradeoff tradicional está na forma de obtenção de relações entre as constantes de escala e a forma que elas são utilizadas para recomendar algo para o decisor.

Figura 3 - *framework* para classificação de métodos de informação parcial.



Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2016)

Segundo de Almeida et al. (2016), este método utiliza o *framework* (Figura 3), cujo destaques são as características do FITradeoff. A elicitación é estruturada, o processo é interativo e flexível, as formas de informações parciais são por

ordenação ou limite dos pesos e a etapa de síntese é baseada em modelos de problemas de programação linear (PPL).

Logo, o FITradeoff oferece vários benefícios para o decisor, como: perguntas mais fáceis de responder, redução no número de perguntas a serem respondidas, redução do esforço cognitivo exigido durante a elicitacão e redução da taxa de inconsistência.

2.4.1.1 FITradeoff para problemática de classificacão

Segundo Frej et al. (2020), a elicitacão flexível desse processo apresenta a vantagem de não exigir pontos exatos de indiferença a serem definidos para todos os pares de critérios. Durante o processo de elicitacão flexível, cada novo nível de informacão que o decisor fornece em relacão a um par de critérios i e $i+1$ na forma de preferências estritas é usado para atualizar um intervalo de valores (X_i'', X_i') , $v_i(X_i'') < v_i(X_i')$, que contém o ponto de indiferença x_i^l . Os limites de tais intervalos estão relacionados com os critérios de peso como mostrado na equacão a seguir:

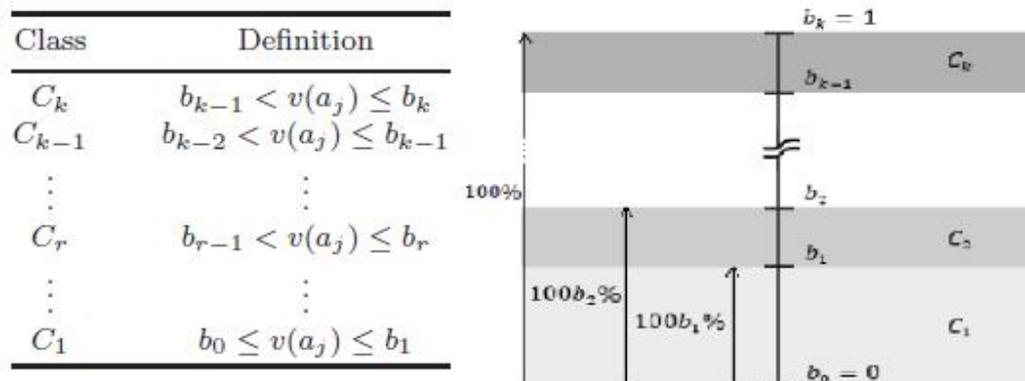
$$\begin{aligned} v_i(X_i'')k_i &< k_{i+1}, \\ v_i(X_i')k_i &> k_{i+1}. \end{aligned}$$

Portanto, à medida que o intervalo é estreitado, o espaço de pesos, que contém os valores que os pesos podem assumir, também é reduzido.

De acordo com Frej et al. (2020) as perguntas feitas na utilizacão do FITradeoff são construídas usando a consequência X_i valores que dependem de (X_i'', X_i') , seguindo assim um padrão fixo para evitar inconsistências.

O método FITradeoff para problemática de classificacão faz uso de valores de fronteira, ou seja, limites inferior e superior denotados por b_r que limitam as classes consecutivas de problemas. A Figura 4 mostra a definicão de cada classe de acordo com os valores de b_r , em que $b_k = 1 > b_{k-1} > \dots > b_1 > b_0 = 0$, $C_k > C_{k-1} > \dots > C_1$ e $v(a_j)$ representam o valor global de uma alternativa $a_j \in A$ (Frej, et al., 2020).

Figura 4 - Definição de classe e valores de limite.



Fonte: Adaptado de Frej et al. (2020)

Frej et al. (2020) diz que, os valores de b_r devem ser estabelecidos de forma que cada alternativa seja atribuída a uma classe. Para estabelecer esses valores, o decisor pode pensar em termos de percentagens do intervalo 0-1, conforme mostrado na Figura 4. Neste intervalo, 0 e 1 representam, respectivamente, a pior e a melhor pontuação geral que uma alternativa pode ter.

Depois de obter os valores máximo e mínimo de $v(a_j)$ utilizando PPL, uma regra de ordenação é aplicada para decidir se deve ou não atribuir cada alternativa a_j em uma classe. A regra de decisão é apresentada na Figura 5:

Figura 5 - Regra de decisão.

```

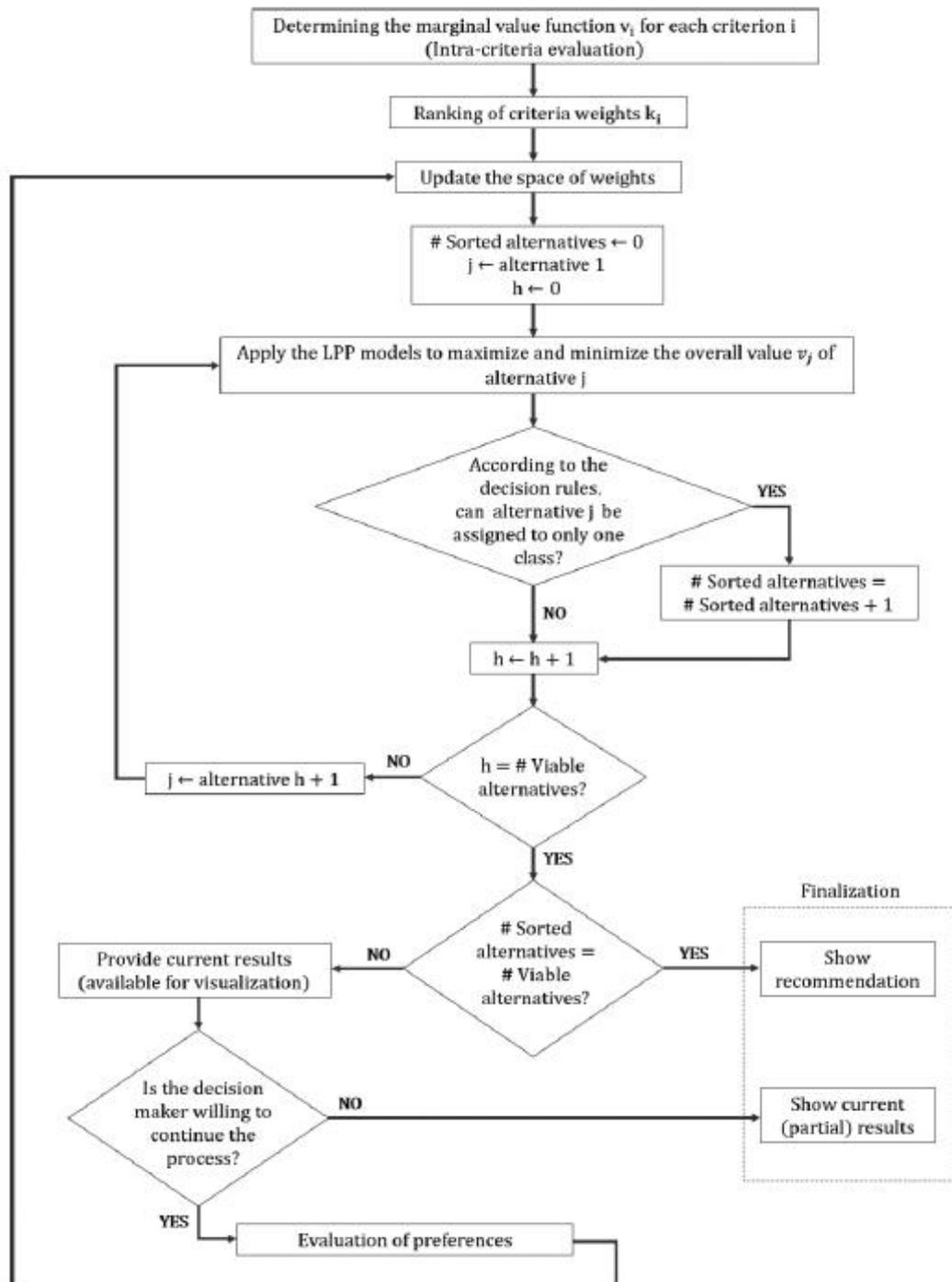
IF  $s_1 > b_{k-1}$  AND  $s_2 \leq b_k$  THEN  $a_j \rightarrow C_k$ 
ELSE
  IF  $s_1 > b_{k-2}$  AND  $s_2 \leq b_{k-1}$  THEN  $a_j \rightarrow C_{k-1}$ 
  ELSE
    ...
    ELSE
      IF  $s_1 \geq b_0$  AND  $s_2 \leq b_1$  THEN  $a_j \rightarrow C_1$ .
      ELSE

```

Fonte: Frej et al. (2020)

Quando o decisor responde a uma pergunta durante o processo de elicitacão flexível, o espaço de pesos é atualizado, alterando assim algumas das restries. Se algumas alternativas ainda não foram ordenadas, o decisor pode dar mais informaes sobre suas preferências para classificá-las em uma das classes pré-definidas. Essas alternativas que ainda não foram atribuídas a uma única classe são doravante nomeadas como alternativas viáveis (Frej et al., 2020).

Figura 6 - Processo de elicitação flexível para problemas de classificação.



Fonte: Frej et al. (2020)

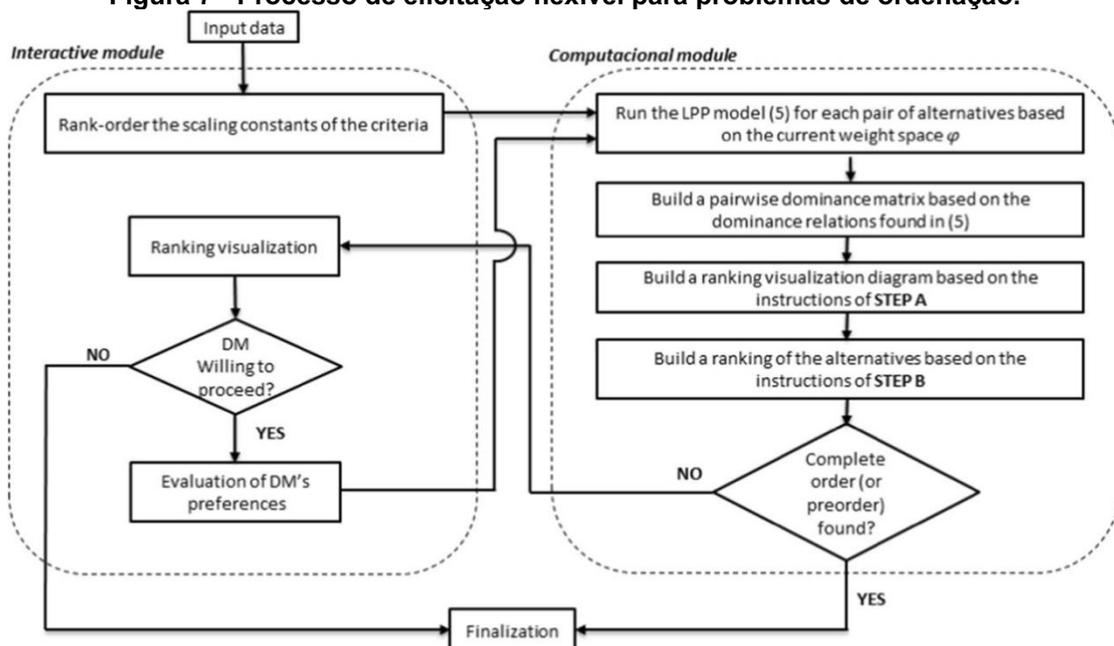
O fluxograma da Figura 6 demonstra o processo lógico passo a passo da aplicação do processo de elicitação flexível do método FITradeoff para problemáticas de classificação. Com isso, o método mostra ser útil para aplicação e análise rápidas devido a sua simplicidade.

2.4.1.2 FITradeoff para problemática de ordenação

Segundo Frej et al. (2019), a problemática de ordenação consiste em alocar alternativas em ordem crescente de preferência, baseado em uma estrutura de preferências. Ao contrário do que acontece em modelos aditivos com informações completas em que um único vetor de pesos é obtido ao final do processo para avaliar as alternativas, no FITradeoff um espaço de pesos é obtido no final do processo para que tenha um conjunto de vetores de pesos para o qual a alternativa escolhida seja a melhor. Mas, quanto ao problema de ordenação, pode acontecer diferentes vetores de pesos que resultem em diferentes ordens finais das alternativas, mesmo que todas resultem na mesma alternativa para o primeiro lugar do *ranking*.

Portanto, surge a necessidade de verificar as relações de dominância entre alternativas para o nível atual das informações parciais obtidas, a fim de construir um *ranking* parcial ou completo, de acordo com as informações obtidas do decisor. Na problemática de ordenação as alternativas são comparadas entre si, as relações de preferência são verificadas e o conceito de potencial otimalidade não é suficiente para realizar a análise. Logo, um modelo PPL é aplicado para cada par de alternativas, verificando as relações de dominância par a par a cada iteração (Frej et al., 2019).

Figura 7 - Processo de elicitación flexível para problemas de ordenação.



Fonte: Frej et al. (2019)

O fluxograma da Figura 7 apresenta o processo lógico passo a passo da aplicação do processo de elicitação flexível do método FITradeoff para problemáticas de ordenação. Assim como o método FITradeoff Classificação, o FITradeoff Ordenação também mostra-se útil para aplicação e análise rápidas.

2.5 Análise de Criticidade e Priorização de ativos em Manutenção - abordagens

A análise de criticidade é uma abordagem que avalia os potenciais riscos e suas consequências para a produção. Ao reconhecer os ativos críticos, fica mais fácil para a equipe de manutenção saber onde deve ser investido, os maiores esforços e investimentos, sendo possível a criação de novas estratégias de manutenção.

Para a análise da criticidade dos ativos, existem vários métodos que podem ser utilizados e auxiliam nessa atividade, a análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA) e o modelo *quali-quant* serão apresentados a seguir.

2.5.1 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

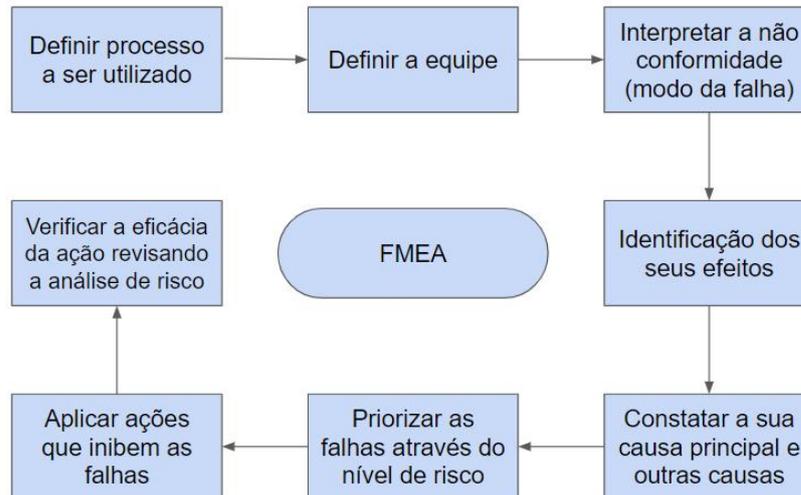
A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) é um método para auxiliar na confiabilidade de processos, através de classificações hierárquicas e prevenção de falhas potenciais. O objetivo do FMEA é detectar, demarcar e traçar, utilizando uma abordagem sistemática, os modos de falhas gerados em processos e suas causas e efeitos. O FMEA foi criado e tem sido aplicado na engenharia de produtos e/ou processos para mitigar falhas com o intuito de entender quais riscos um desses pode estar suscetível, segundo Tondin et al. (2017)

Atualmente o FMEA vem sendo muito aplicado com MCDM, para apontar falhas que oferecem maiores potenciais de risco levando em consideração o contexto com critérios e pesos definidos pelo decisor. No ambiente industrial inúmeros objetos podem sofrer falhas e então, o FMEA compreende a etapa de análise da falha e identificação do causador, ou seja, a raiz da falha, como explica Sharma; Srivastava (2018).

O FMEA é de grande utilidade para identificar problemas em um processo visando sua confiabilidade como resultado da análise do processo Sharma; Srivastava (2018). Esta análise auxilia a aumentar o conhecimento dos processos e ocorrência de falhas durante o projeto, assegurando que os resultados dessas falhas

não causem prejuízos. Segundo Menezes (2020), o FMEA é composto por inúmeras ações em sequência, e essa estrutura de etapas é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Sequência conceitual de etapas para aplicação do FMEA.



Fonte: Adaptado de Strickler et al. (2020)

Na literatura, o FMEA é visto como um método de avaliação de riscos, sendo necessário obter dados do problema para ter uma base para a tomada de decisão. O FMEA gera um *ranking* de acordo com os critérios definidos e uma nota que avalia o risco da falha ocorrer para cada alternativa, de acordo com Menezes (2020).

2.5.2 Árvore de Decisão

Árvores de decisão utilizam conceitos de inteligência artificial (IA) e de estatística para aprenderem a partir de um conjunto de dados. Tal conjunto é constituído de uma série de subconjuntos, definidos por atributos ou características. Os atributos são as variáveis dependentes e independentes, com domínio contínuo, discreto ou categórico.

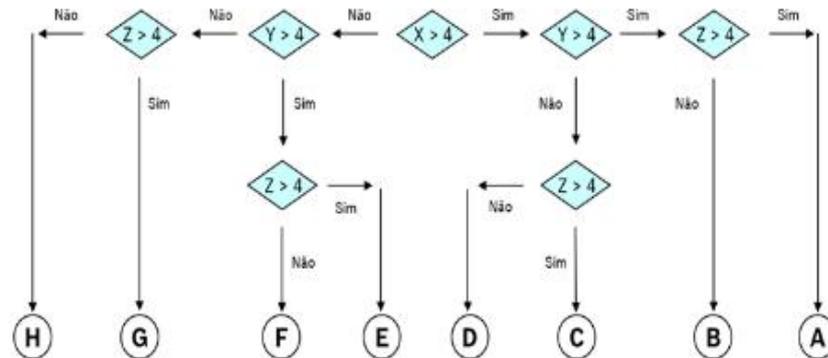
Devido à sua versatilidade, a árvore de decisão é um importante algoritmo de *machine learning* que se destaca pela sua estrutura visual, muito parecida com a composição de um fluxograma. Essa ferramenta inicia-se com um nó que se ramifica em possíveis soluções, e cada um desses resultados se decompõe em outras diversas possibilidades.

Em resumo, é um mapa dos possíveis resultados de uma série de escolhas relacionadas. Além disso, permite que seja realizada a comparação entre possíveis

ações com base em seus benefícios, probabilidades e custos e serve para mapear um algoritmo para prever matematicamente uma melhor escolha.

Na planilha base da empresa em estudo, é possível observar o detalhamento dessa árvore de decisão, representada nas Figuras 9 e 10.

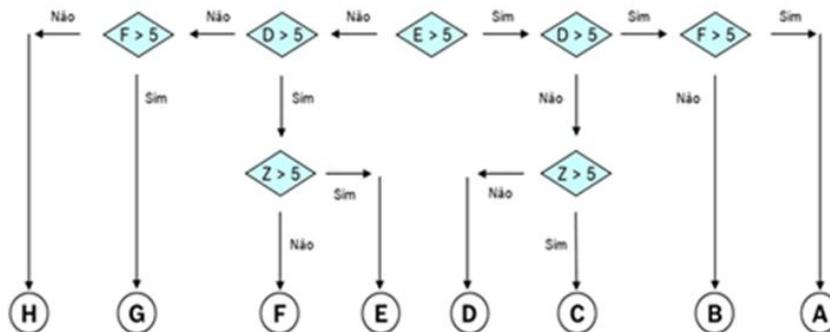
Figura 9 - Classificação da Chave de Avaliação na Categoria de Prioridade.



Fonte: Empresa do estudo de caso (2019).

Nota-se que existem três tipos de nós: nó de probabilidade, representado por um círculo; nó de decisão, representado por um losango; e por fim, nó de término.

Figura 10 - Classificação da Chave de Avaliação na Categoria de Falha.



Categoria de Falha

Chave
E = Efeito no sistema de operação
F = Previsibilidade da falha
D = Frequência da falha

Fonte: Empresa do estudo de caso (2019)

O nó de probabilidade mostra as probabilidades de certos resultados e o nó de decisão mostra uma decisão a ser tomada. Já o nó de término mostra o resultado final de um caminho de decisão.

2.5.3 Modelo *quali-quant* MMAD

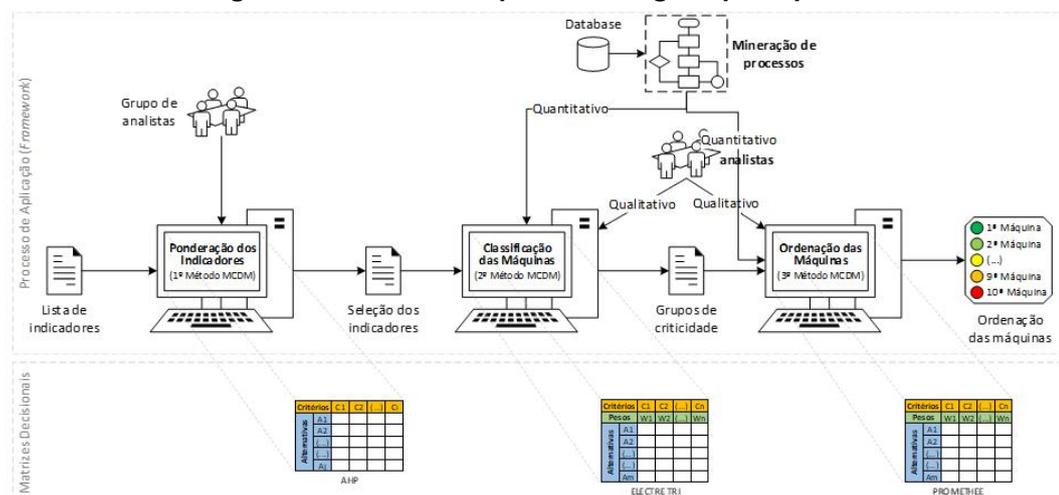
Outra forma de abordagem que pode auxiliar na avaliação de risco, é o modelo *quali-quant* abordado em Santos (2019). Essa é uma forma de tomada de decisão que considera o conhecimento humano (experiência) assim como o conhecimento oriundo do processo (comportamento do sistema). As decisões impactam na seleção dos componentes ou máquinas para aplicação dos procedimentos relacionados com a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).

O trabalho apresentado por Santos (2019) teve como objetivo classificar e ordenar os itens do sistema por ordem de criticidade com o auxílio dos métodos multicritérios para tomada de decisão (AHP, ELECTRE e PROMETHEE) e das técnicas de mineração de processos (utilizadas para extrair conhecimento do *log* de eventos com foco na análise comportamental do processo e coleta das medidas para cálculo das métricas de desempenho).

A pesquisa apresenta um *framework* que ilustra os procedimentos aplicados na integração das ferramentas, que foram testadas e validadas por meio da simulação e avaliação de um modelo discreto e controlado. Na Figura 11 é mostrado o *framework* utilizado, mostrando os atores e/ou fontes informacionais envolvidas em todo o processo e exibindo as matrizes decisoriais utilizadas para a ordenação dos equipamentos por ordem de criticidade.

Quando um sistema admite que avaliações qualitativas e quantitativas sejam executadas durante as análises, as escolhas, no geral, tendem a ser mais assertivas e adequadas ao processo (SANTOS, 2019).

Figura 11 - Framework para abordagem *quali-quant*.



Fonte: Santos (2019)

Para a aplicação do primeiro método multicritério para seleção e ponderação dos indicadores, é utilizada uma lista de indicadores disponíveis para escolha. Uma vez que os MPI's (*Maintenance Performance Indicator*) estejam escolhidos, estes são utilizados como critérios no(s) próximo(s) método(s) multicritério(s), sendo esta etapa responsável por classificar e ordenar os equipamentos em relação à criticidade. Os indicadores quantitativos são obtidos por meio de técnicas de mineração de processos e/ou estatísticas e os indicadores qualitativos através de entrevistas e/ou questionários com o usuário e/ou grupo de analistas. Logo, um método que se encaixa nessa etapa é o AHP, pois além da facilidade de implantação, utilização e análise, esta técnica fornece a saída do modelo ordenada em opções, atribuindo um valor numérico a cada uma. Esses valores são utilizados como peso no(s) próximo(s) método(s) multicritério(s).

Com os indicadores escolhidos, a próxima etapa é coletar as métricas do processo e inseri-las na matriz decisional para agrupamento das máquinas com maior criticidade. Essa etapa é essencial somente quando a quantidade de elementos no sistema sob análise é grande. Logo, no contexto apresentado, o método ELECTRE apresenta essa característica de ordenação e classificação das alternativas em relação aos critérios pré-definidos.

Em seguida, uma análise é executada para avaliar e elencar quais as opções mais críticas no sistema, com a finalidade de obter o ranqueamento final das máquinas. Assim, o grupo da MCC atribui os valores medidos (quantitativos) e/ou opiniões (qualitativos) aos indicadores definidos pelo grupo de analistas, visando a confiabilidade dos componentes, das máquinas e do sistema. Por fim, para obter a ordenação final dos equipamentos em relação aos critérios e valores informados, é utilizado o método PROMETHEE.

2.6 Síntese e conclusão do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado um levantamento teórico para melhor entendimento do objetivo do trabalho: utilização do método FITradeoff para classificação e ordenação de ativos em relação à criticidade, baseando-se no *framework* apresentado por Santos (2019). Também foi abordado temas relacionados ao setor de manutenção, onde é possível notar que as possibilidades de melhoria nos processos são eminentes, focando na seleção da melhor estratégia de manutenção.

Para que as decisões sejam assertivas e otimizem os recursos envolvidos, foi utilizado uma visão que converge para criticidade através de ferramentas clássicas como FMEA e árvore de decisão. Além disso, o *framework* base destaca a conciliação *quali-quantitativa* e a proposta de uma avaliação dinâmica. Tais procedimentos são de extrema importância, visto que qualquer ação indevida pode acarretar em um desperdício de tempo e recurso, ou até mesmo a quebra de uma máquina essencial no processo.

Observa-se a importância dos métodos multicritérios no auxílio das tomadas de decisões em um sistema, visto que esses fornecem as análises de dados que contribuem para que sejam feitas as escolhas corretas. Entretanto, a ponderação dos pesos dos critérios pode ser algo difícil e complexo para o decisor. Dessa forma, ao utilizar o método FITradeoff, o decisor se beneficia com perguntas mais fáceis de responder, além da redução no número de perguntas a serem respondidas.

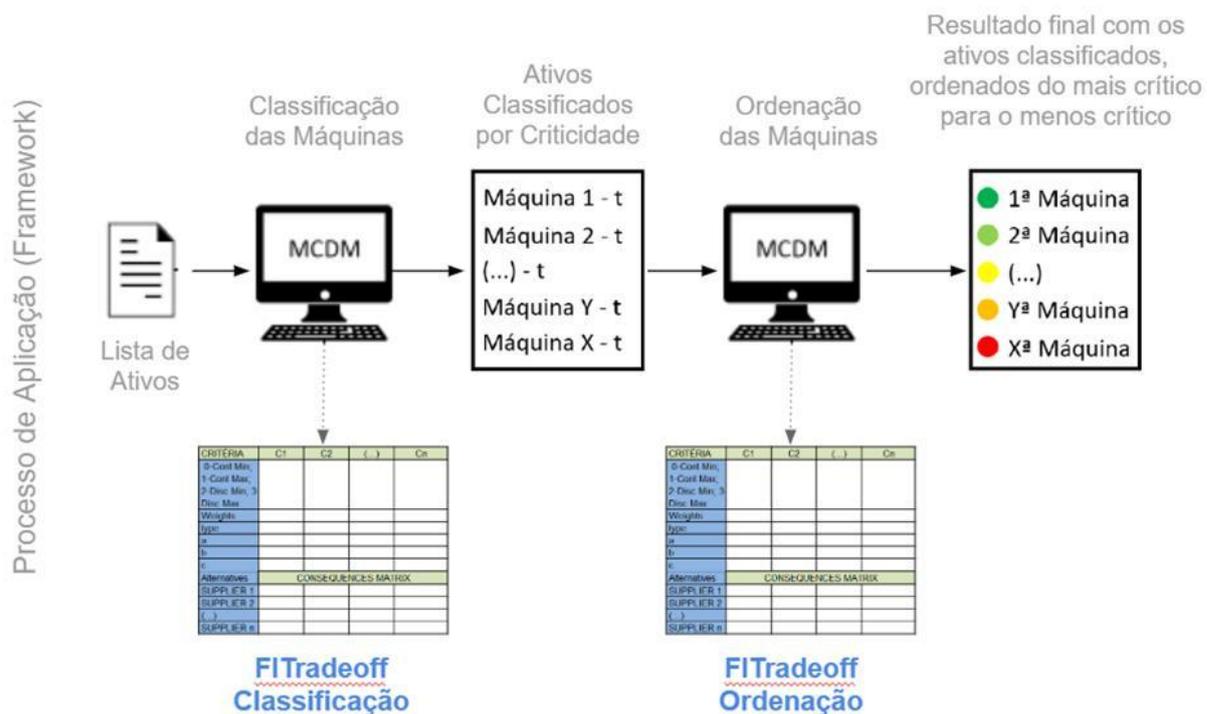
Na sequência, será apresentado o *framework* geral do processo de aplicação do método FITradeoff, para a obtenção de uma estratégia de manutenção adequada, com ênfase na classificação e ordenação dos ativos à luz da criticidade. Em resumo, este trabalho pretende amplificar a visão da manutenção industrial através do método multicritério FITradeoff, que utiliza a informação parcial para auxiliar e simplificar a classificação e ordenamento dos ativos mais críticos.

3. FRAMEWORK GERAL DO PROCESSO DE APLICAÇÃO

Como abordado nos capítulos anteriores, uma estratégia de manutenção adequada leva em consideração diversos aspectos que devem ser analisados, além das ferramentas e métodos que auxiliam na decisão.

A Figura 12 apresenta o *framework* da aplicação do método multicritério de apoio à decisão, de forma a evidenciar uma estratégia adequada para a avaliação da criticidade dos ativos. Este *framework* contempla duas grandes etapas principais, sendo elas: a classificação dos ativos e a ordenação à luz da criticidade. Ambas as etapas serão realizadas por meio do método multicritério de apoio a tomada de decisão com informação parcial FITradeoff.

Figura 12 - *Framework* de avaliação de criticidade de ativos



Fonte: Adaptado de Santos (2019)

A classificação das máquinas inicia-se a partir de uma lista de ativos, separados em setores, e de indicadores, com os valores limites predefinidos para cada classe pelo *Decision Maker* (DM), para que o software FITradeoff possa classificar os ativos a partir das respostas com a execução da programação linear. Em seguida, o DM responderá questões sobre a preferência par a par dos critérios até o *software* fornecer o resultado. Após a obtenção do resultado pelo *software*,

este será utilizado como entrada para o método multicritério de apoio à tomada de decisão com informação parcial para a problemática de ordenação.

Nesta etapa de ordenação, o processo inicia-se a partir da lista das máquinas classificadas. O processo de responder questões sobre a preferência par a par dos critérios é similar à etapa de classificação e, após algumas respostas, os ativos começam a ser ordenados. Finalizando esse processo, o FITradeoff disponibiliza o ranqueamento dos ativos de acordo com o nível de criticidade, do mais crítico para o menos crítico. O resultado também pode ser visualizado em um Diagrama de Hasse.

3.1 Síntese e conclusão do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o *framework* de avaliação de criticidade de ativos para aplicação dos métodos FITradeoff Classificação e Ordenação. A elaboração do *framework* é de extrema importância para o desenvolvimento do trabalho proposto, visto que garante qualidade no projeto e aumenta a produtividade.

O passo a passo e os detalhes do *framework* ficarão mais claros no próximo tópico, o *case* de aplicação. Nesse *case*, foram realizadas simulações, seguindo o *framework*, para obter a priorização das máquinas de uma empresa de acordo com a criticidade.

4. CASE DE APLICAÇÃO

O case de aplicação tem objetivo de analisar os ativos de uma multinacional do setor de engenharia e tecnologia, utilizando os procedimentos e conceitos abordados nos capítulos anteriores, a fim de encontrar as melhores estratégias para a manutenção preventiva, obtendo como resultado o ranqueamento das máquinas de acordo com o nível de criticidade.

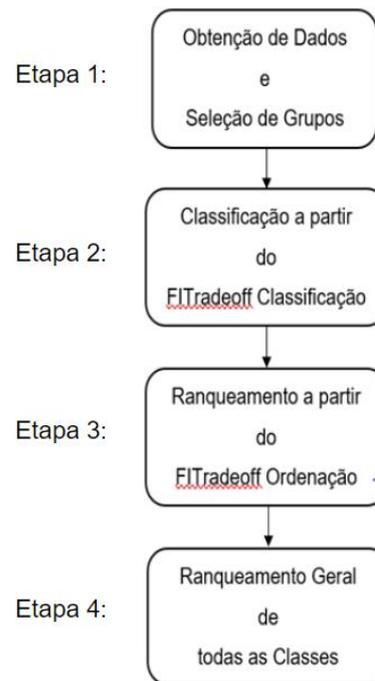
Em concordância com o *framework* apresentado neste trabalho, este capítulo visa demonstrar as etapas de aplicação necessárias para implantação do FITradeoff para problemática de classificação e ordenação.

4.1 Priorização dos ativos

Primeiramente, na etapa 1 é feita a obtenção dos dados dos ativos para a realização da priorização dos mesmos, a fim de identificar e ranquear essas máquinas, visto que em um grupo de máquinas é possível diferenciar aquelas que são mais críticas do que as outras.

Em seguida, com os dados em mãos, é realizada a análise desses dados e a escolha dos grupos de ativos da empresa que serão avaliados neste estudo. Com isso, na etapa 2 e 3 os métodos FITradeoff classificação e ordenação são aplicados para obtenção das classes e do ranqueamento dos ativos de acordo com a criticidade. Por fim, na etapa 4 é obtida o ranqueamento geral de todas as classes.

Figura 13 - Fluxograma das etapas de aplicação.



Fonte: Os autores (2022)

A Figura 13 representa a execução do *framework* proposto (Figura 12). Cada uma dessas etapas são abordadas a seguir, separadas em sub tópicos com detalhes aprofundados para melhor entendimento.

4.1.1 Obtenção dos dados

Os dados da empresa para esse estudo foram obtidos através de reuniões remotas com o professor orientador e o coorientador. Toda a base de dados foi armazenada e organizada em uma planilha do excel.

A planilha ficou composta por 1043 ativos, estes organizados em duas categorias, categoria prioridade e categoria falha, resultando em 5 critérios. A Tabela 1 apresenta os critérios utilizados para a avaliação.

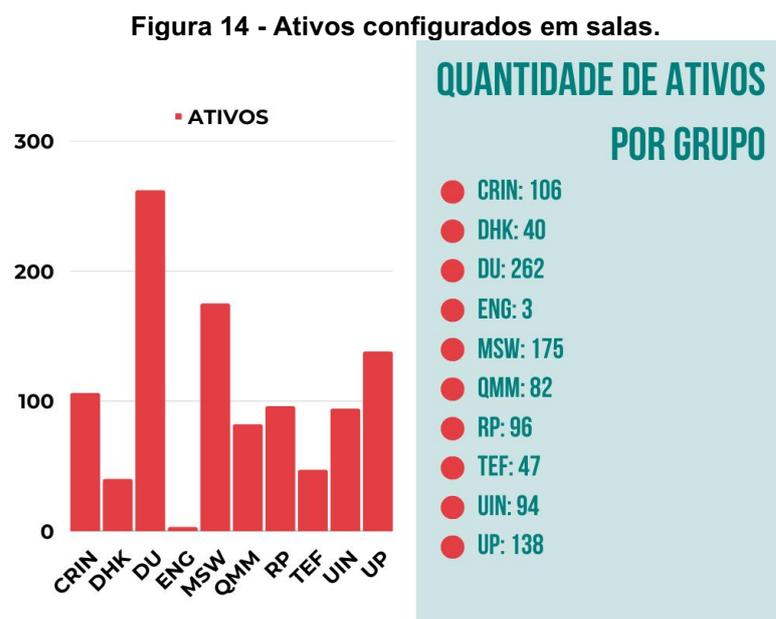
Tabela 1 - Critérios divididos em categorias.

CRITÉRIOS	
CATEGORIA PRIORIDADE	CATEGORIA FALHA
Redundância	Prever falha
Tempo máximo de reparo	MTTR
	MTBF

Fonte: Os autores (2022)

A categorização fornecida, baseia-se nestes cinco critérios, onde as duas primeiras representam a categoria prioridade e as três últimas a categoria falha. São eles:

- Redundância: critério que mantém um sistema com processos duplicados ou triplicados para garantir a disponibilidade de processos e equipamentos críticos;
- Tempo máximo para Reparo: critério do sistema que apresenta o tempo máximo de reparo para não afetar a produção;
- Prever Falha: diz respeito à facilidade de prever e atuar numa falha;
- MTTR: do inglês *“Mean Time to Repair”*, representa o tempo médio necessário para reparar um equipamento com falha;
- MTBF: do inglês, *“Mean Time Between Failures”*, é a métrica que se refere à média de tempo decorrente entre uma falha e outra.



Fonte: Os autores (2022)

Na planilha, os ativos também foram separados em Salas para uma melhor organização e uma classificação conforme a produção, totalizando um total de 10 salas, onde cada sala é composta por máquinas que produzem o mesmo tipo de produto. A classificação é apresentada na Figura 14.

4.1.2 Análise e seleção dos grupos para priorização dos ativos

Para a seleção dos grupos, com o intuito de avaliar a aplicabilidade do *framework* e ter uma melhor percepção dos resultados de análise de criticidade, optou-se por escolher 3 salas das 10 existentes para o processo de análise dos ativos: DHK, UIN e TEF, totalizando 181 máquinas.

Figura 15 - Quantidade de máquinas das salas selecionadas.



Fonte: Os autores (2022)

A Figura 15 representa as salas selecionadas com seus respectivos ativos. Essas salas foram escolhidas para totalizarem no máximo 200 ativos.

4.1.3 Classificação dos ativos pelo FITradeoff Classificação

Para o estudo em questão foi utilizado o Sistema de Apoio à Decisão “FITradeoff – *Flexible and Interactive Tradeoff Elicitation for Sorting with Additive Model*”, que possui como base o método FITradeoff com informações parciais do decisor, é um software voltado para problemas de decisão multicritério na problemática de Classificação, considerando funções de valores marginais lineares para todos os critérios.

Para a manipulação do Sistema de Apoio à Decisão do FITradeoff para problemática de classificação, é necessário que o DM especifique os perfis dos ativos, com base no modelo aditivo, tais que seja possível definir e diferenciar as categorias nas quais as máquinas serão classificadas. Por ser uma classificação

ordinal, os ativos serão classificados a partir das máquinas menos críticas para as máquinas mais críticas, conforme a classificação proposta neste trabalho, concluindo, desta forma, a primeira etapa do processo de aplicação do *framework* proposto.

Tabela 2 - Tipos de critério.

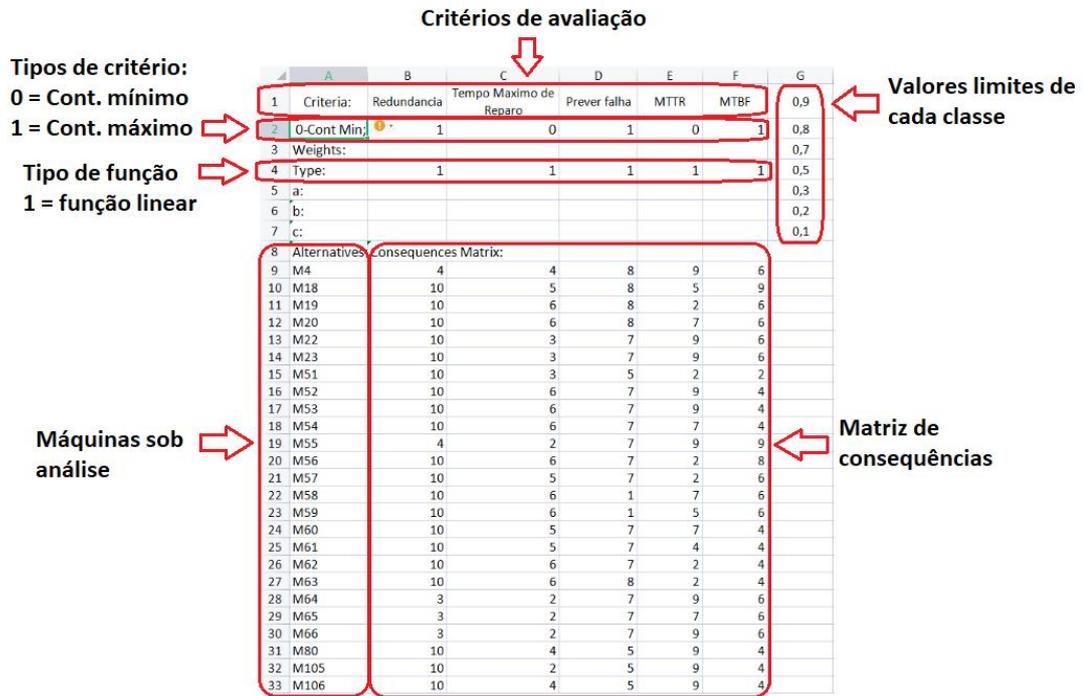
Código	Tipo do critério
0	Contínuo mínimo
1	Contínuo máximo
2	Discreto mínimo
3	Discreto máximo

Fonte: Os autores (2022)

Os perfis dos ativos foram informados na planilha de *input*, de acordo com a Figura 16. A linha um da planilha seleciona os critérios para a avaliação. A linha dois indica qual o tipo do critério, conforme Tabela 2. A linha três indica os pesos dos critérios, porém não é necessário informar os valores por se tratar de um método de informação parcial. A linha quatro determina o tipo de função dos critérios, no entanto somente a função do tipo linear está disponível, representada pelo código 1. Por fim, a partir da linha 9 são as máquinas com a matriz de consequências.

Em relação às colunas, na coluna “A” são apresentadas as alternativas a serem classificadas. Da coluna “B” à “F”, são representados os critérios utilizados para a avaliação, como vistos na tabela 4. Por fim, a coluna “G” identifica os valores dos perfis das categorias.

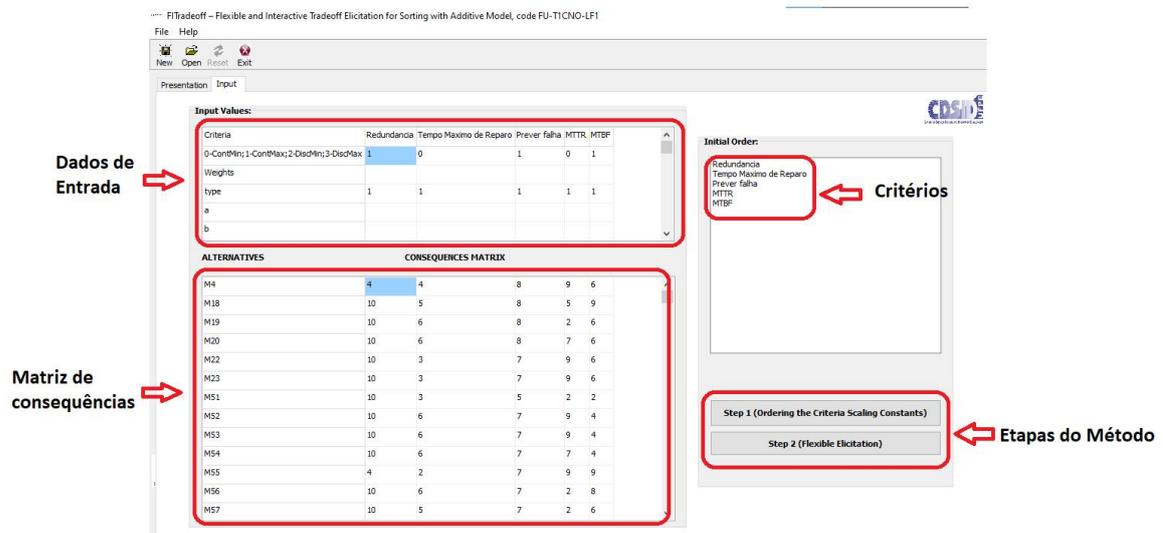
Figura 16 - Planilha padrão do Excel para problemática de classificação utilizada nesse estudo.



Fonte: Os autores (2022)

A Figura 17 retrata a tela do FITradeoff, nela é apresentada a base de dados importados da planilha do Excel e as etapas que serão executadas nesse método. A primeira etapa define a ordem dos critérios para a classificação dos ativos, de acordo com a prioridade que serão aplicados no Método FITradeoff, e a segunda etapa é o processo flexível de elicitação realizada pelo DM.

Figura 17 - Layout do software FITradeoff para classificação.



Fonte: Os autores (2022)

Na primeira etapa, para a ponderação dos critérios, utilizou-se a ordem de escolha definida em Pacheco (2020), visto que a empresa em estudo é a mesma nos dois trabalhos de conclusão de curso, que são orientados pelo professor Eduardo de Freitas Rocha Loures. No trabalho de Pacheco (2020), os especialistas e analistas da empresa utilizaram o método multicritério de apoio à tomada de decisão AHP, usando, na execução desse método, o *software Super Decisions*. Como resultado, obteve-se a seguinte ordem dos critérios: 1 - Tempo máximo de reparo; 2 - MTBF; 3 - Prever Falha; 4 - Redundância; 5 - MTTR. Essa ponderação é inserida no FITradeoff, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Etapa 1: Ponderações dos critério.

BEST: Melhor cenário para o critério
WORST: Pior cenário para o critério

Ordem de preferência entre os critérios definida

Chosen Order:

1. C2 - Tempo Máximo de Reparo
2. C5 - MTBF
3. C3 - Prever Falha
4. C1 - Redundância
5. C4 - MTTR

Prosseguir para a próxima etapa

Fonte: Os autores (2022)

Na segunda etapa, o DM responde perguntas que executam a comparação par a par dos critérios, como mostra a Figura 19. As perguntas são respondidas até que o resultado seja satisfatório e, para aplicação do caso, foram respondidas no total 20 questões, para que todas as máquinas fossem classificadas em um grupo. Os grupos são classificados de acordo com o seu nível de criticidade, sendo o Grupo 8 o mais crítico e o Grupo 1 o menos crítico.

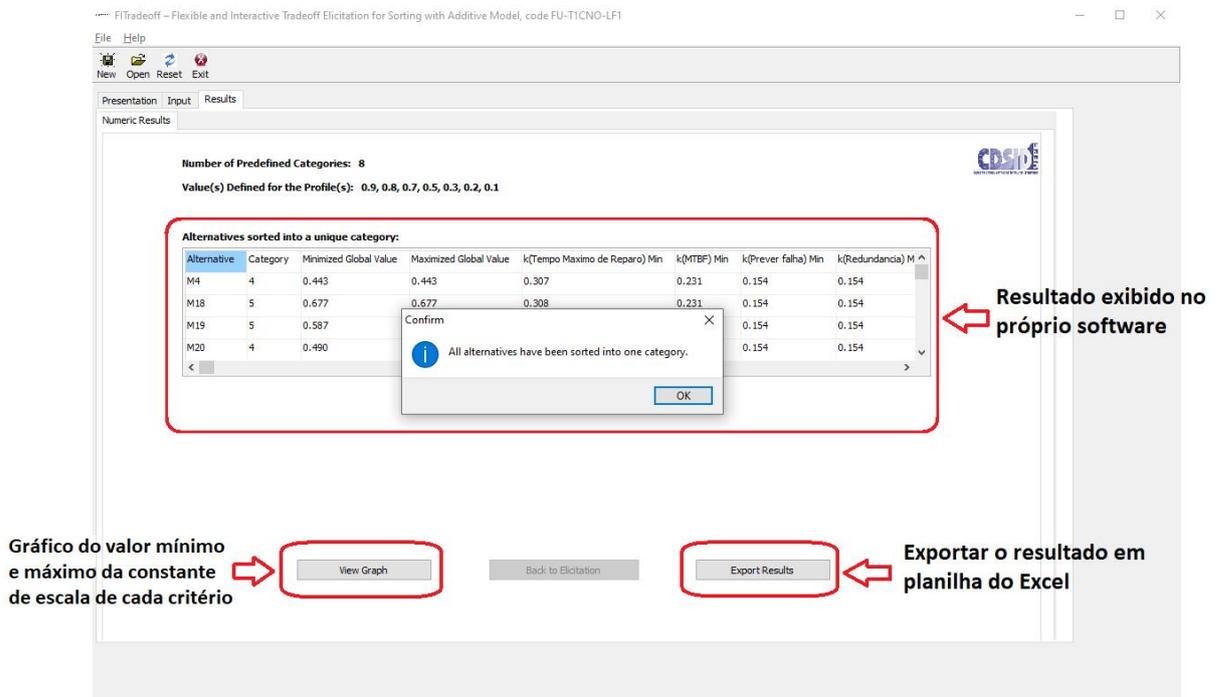
Figura 19 - Etapa 2: Perguntas para a comparação par a par dos critérios.



Fonte: Os autores (2022)

Assim que todas as máquinas foram distribuídas em um único grupo, o resultado   exibido, conforme Figura 20.

Figura 20 - Resultado final do método FITradeoff Classifica o.



Fonte: Os autores (2022)

A Figura 21 apresenta parcialmente a planilha exportada com os resultados do método FITradeoff Classifica o.

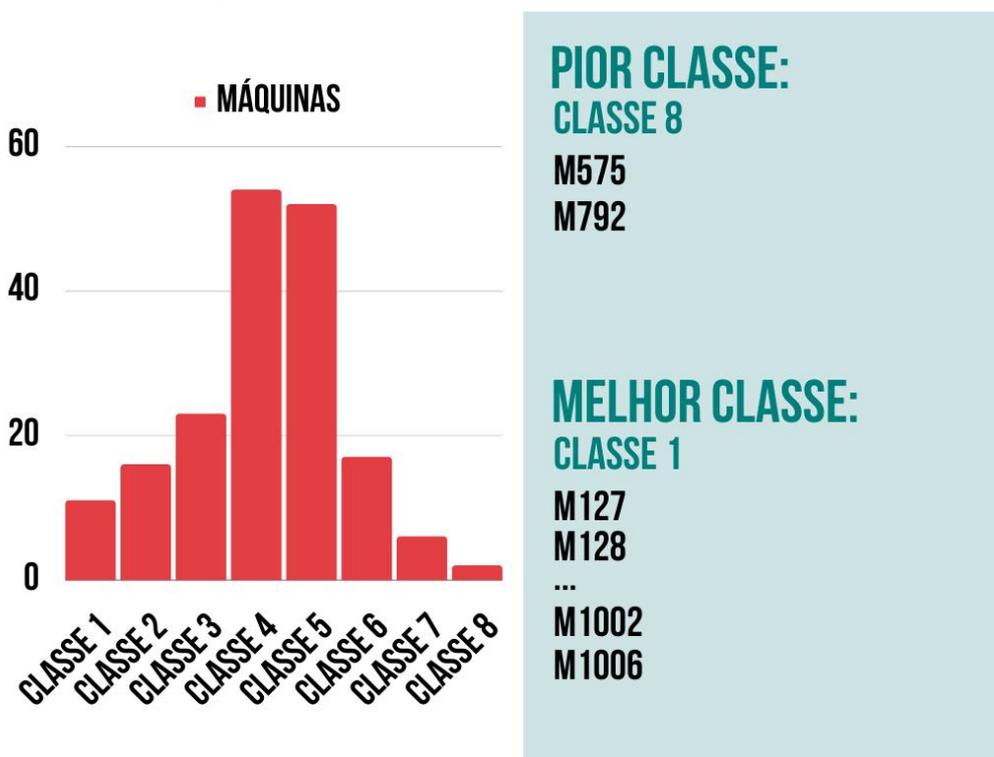
Figura 21 - Planilha exportada do FITradeoff com os resultados.

Alternative	Category	Minimized	Maximized	k(Tempo)	k(MTBF)	k(Prever)	k(Redunda)	k(MTTR)	Max
M4	4	0,474	0,475	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667
M18	4	0,467	0,47	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M19	3	0,208	0,214	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M20	3	0,208	0,213	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M22	5	0,608	0,608	0,667	0,333	0	0	0	0,662
M23	5	0,608	0,608	0,667	0,333	0	0	0	0,662
M51	4	0,442	0,445	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M52	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,662
M53	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,662
M54	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M55	7	0,863	0,867	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667
M56	3	0,292	0,296	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M57	4	0,342	0,346	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M58	3	0,208	0,21	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M59	3	0,208	0,211	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M60	3	0,258	0,262	0,667	0,333	0	0	0	0,662
M61	3	0,258	0,263	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M62	2	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M63	2	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661
M64	6	0,738	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667
M65	6	0,739	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667
M66	6	0,738	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667

Fonte: Os autores (2022)

Os resultados mostram que os 181 ativos foram classificados em 8 grupos, onde a Figura 22 indica a quantidade de ativos por grupo, além de apresentar as máquinas da melhor e pior classe.

Figura 22 - Quantidade de máquinas por classes.



Fonte: Os autores (2022).

Após a análise dos resultados, chegou-se à conclusão que foram encontrados 11 ativos menos críticos, fazendo parte da Classe 1. A próxima classe menos crítica, Classe 2, é composta por 16 máquinas. E as máquinas mais críticas fazem parte da Classe 8, sendo elas: M575 e M792.

Tabela 3 - Máquinas das classes menos críticas e mais críticas.

Alternat	Categori	Minim	Maxim	k(Tempo)	k(MTBI)	k(Previ)	k(Redu)	k(MTTT)	k(Temp)	k(MTBI)	k(Previ)	k(Redu)	k(MTTT)	Max
M127	1	0,042	0,049	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M128	1	0,042	0,049	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M142	1	0,042	0,047	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M143	1	0	0,006	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M183	1	0	0,007	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M223	1	0	0,006	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M582	1	0	0,007	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M587	1	0,042	0,046	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M844	1	0	0,004	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M1002	1	0	0,005	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M1006	1	0	0,007	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M52	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	
M53	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	
M54	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M62	2	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M63	2	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M121	2	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M122	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M173	2	0,133	0,137	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M181	2	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M576	2	0,133	0,135	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M577	2	0,133	0,135	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M578	2	0,133	0,135	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M583	2	0,133	0,137	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M584	2	0,133	0,137	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M588	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M641	2	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	
M575	8	0,955	0,958	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0	
M792	8	0,996	1	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0	

Primeira classe menos crítica	
Segunda classe menos crítica	
Classe mais crítica	

Fonte: Os autores (2022).

A Tabela 3 representa esse ranqueamento parcial. A Classe 1 está representada pela cor verde, a Classe 2 pela cor amarela e a Classe 8, que é a mais crítica, está representada pela cor laranja.

4.1.4 Ranqueamento dos ativos pelo FITradeoff Ordenação

Para o ranqueamento dos ativos em estudo, foi utilizado o Sistema de Apoio à Decisão “FITradeoff – *Flexible and Interactive Tradeoff Elicitation for Ranking with Additive Model*”, que possui como base o método FITradeoff com informações parciais do decisor. O *software* é voltado para problemas de decisão multicritério na

problemática de Ordenação, considerando funções de valores marginais lineares para todos os critérios.

Após a primeira etapa do *framework*, onde foram classificados os ativos a partir do FITradeoff Classificação, obteve-se o resultado dela como *input* para iniciar a segunda etapa. A segunda etapa trata-se do ranqueamento das máquinas para determinar a ordem dos ativos de acordo com o seu nível de criticidade.

A segunda etapa será realizada em duas partes: a primeira é o ranqueamento das máquinas mais críticas entre os ativos de mesma classe; e a segunda parte é o ranqueamento de criticidade geral das máquinas entre os 5 ativos mais críticos de cada uma das 8 classes, para obtenção do ranqueamento global.

Para a implementação do método, foi utilizado o mesmo modelo da planilha de *input*, que foi detalhada e utilizada na etapa de classificação. Porém, os valores que definem os perfis das classes serão excluídos da planilha (coluna "G"), como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Planilha padrão do Excel para problemática de ordenação utilizada nesse estudo.

		Critério de avaliação					
		A	B	C	D	E	F
	1	Criteria:	Redundanci	Tempo Max	Prever falha	MTTR	MTBF
	2	0-Cont Mi	1	0	1	0	1
	3	Weights:					
	4	Type:	1	1	1	1	1
	5	a:					
	6	b:					
	7	c:					
	8	Alternative Consequences Matrix:					
	9	M4	4	4	8	9	6
	10	M18	10	5	8	5	9
	11	M19	10	6	8	2	6
	12	M20	10	6	8	7	6
	13	M22	10	3	7	9	6
	14	M23	10	3	7	9	6
	15	M51	10	3	5	2	2
	16	M52	10	6	7	9	4
	17	M53	10	6	7	9	4
	18	M54	10	6	7	7	4
	19	M55	4	2	7	9	9
	20	M56	10	6	7	2	8
	21	M57	10	5	7	2	6
	22	M58	10	6	1	7	6
	23	M59	10	6	1	5	6
	24	M60	10	5	7	7	4
	25	M61	10	5	7	4	4
	26	M62	10	6	7	2	4
	27	M63	10	6	8	2	4
	28	M64	3	2	7	9	6
	29	M65	3	2	7	7	6
	30	M66	3	2	7	9	6

Tipos de critério:
0=Cont. mínimo
1= Cont. máximo

Tipo de função
1 = Função linear

Máquina sob análise

Matriz de consequência

Fonte: Os autores (2022).

Primeiramente, será realizada a ordenação dos ativos de cada classe. De acordo com o resultado da primeira etapa do *framework*, todas as classes são compostas por mais de uma máquina, sendo necessária a aplicação do *software*

FITradeoff para problemática de ordenação. Para iniciar a simulação, é necessário realizar a ponderação dos critérios e em seguida responder as perguntas que fazem a comparação par a par dos critérios, mesmos processos do método de classificação, conforme mostram as Figuras 24 a 26.

A Figura 24 retrata a tela do FITradeoff Ordenação, onde é apresentada a base de dados importados da planilha do Excel e as etapas que serão executadas nesse método.

Figura 24 - Layout do software FITradeoff para ordenação.

The screenshot shows the FITradeoff software interface. The 'Input Values' section contains a table with the following data:

Criteria	Redundância	Tempo Máximo de Reparo	Prever falha	MTTR	MTBF
0-Cond/Mcu:1-Cond/Mcu:2-Disc/Mcu:3-Disc/Mcu:4	1	0	1	0	1
Weights					
type	1	1	1	1	1
a					

The 'ALTERNATIVES' section contains a consequence matrix with the following data:

ALTERNATIVES	CONSEQUENCES MATRIX
M4	4 4 8 9 6
M18	10 5 8 5 9
M19	10 6 8 2 6
M20	10 0 8 7 6
M22	10 3 7 9 6
M23	10 3 7 9 6
M31	10 3 5 2 2
M52	10 6 7 9 4
M53	10 6 7 9 4
M54	10 6 7 7 4
M55	4 2 7 9 9
M56	10 6 7 2 8

The 'Initial Order' section lists the criteria: Redundância, Tempo Máximo de Reparo, Prever falha, MTTR, MTBF.

The 'Steps of the Method' section shows two steps: Step 1 (Ordering the Criteria Scaling Constants) and Step 2 (Flexible Elicitation). The 'Value of Equivalence Distance' is set to 0.01.

Fonte: Os autores (2022).

Na Figura 25, é apresentada a ordem de preferência dos critérios, tendo como os de maiores preferências os critérios "Tempo máximo de reparo" e "MTBF". Por outro lado, os de menores preferências são "Redundância" e "MTTR".

Figura 25 - Ponderação dos critérios.



Fonte: Os autores (2022).

A Figura 26 mostra a etapa onde o DM responde perguntas que executam a comparação par a par dos critérios. As perguntas são respondidas até que o resultado seja satisfatório.

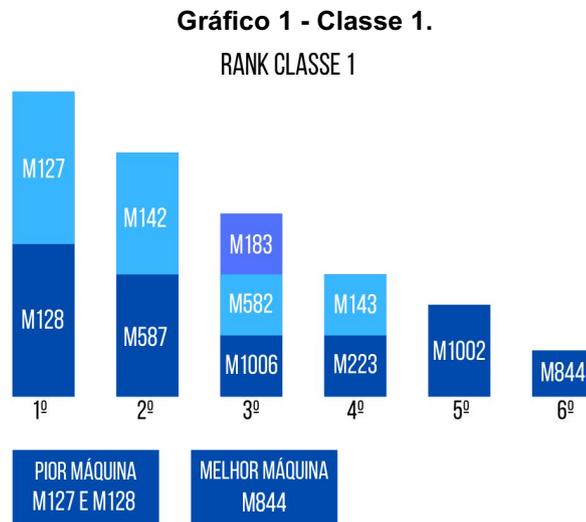
Figura 26 - Perguntas para a comparação par a par dos critérios.



Fonte: Os autores (2022).

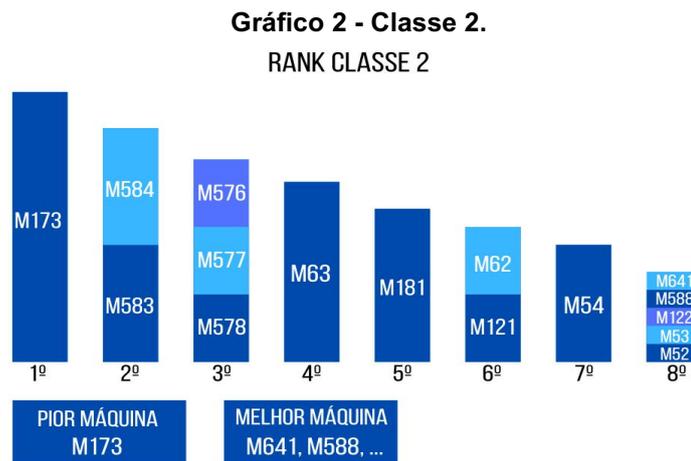
Assim que a etapa de perguntas é finalizada, o software gera o ranqueamento dos ativos que serão apresentados a seguir, iniciando pela exploração particular de cada uma das 8 classes e encerrando com a ordenação global dos ativos. Para obter o ranqueamento dos ativos da Classe 1, foram necessárias dez

respostas por parte do DM. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M127 = M128 > M142 = M587 > M183 = M582 = M1006 > M143 = M223 > M1002 > M844$. Os resultados são apresentados a seguir, no Gráfico 1.



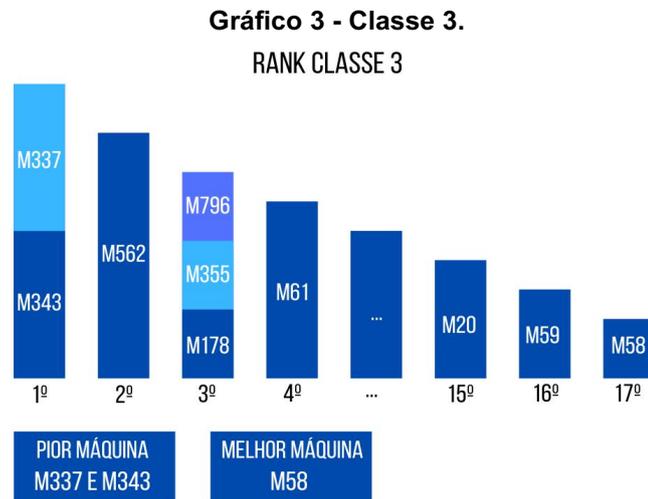
Fonte: Os autores (2022).

A Classe 2 possui dezesseis máquinas, sendo necessárias dez respostas para obter a ordenação das mesmas. Todas as máquinas foram ranqueadas em oito posições no total. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M173 > M583 = M584 > M576 = M577 = M578 > \dots > M52 = M53 = M122 = M641 = M588$. Os resultados são apresentados no Gráfico 2.



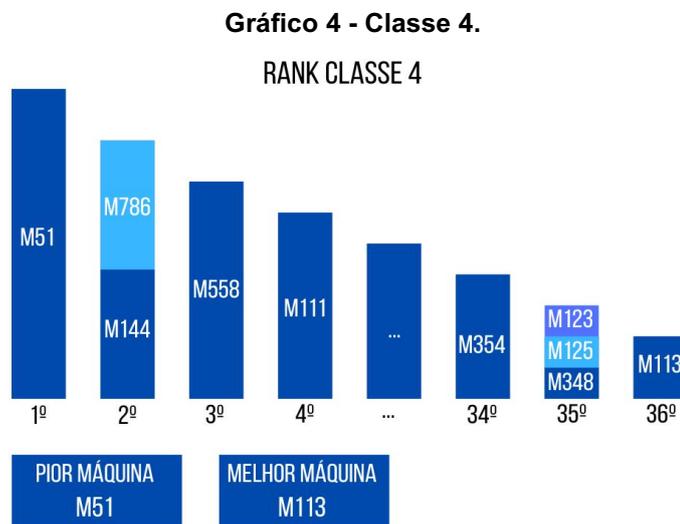
Fonte: Os autores (2022).

Na Classe 3, foram necessárias nove respostas. Todas as máquinas foram ranqueadas em dezessete posições. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M337 = M343 > M562 > M178 = 355 = M796 > \dots > M58$. Os resultados são apresentados parcialmente a seguir, no Gráfico 3.



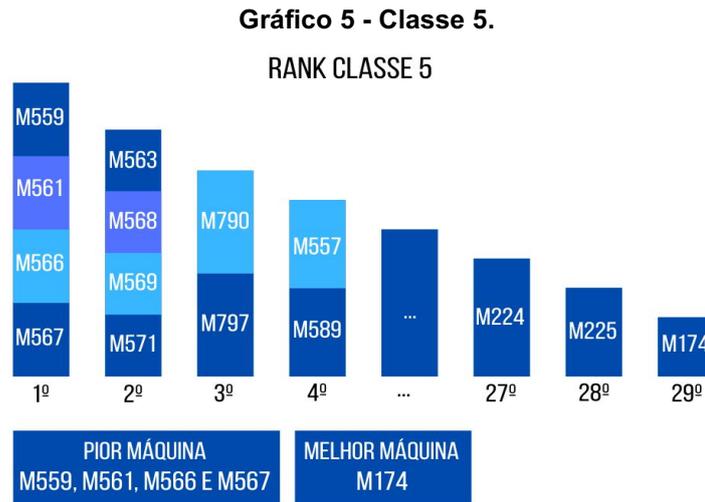
Fonte: Os autores (2022).

A Classe 4 possui cinquenta e oito máquinas, sendo necessárias doze respostas para obter a ordenação das mesmas. Todas as máquinas foram ranqueadas em trinta e seis posições no total. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M51 > M144 = M786 > M558 > M511 > M640 > \dots > M123 = M125 = M348 > M113$. Os resultados são apresentados parcialmente no Gráfico 4.



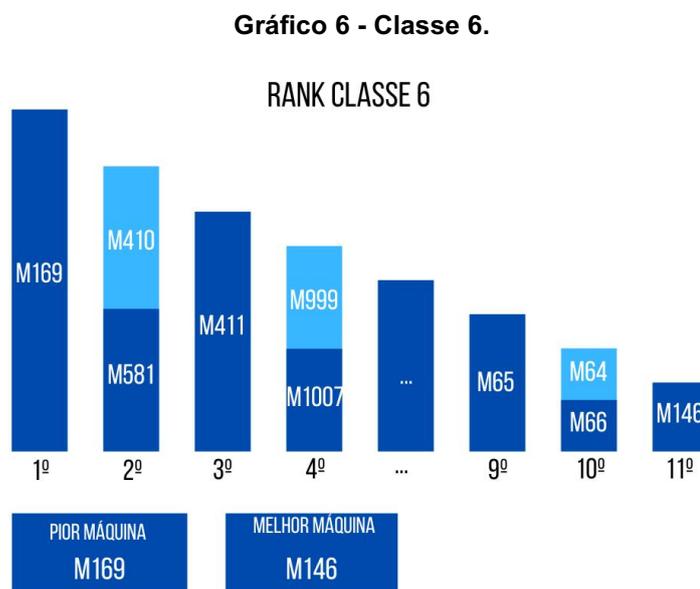
Fonte: Os autores (2022).

Na Classe 5, foram necessárias dezoito respostas. Todas as máquinas foram ranqueadas em vinte e nove posições. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M559 = M561 = M566 = M567 > M563 = M568 = M569 = M571 > \dots > M174$. Os resultados são apresentados parcialmente a seguir, no Gráfico 5.



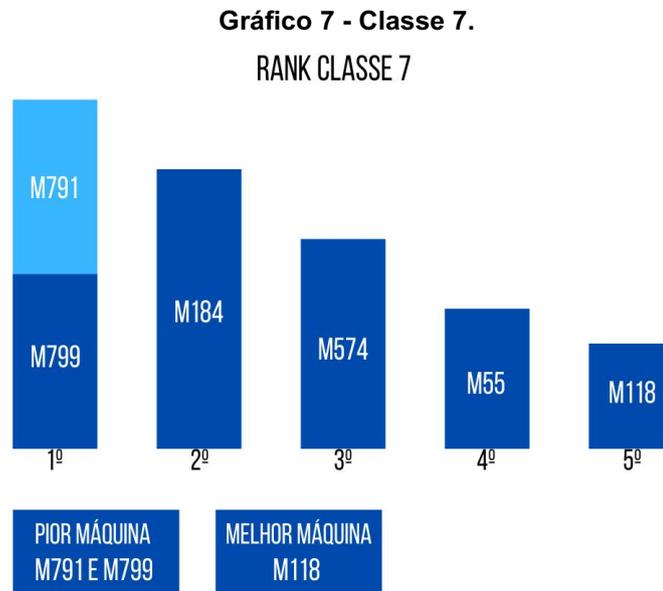
Fonte: Os autores (2022).

Para a Classe 6, foram necessárias nove respostas. Todas as máquinas foram ranqueadas em onze posições. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M169 > M410 = M581 > M411 > M999 = M1007 > \dots > M146$. Os resultados são apresentados parcialmente a seguir, no Gráfico 6.



Fonte: Os autores (2022).

Na Classe 7, foram necessárias quatro respostas. Todas as máquinas foram ranqueadas em cinco posições. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M791 = M799 > M184 > M574 > M55 > M118$. Os resultados são apresentados a seguir, no Gráfico 7.



Fonte: Os autores (2022).

Por último, na Classe 8 foi necessária apenas uma resposta. As máquinas foram ranqueadas em duas posições. As máquinas foram ordenadas da mais crítica para a menos crítica: $M792 > M575$. Os resultados são apresentados a seguir, no Gráfico 8.



Fonte: Os autores (2022).

Após a conclusão da ordenação de todas as classes em particular, foram selecionados os cinco ativos mais críticos de cada uma das oito classes - com exceção da Classe 8 que possui dois ativos no total -, para realizar a etapa final da implementação do método neste trabalho, o ranqueamento geral das máquinas entre todas as classes. A Tabela 4 apresenta as máquinas selecionadas.

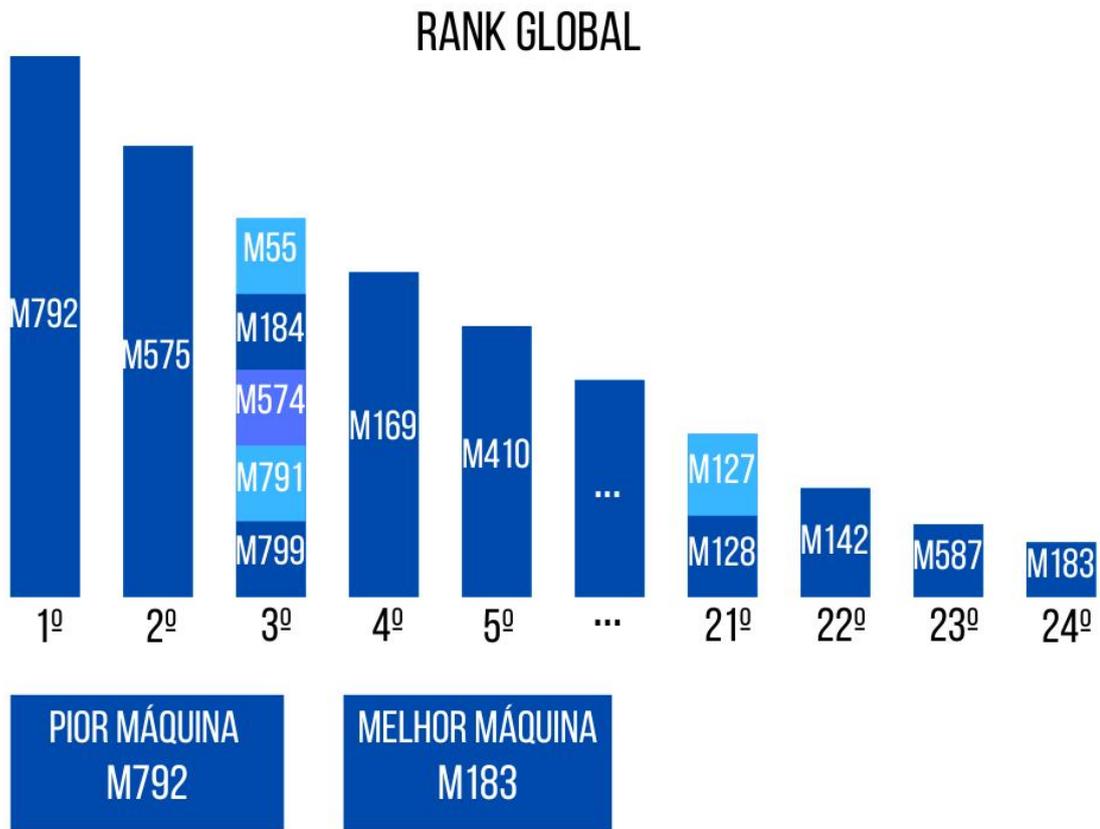
Tabela 4 - As 8 classes com os seus 5 ativos mais críticos.

Classe	Ativo	Redundancia	Tempo Maximo de Reparo	Prever falha	MTTR	MTBF
1	M127	10	6	7	1	2
1	M128	10	6	7	1	2
1	M142	10	6	5	4	2
1	M587	4	6	7	2	2
1	M183	10	6	7	1	1
2	M173	10	5	1	1	1
2	M583	4	5	5	1	1
2	M584	4	5	5	1	1
2	M576	4	5	1	1	1
2	M577	4	5	1	1	1
3	M337	10	4	7	1	1
3	M343	10	4	7	1	1
3	M562	10	4	5	2	1
3	M178	10	4	1	1	1
3	M355	10	4	1	1	1
4	M51	10	3	5	2	2
4	M144	10	3	5	7	2
4	M786	4	3	7	2	2
4	M558	10	3	5	1	1
4	M111	10	3	3	1	1
5	M559	10	1	5	1	1
5	M561	10	1	5	1	1
5	M566	10	1	5	1	1
5	M567	10	1	5	1	1
5	M563	10	1	3	1	1
6	M169	10	1	5	9	4
6	M410	5	1	5	4	4
6	M581	4	1	7	7	4
6	M411	5	1	3	5	4
6	M999	4	1	1	2	4
7	M791	4	1	1	5	6
7	M799	4	1	1	5	6
7	M184	4	1	1	7	6
7	M574	4	1	1	9	6
7	M55	4	2	7	9	9
8	M792	4	1	8	5	9
8	M575	4	1	8	7	8

Fonte: Os autores (2022).

Por fim, para concluir o estudo da implementação, a etapa final é a aplicação do FITradeoff Ordenação a fim de obter o ranqueamento global dos ativos. O intuito dessa etapa é ranquear as 37 máquinas para que seja possível observar os ativos mais críticos da empresa.

Gráfico 9 - Ranqueamento global dos ativos.



Fonte: Os autores (2022).

Para o ranqueamento dessa etapa, foram necessárias 12 respostas e todas as máquinas foram ranqueadas em 24 posições. A máquina mais crítica é a M792, enquanto a melhor máquina é a M183. Os resultados são indicados no Gráfico 9.

4.2 Análise dos resultados

A partir das aplicações realizadas com base no *framework* apresentado anteriormente, este capítulo abrange uma análise dos resultados obtidos no decorrer da execução do trabalho, abordando etapas e passos necessários para a implementação do método multicritério de informação parcial FITradeoff.

As duas etapas da implementação do *framework*, a classificação e a ordenação, apresentaram resultados satisfatórios. Com isso, este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos na elaboração deste trabalho, abordando detalhes dos processos e etapas executadas.

Começando pela etapa de obtenção de dados, notou-se que a planilha disponibilizada pela empresa contemplava informações úteis e suficientes para a

classificação e ranqueamento dos ativos, visto que os métodos requerem somente informações parciais. Foi observado que não seria possível utilizar todos os dados disponibilizados pela empresa, por conta disso foi separado o conjunto de ativos em Salas, visando diminuir o conjunto de máquinas e a complexidade do processamento do software.

Para a classificação das máquinas em grupos de acordo com a criticidade, o método FITradeoff Classificação apresentou um bom desempenho. Realizou-se perguntas com comparações par a par entre os critérios, as quais são respondidas pelo DM. Para essa etapa foi utilizado os dados selecionados em Salas, obtendo a classificação dos ativos em oito classes a partir de sua criticidade. Durante o processo, nota-se a importância das perguntas serem respondidas por profissionais responsáveis pelos ativos, para que o resultado seja o mais próximo possível da realidade.

Para a priorização dos ativos, o método FITradeoff Ordenação apresentou um bom desempenho e a análise também é feita com comparações par a par entre os critérios. Nessa etapa foram realizadas duas análises distintas. Primeiramente, foi realizada a priorização dos ativos para cada grupo separadamente, obtendo o ranqueamento das máquinas por grupo, de acordo com a sua criticidade. Em seguida, outra análise de priorização dos ativos foi realizada com o resultado da análise anterior, na qual foram selecionadas as cinco máquinas mais críticas de cada grupo para obter o ranqueamento global dos ativos. Essa etapa mostra-se essencial para a gestão eficiente da manutenção, pois identifica os ativos mais críticos da planta industrial, além de auxiliar a equipe de manutenção ao direcionar os esforços para determinadas máquinas, independente das salas em que se encontram.

Tabela 5 - Resultados da classificação e ordenação.

Classificação		Ordenação	
Classe	Ativos	Posição	Ativos
8	M792	1	M792
	M575	2	M575
7	M791	3	M791
	M799		M799
	M184		M55
	M574		M184
	M55		M574
6	M169	4	M169
	M410	5	M410
	M581	6	M581
	M411	7	M411
	M999	8	M999
5	M559	9	M559
	M561		M561
	M566		M566
	M567		M567
	M563	10	M563
4	M51	11	M51
	M144	12	M144
	M786	13	M786
	M558	14	M558
	M111		M111
3	M337	15	M337
	M343		M343
	M562	16	M562
	M178		M178
	M355	17	M355
2	M173	18	M173
	M583	19	M583
	M584		M584
	M576		M576
M577	M577		
1	M127	21	M127
	M128		M128
	M142	22	M142
	M587	23	M587
	M183	24	M183

Fonte: Os autores (2022).

Por fim, na Tabela 5 é possível observar que o método multicritério de informação parcial utilizado obteve um bom desempenho para o objetivo proposto, resultando na classificação e ordenação dos ativos, à luz da criticidade, presentes nas salas usadas durante o estudo. Nota-se que ocorreu uma pequena divergência entre a Classe 7 e Posição 3, devido à diferença no cálculo matemático dos métodos. Essa divergência não compromete o resultado final. Sendo assim, mesmo diante às adversidades, os resultados atenderam o objetivo de ranqueamento dos ativos ao aplicar o método multicritério FITradeoff, para as problemáticas de classificação e ordenamento, considerando-os desta forma, como satisfatórios.

5. CONCLUSÃO

Conforme apresentado, esse trabalho teve a finalidade de validar o método multicritério de apoio à tomada de decisão de informação parcial FITradeoff, o qual é uma alternativa mais rápida e simples para a obtenção do ranqueamento e da priorização dos ativos mais críticos da empresa.

Sabe-se que a atividade de elicitação da maioria dos métodos multicritérios de apoio à decisão utilizados pelas equipes de manutenção nas indústrias, necessitam um alto esforço cognitivo demandado do decisor, demandam muito tempo e ainda apresentam uma alta taxa de inconsistência no processo. O método de informação parcial FITradeoff apresentado nesse trabalho melhora a aplicabilidade do procedimento de elicitação, em razão de sua praticidade e rapidez, tornando-o uma alternativa adequada para utilização no dia-a-dia da indústria.

No primeiro momento, para o estágio de revisão da literatura, foi importante a utilização de artigos que abordassem não apenas a parte conceitual da área examinada, mas também conteúdos que auxiliassem para a aplicação prática do método de informação parcial estudado.

Seguindo para fase prática, na etapa de priorização dos ativos, os pesos de cada um dos critérios analisados foram obtidos através das informações disponibilizadas pelos orientadores, que ajudaram a ordenar os critérios no processo de elicitação do FITradeoff, não sendo necessária a busca novamente de especialistas da empresa. Porém, a base de dados era muito extensa, por isso, foram selecionadas três salas para esse estudo, totalizando 181 ativos analisados. Tal seleção permitiu fornecer uma melhor percepção dos resultados de análise de criticidade, visto que a elevada quantidade de ativos causava lentidão devido a limitação de recursos computacionais disponíveis. A análise de tais problemas é objeto de estudo que foge ao escopo do presente trabalho, onde devem ser investigados aspectos de usabilidade do método ou dimensões computacionais.

Já com os dados em mãos, iniciou-se a classificação dos ativos, onde foi utilizado o Sistema de Apoio à Decisão FITradeoff Classificação. Para utilização deste software, a fim de definir e diferenciar as categorias nas quais as máquinas foram classificadas, especificou-se os perfis dos ativos de acordo com as informações coletadas e na etapa da ponderação dos critérios a ordem de escolha definida pelo grupo de manutenção da empresa foi, respectivamente: tempo máximo

de reparo, MTBF, prever falha, redundância e MTTR. Por fim, foram respondidas perguntas de comparação par a par dos critérios, obtendo, desta forma, a classificação dos ativos em oito grupos (Grupo 8 o mais crítico e Grupo 1 o menos crítico).

Como última etapa da fase prática, foi realizado, a partir do resultado da classificação, o ranqueamento das máquinas em duas partes, respectivamente: ranqueamento das máquinas mais críticas entre os ativos da mesma classe e o ranqueamento de criticidade geral das máquinas entre os cinco ativos mais críticos de cada uma das oito classes. Para isso, foi usado o Sistema de Apoio à Decisão FITradeoff Ordenação, que segue os mesmos processos do método de classificação, com a diferença de que o resultado é a determinação da ordem dos ativos à luz da criticidade.

Conclui-se que a utilização do método FITradeoff, para esse estudo, apresentou resultados satisfatórios quando aplicado nas etapas de classificação e ordenação, visto que estão em alinhamento com o objetivo geral e com os objetivos específicos do trabalho em questão, oferecendo a otimização de tempo e identificação de máquinas críticas. Em relação à trabalhos futuros, sugerimos o estudo e a inclusão de um método no *framework* com o intuito de possibilitar a estimativa da periodicidade para a execução da manutenção dos ativos, tendo assim um *framework* completo que resulta na classificação, na ordenação e na previsão da manutenção das máquinas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 5462: 1994. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, ABNT, 1994.
- ALMEIDA, P. S. **Manutenção mecânica industrial: Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. São Paulo, Érica, 2014, p. 15.
- BEHZADIAN, M.; KAZEMZADEH, R. B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. **PROMETHEE: A Comprehensive Literature Review on Methodologies and Applications**. European Journal of Operational Research, Vol.200 Issue:1, 2010. Acesso em: 1 ago. 2022.
- BERTHOLDO, C. B. **Análise de criticidade de ativos com base em métodos multicritério de apoio de decisão: Um caso de aplicação em empresa de peças e componentes agrícolas e industriais**. Orientador: Eduardo de Freitas Rocha Loures. 2020. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica Do Paraná, Curitiba, 2021. Acesso em: 1 ago. 2022.
- BOGDANOVIC, D.; NIKOLIC, D.; ILIC, I. **Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method**. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, Rio de Janeiro, Vol.84, n.01, mar. 2012.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. **PROMETHEE Methods**. In: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. International Series in Operations Research & Management Science, Vol 78. Springer: New York, 2005.
- BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. **Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma unidade de pronto atendimento – UPA 24 h**. Gestão & Produção, São Carlos, Vol. 22, n. 04, p. 805- 819, 2015.
- CAVALCANTE, C. A. V. **Modelos Multicritério de Apoio à Decisão para Manutenção Preventiva Baseados no Método Promethee**. Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, Recife, fev. 2003.
- DIAS, A. **Confiabilidade na manutenção industrial**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- EBRAHIMI, A. **Effect analysis of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Parameters in design and operation of Dynamic Positioning (DP) systems in floating offshore structures**. Royal Institute of Technology, Stockholm, out. 2010.
- FERREIRA, L. G. R.; FERREIRA, L. C. R. **Estudo sobre os tipos mais utilizados e sua importância para a minimização de custos e desenvolvimento organizacional**. **TECHOJE, Belo Horizonte**. Disponível em: http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe_artigo/1998. Acesso em: 5 ago. 2022
- FOGLIATTO, F. S.; Ribeiro, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1 ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 2009.
- FREJ E. A.; ALMEIDA A. T. de; COSTA A. P. C. S. **Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeof elicitation**. Springer-Verlag GmbH Germany Operational Research, 19:909–931, 2019.

- FREJ E. A.; ALMEIDA A. T. de; KANG T. H. A. **Flexible and Interactive Tradeoff Elicitation for Multicriteria Sorting Problems**. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 37(05), 2050020, 2020.
- GREGÓRIO, G. F. P.; SILVEIRA, A. M. **Manutenção Industrial**. 1 ed. Porto Alegre, Sagah, 2018, p. 34.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função estratégica**. 3 ed. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2009.
- KEENEY, R. L., & RAIFFA, H. . **Decision making with multiple objectives, preferences, and value tradeoffs**. New York: Wiley, 1976. Acesso em: 1 ago. 2022..
- KEENEY, R. L. . **Value - Focused thinking: A path to creative decision making**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992. Acesso em: 1 ago. 2022.
- KOLIOS, A.; MYTILINO, V.; LOZANO-MINGUEZ, E.; SALONITIS, K. **A Comparative Study of Multiple-Criteria Decision-Making Methods under Stochastic Inputs**, Energies, jul. 2016.
- MACEDO, M. A. **Contribuição metodológica para a determinação da Criticidade de equipamentos na gestão da manutenção**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2011. Acesso em: 1 ago. 2022.
- MENEZES, C. A. G. **FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do Número de Prioridade de Risco (RPN)**, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá - SP, 2020. Acesso em: 1 ago. 2022.
- MOSS, T. R.; WOODHOUSE, J. **Criticality Analysis Revisited, Quality and Reliability Engineering International**, vol. 15, n. 2, p.117-121, mar. 1999. Acesso em: 1 ago. 2022.
- NASCIF, J. **Indicadores de Manutenção**. 2002. Disponível em: http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/MAN/indicadores_manutencao.pdf. Acesso em: 1 ago. 2022.
- NAVAS, A.M. **Disruptive Maintenance Engineering 4.0**, Emerald Insigt, Madrid, Spain, 2020.
- NGUYEN, T. P. K., MEDJAHHER, K. **A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics**. Reliability Engineering and System Safety, Toulouse, 2019.
- OLIVEIRA, L. M.; MAILLARD, P. **Aplicação de Árvores de Decisão na Modelagem das Concentrações de Nitrato e Fósforo Total: Estudo de Caso no Rio das Velhas**. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/182/20e1dde6ed315b17bfd88ca7e91d387_d9bc4521564e041718307f0bc80b7192.pdf. Acesso em : 17 ago. 2022
- PACHECO, I. S. **Priorização de Ativos e Definição dos Intervalos de Manutenção Preventiva em Empresa do Setor de Tecnologia e Engenharia: Uma Abordagem Baseada em Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão**. Orientador: Eduardo de Freitas Rocha Loures. 2020. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica Do Paraná, Curitiba, 2020.

PILÃO, J. R. M. **Elaboração de análise crítica e definição de plano preventivo de um equipamento**, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, jan. 2017. Acesso em: 1 ago. 2022.

PIRES, C.; JUSTO, D. A. F.; SANTOS, J. A.; GÓES, R.; GONÇALVES, P. C.; JÚNIOR, R. A.; DONATO, T. **Importância da Criticidade de Equipamentos na Gestão da Manutenção**, Centro Universitário de Belo Horizonte, Belo Horizonte, 2018. Acesso em: 1 ago. 2022.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. **Application of Multi-Criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning – A Review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 8 Issue: 4, 2004. Acesso em: 1 ago. 2022.

PORTES, R.. **Indústria 4.0: o que é e como surgiu**. StartSe. 26 mai. 2021. Disponível em: <https://app.startse.com/artigos/industria-4-0-o-que-e>. Acesso em: 7 de outubro de 2021.

SANTOS, A. F. **Análise de criticidade de ativos na empresa automotiva: uma abordagem multicritério**. Orientador: Eduardo de Freitas Rocha Loures. 2021. 93 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica Do Paraná, Curitiba, 2021.

SANTOS, C. F. **framework para integração de conhecimento quali-quantitativo para apoio à tomada de decisão em manutenção industrial com base em métodos multicritério e mineração de processos**. Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Curitiba, 2019.

SELEME, R. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. Curitiba: Intersaberes, 2015.

SHAFIEE, M. **Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview**, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 21 No. 4, pp. 378-402, outubro, 2015. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/282583992_Maintenance_strategy_selection_problem_An_MCDM_overview. Acesso em: 7 de outubro de 2021.

SHARMA, K.D.; SRIVASTAVA, S. **Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A literature Review**, Journal of Advance Research in Aeronautics and Space Science, Vol 5, Issue 1&2, p. 1-17, abril, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333209894_Failure_Mode_and_Effect_Analysis_FMEA_Implementation_A_Literature_Review. Acesso em: 1 ago. 2022.

STRICKLER, A.; BATISTA A. A. S. **Utilização de análise multicritério contribuindo com o FMEA na avaliação de riscos**. Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR; XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2020. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2020/paper/viewFile/7531/2531>. Acesso em: 1 ago. 2022.

TONDIN, R.; DREGER, A. A.; BARBOSA, L. A. **Melhoria no desenvolvimento de produto: uma aplicação da ferramenta FMEA**, Revista Espacios, Vol. 38, p. 18, 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n06/a17v38n06p18.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2022.

APÊNDICE A - CLASSIFICAÇÃO DOS ATIVOS

Figura I - Classe 1: 11 ativo

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
1	M127	0,042	0,049	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M128	0,042	0,049	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M142	0,042	0,047	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M143	0	0,006	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M183	0	0,007	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M223	0	0,006	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M582	0	0,007	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M587	0,042	0,046	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M844	0	0,004	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M1002	0	0,005	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
1	M1006	0	0,007	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003

Fonte: Os autores (2022).

Figura II - Classe 2: 16 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
2	M52	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M53	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M54	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M62	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M63	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M121	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M122	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M173	0,133	0,137	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M181	0,125	0,131	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M576	0,133	0,135	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M577	0,133	0,135	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M578	0,133	0,135	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M583	0,133	0,137	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M584	0,133	0,137	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M588	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
2	M641	0,125	0,129	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003

Fonte: Os autores (2022).

Figura III - Classe 3: 23 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
3	M19	0,208	0,214	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M20	0,208	0,213	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M56	0,292	0,296	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M58	0,208	0,21	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M59	0,208	0,211	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M60	0,258	0,262	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M61	0,258	0,263	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M114	0,258	0,261	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M126	0,258	0,261	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M148	0,258	0,263	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M171	0,258	0,259	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M172	0,257	0,258	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
3	M178	0,267	0,27	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M180	0,258	0,259	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M337	0,267	0,272	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M343	0,267	0,272	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M355	0,267	0,27	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M562	0,267	0,271	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M572	0,258	0,258	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
3	M573	0,258	0,258	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
3	M585	0,258	0,261	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M586	0,258	0,261	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
3	M796	0,267	0,27	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003

Fonte: Os autores (2022).

Figura IV - Classe 4: 54 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
4	M4	0,474	0,475	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M18	0,467	0,47	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M51	0,442	0,445	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M57	0,342	0,346	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M80	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M106	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M107	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M108	0,308	0,311	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M109	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M111	0,4	0,403	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M113	0,34	0,342	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M115	0,466	0,467	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M116	0,466	0,467	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M117	0,467	0,467	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M119	0,466	0,467	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M120	0,392	0,392	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M123	0,342	0,342	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M124	0,425	0,425	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M125	0,342	0,342	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M141	0,308	0,312	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M144	0,442	0,443	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M175	0,475	0,478	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M176	0,475	0,478	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M177	0,475	0,477	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M179	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M182	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M226	0,475	0,475	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M227	0,392	0,392	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M228	0,391	0,392	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M232	0,392	0,395	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M338	0,392	0,392	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M339	0,391	0,392	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M340	0,308	0,313	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M341	0,308	0,312	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M344	0,392	0,392	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M346	0,39	0,392	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
4	M348	0,342	0,342	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M349	0,475	0,478	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M351	0,425	0,426	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M352	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M353	0,392	0,396	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M354	0,342	0,343	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M558	0,4	0,404	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M640	0,4	0,402	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M642	0,4	0,401	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M644	0,4	0,401	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M645	0,308	0,31	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M646	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M647	0,308	0,31	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M648	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M786	0,442	0,443	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M789	0,308	0,309	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M794	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
4	M795	0,392	0,393	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003

Fonte: Os autores (2022).

Figura V - Classe 5: 52 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
5	M22	0,608	0,608	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M23	0,608	0,608	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M105	0,657	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M110	0,525	0,526	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M112	0,525	0,525	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M145	0,657	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M174	0,6	0,602	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M224	0,523	0,525	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M225	0,522	0,525	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M229	0,656	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M230	0,658	0,659	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M231	0,658	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M342	0,533	0,536	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M345	0,655	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M347	0,655	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M350	0,658	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M409	0,605	0,608	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M412	0,606	0,608	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M413	0,606	0,608	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M557	0,666	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M559	0,667	0,668	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M561	0,667	0,668	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M563	0,667	0,667	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M564	0,533	0,536	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M565	0,575	0,575	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M566	0,667	0,668	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M567	0,667	0,668	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M568	0,667	0,667	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M569	0,667	0,667	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M570	0,666	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M571	0,667	0,667	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M579	0,657	0,658	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M580	0,656	0,658	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M589	0,667	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M639	0,525	0,525	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M643	0,524	0,525	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M649	0,657	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M650	0,525	0,525	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M785	0,657	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M787	0,533	0,533	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M788	0,533	0,533	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M790	0,667	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M797	0,667	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
5	M798	0,657	0,658	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M998	0,665	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1000	0,664	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1003	0,664	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1004	0,664	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1008	0,666	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1009	0,664	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1010	0,664	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
5	M1011	0,664	0,667	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0

Fonte: Os autores (2022).

Figura VI - Classe 6: 17 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
6	M64	0,738	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M65	0,739	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M66	0,738	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M146	0,733	0,734	0,667	0,333	0	0	0	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003
6	M147	0,787	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M169	0,79	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M170	0,707	0,708	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M410	0,789	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M411	0,788	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M560	0,708	0,709	0,667	0,333	0	0	0	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003
6	M581	0,789	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M793	0,74	0,742	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M999	0,788	0,792	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M1001	0,788	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M1005	0,788	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M1007	0,788	0,792	0,662	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
6	M1012	0,788	0,792	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0

Fonte: Os autores (2022).

Figura VII - Classe 7: 6 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
7	M55	0,863	0,867	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
7	M118	0,862	0,867	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
7	M184	0,869	0,875	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
7	M574	0,869	0,875	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
7	M791	0,87	0,875	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
7	M799	0,87	0,875	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0

Fonte: Os autores (2022).

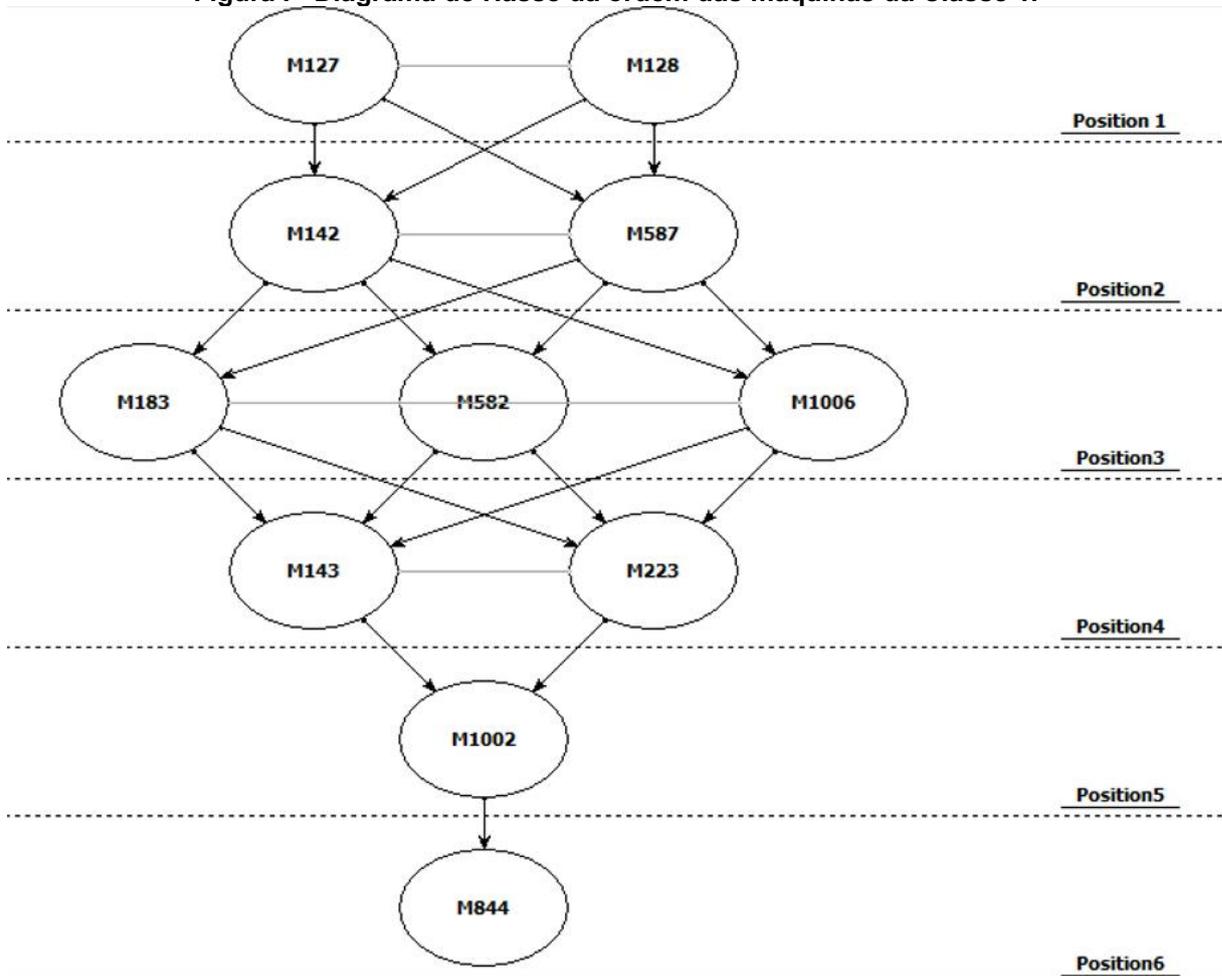
Figura VIII - Classe 8: 2 ativos

CLASSE	ATIVO	Minimized Global Value	Maximized Global Value	k(Tempo Maximo de Reparo) Min	k(MTBF) Min	k(Prever falha) Min	k(Redundancia) Min	k(MTTR) Min	k(Tempo Maximo de Reparo) Max	k(MTBF) Max	k(Prever falha) Max	k(Redundancia) Max	k(MTTR) Max
8	M575	0,955	0,958	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0
8	M792	0,996	1	0,661	0,331	0,003	0,003	0,003	0,667	0,333	0	0	0

Fonte: Os autores (2022).

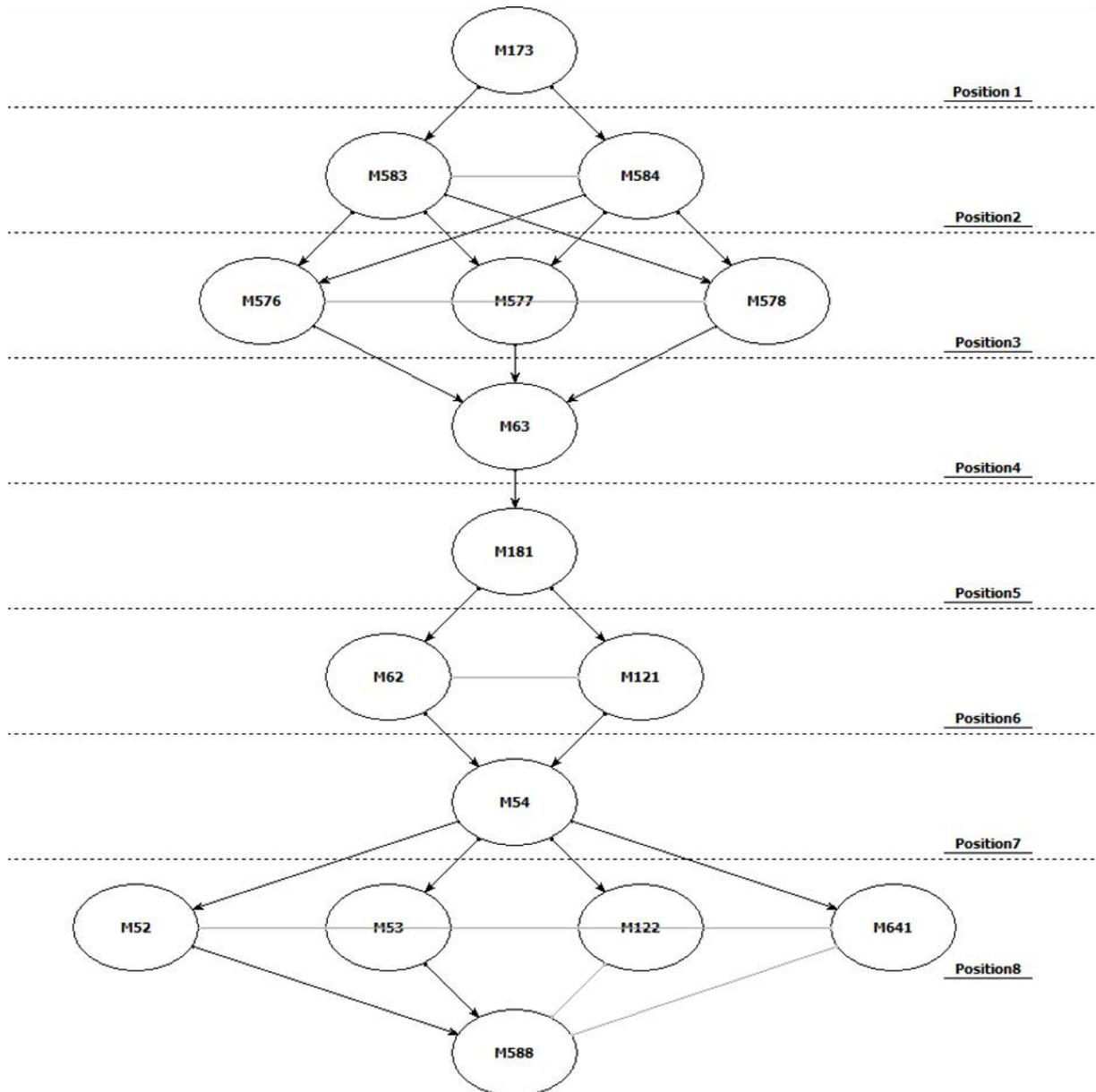
APÊNDICE B - DIAGRAMA DE HASSE

Figura I - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 1.



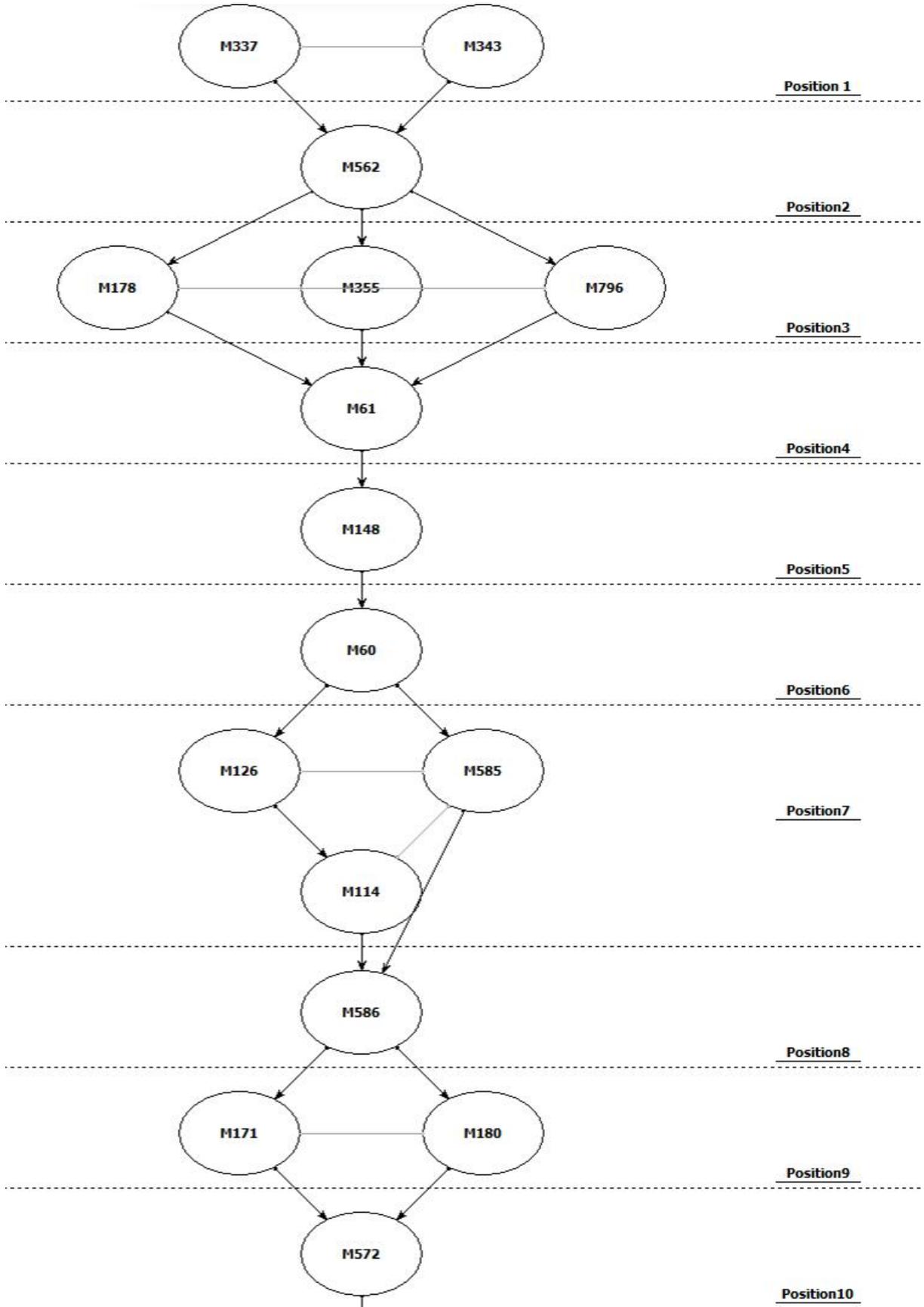
Fonte: Os autores (2022).

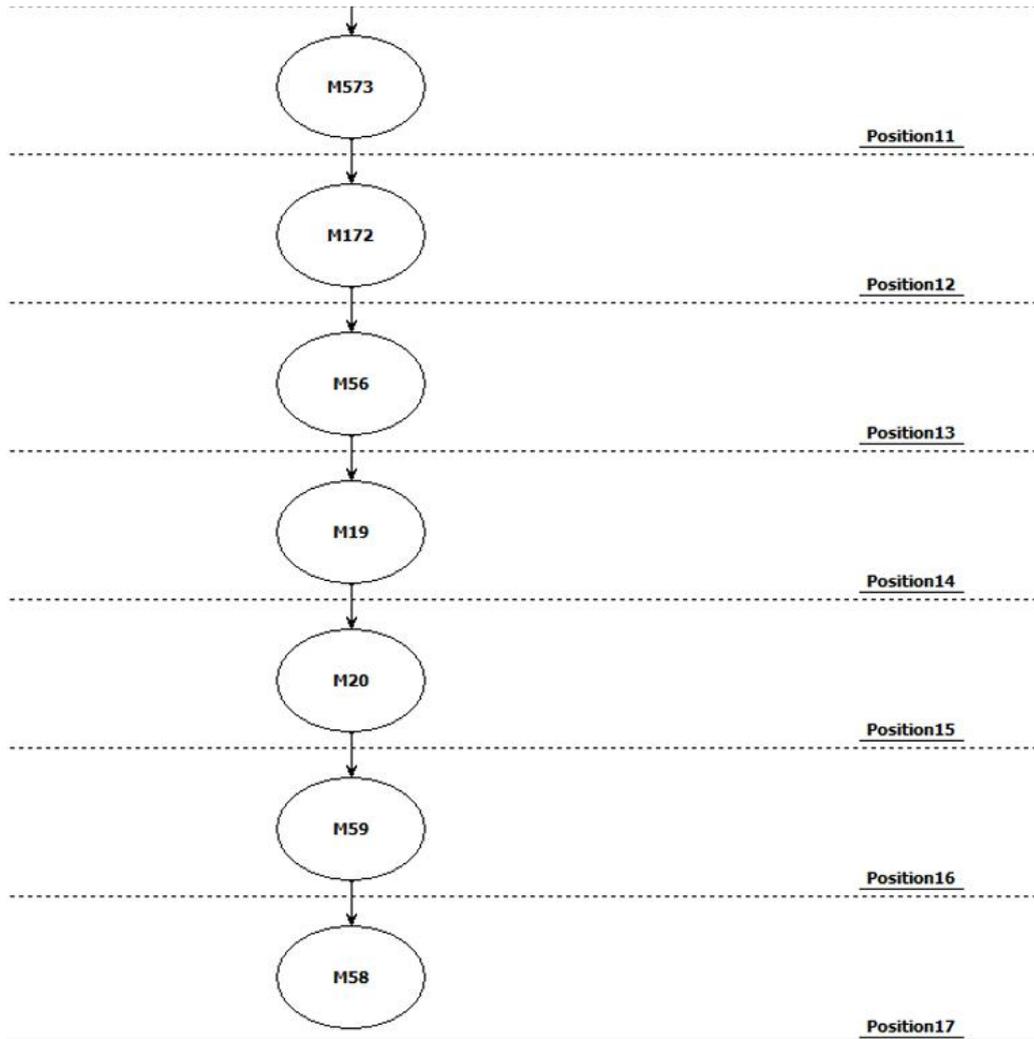
Figura II - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 2.



Fonte: Os autores (2022).

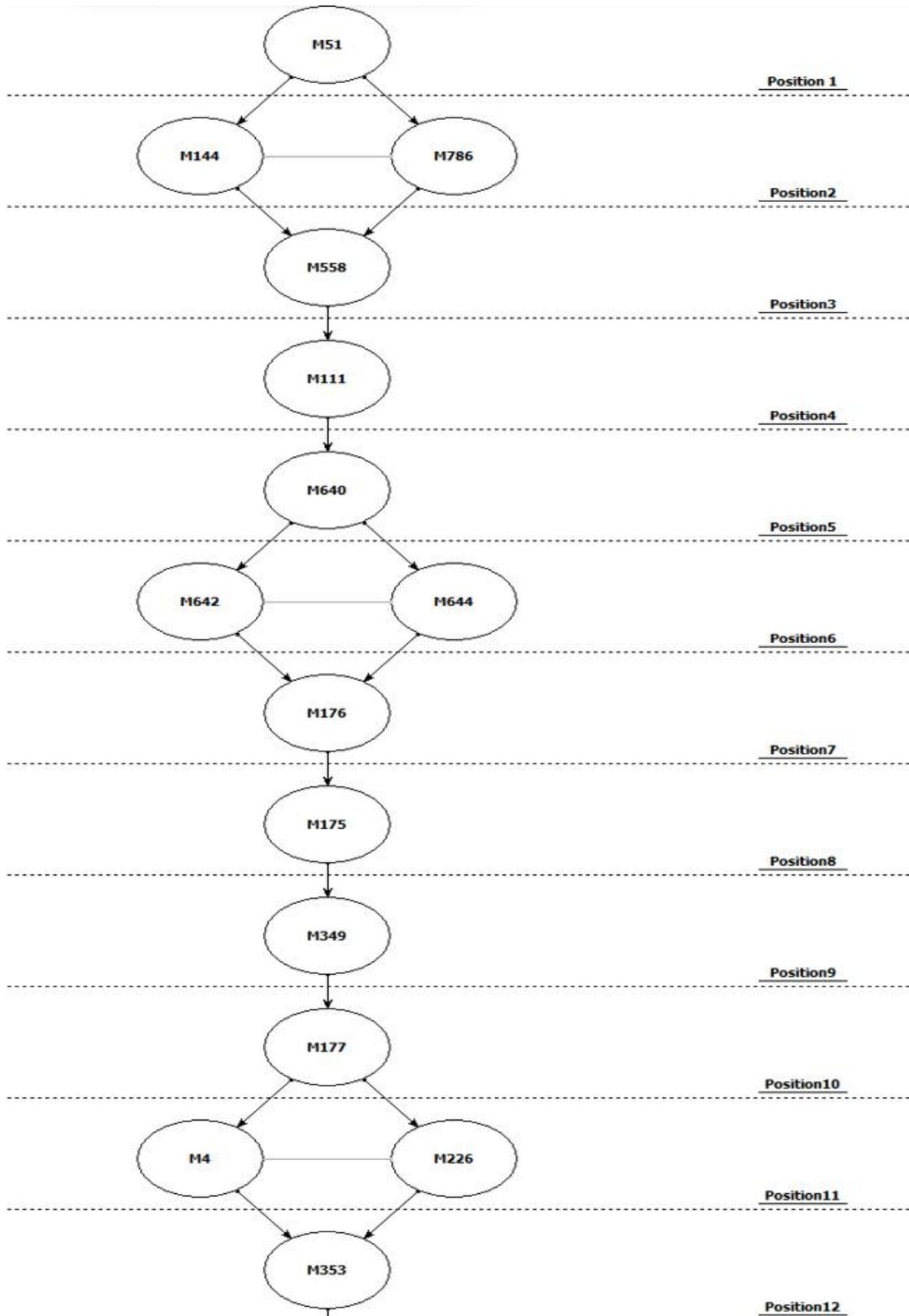
Figura III - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 3.

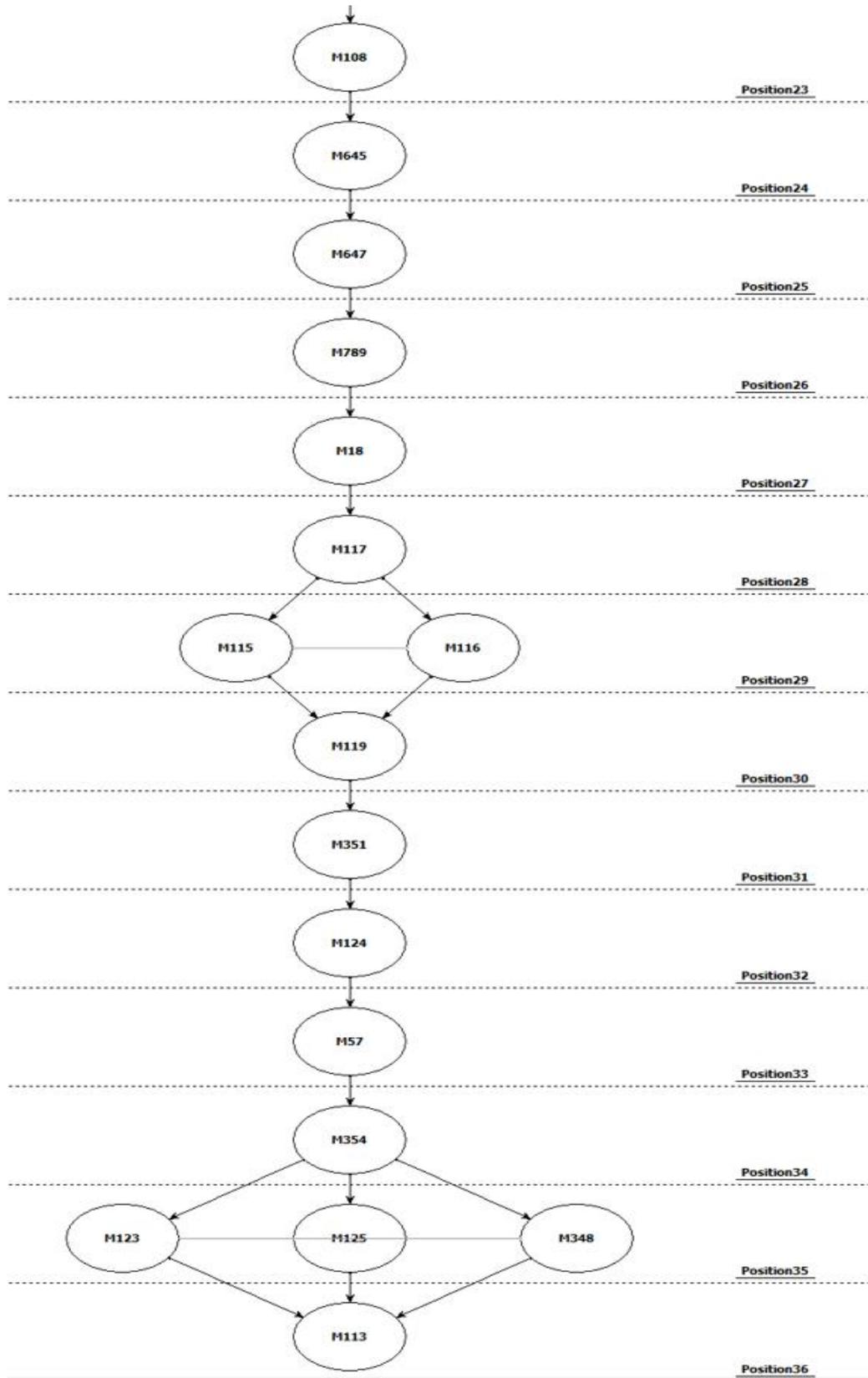


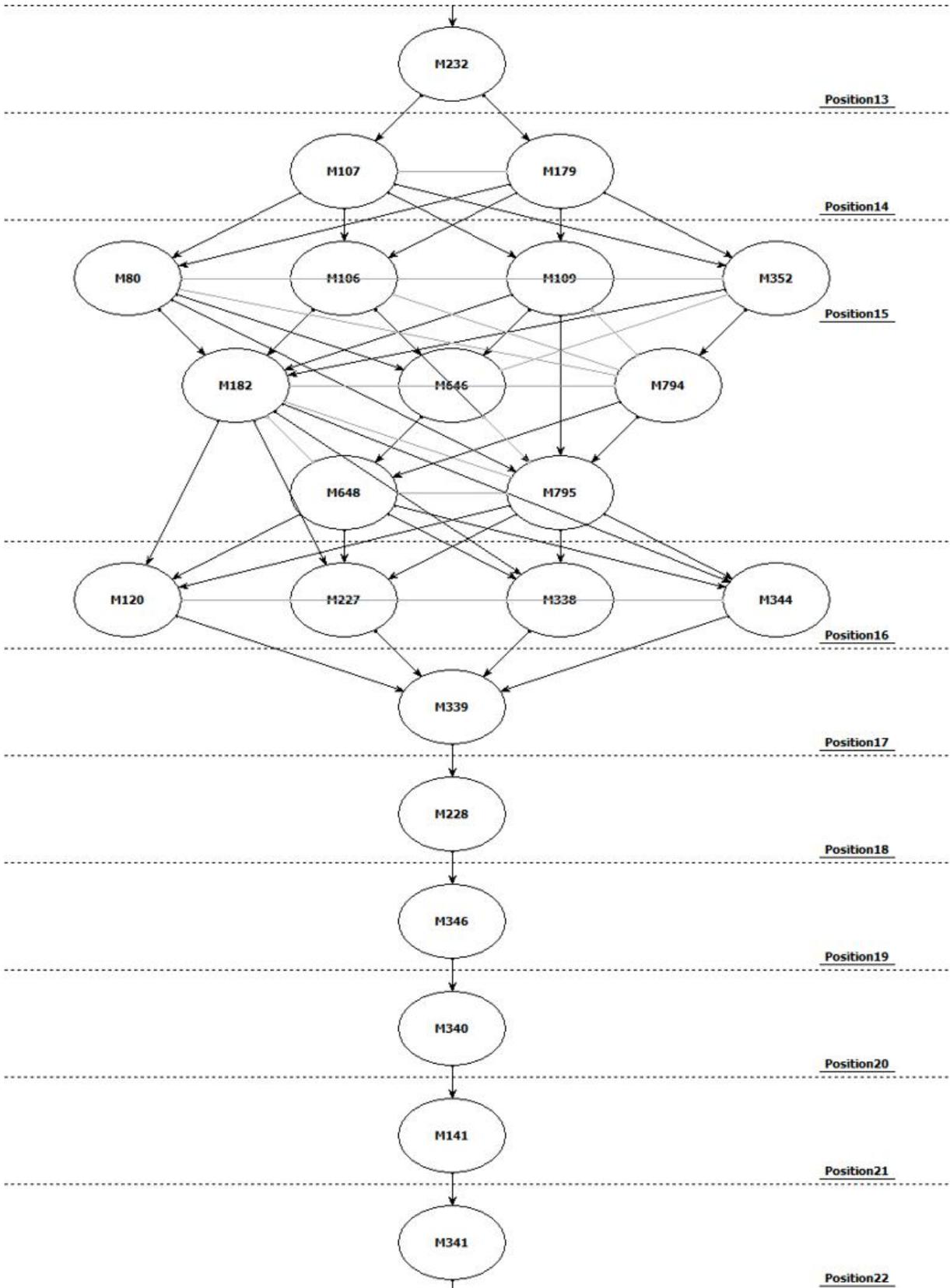


Fonte: Os autores (2022).

Figura IV - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 4.

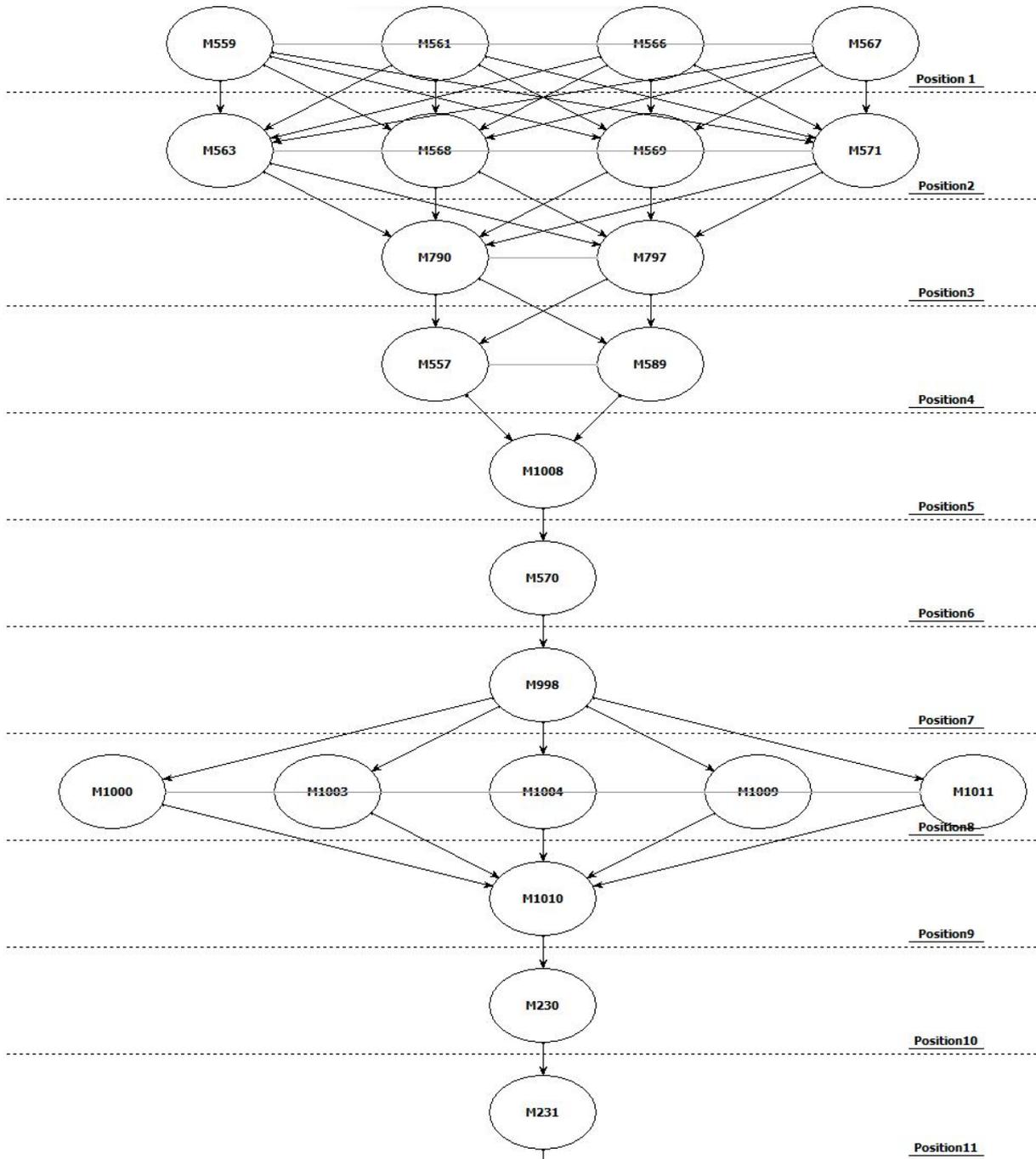


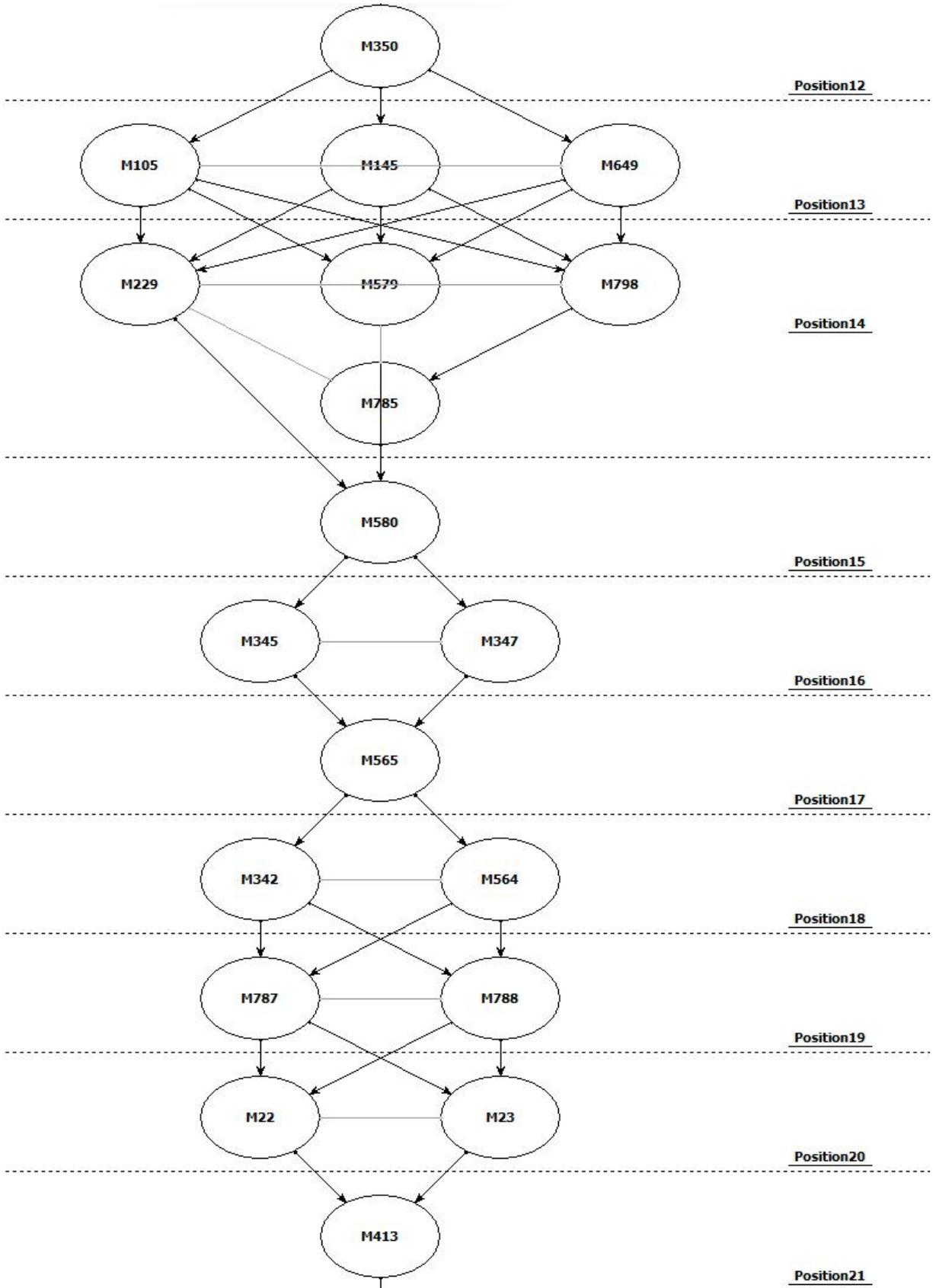


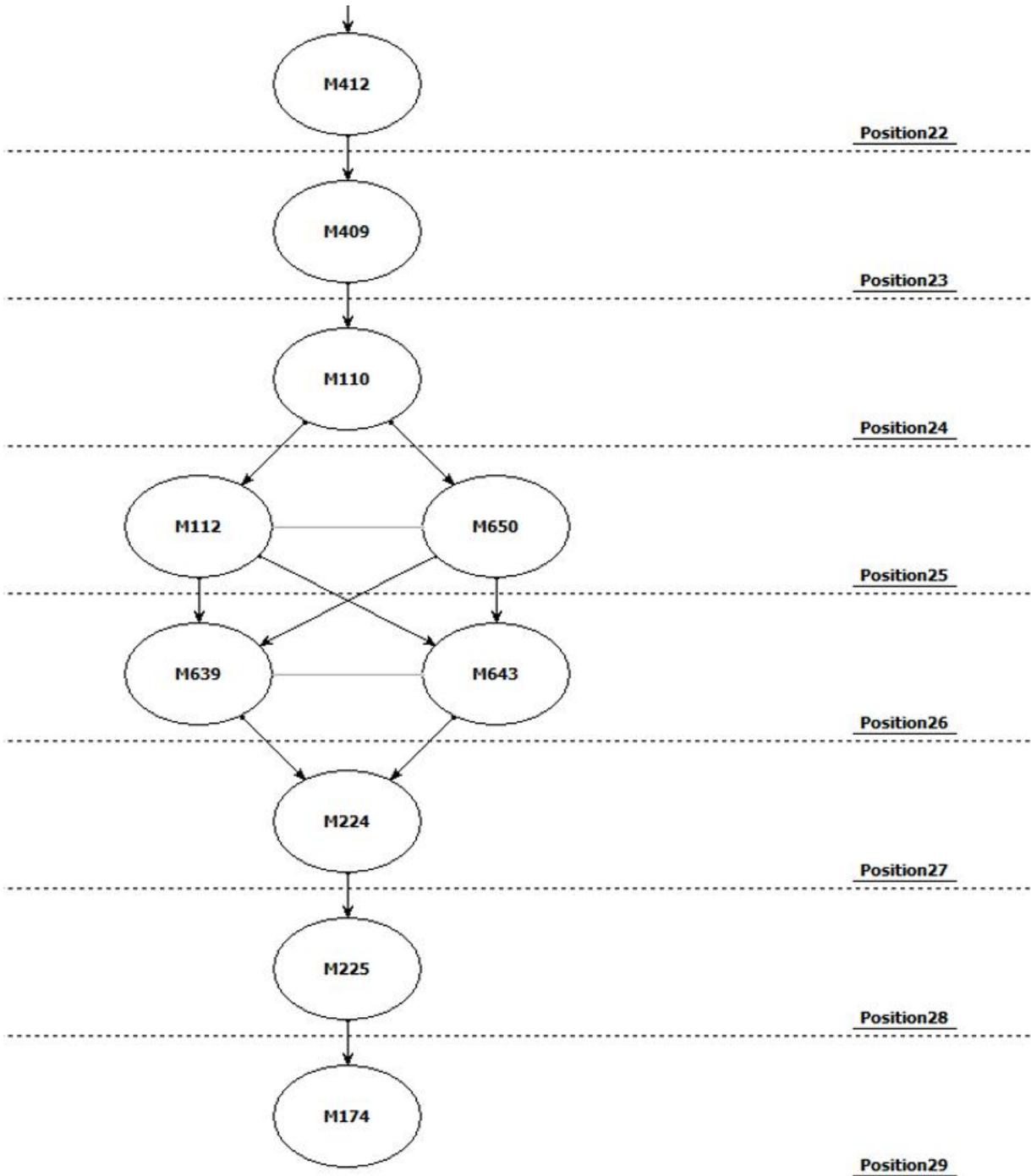


Fonte: Os autores (2022).

Figura V - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 5.

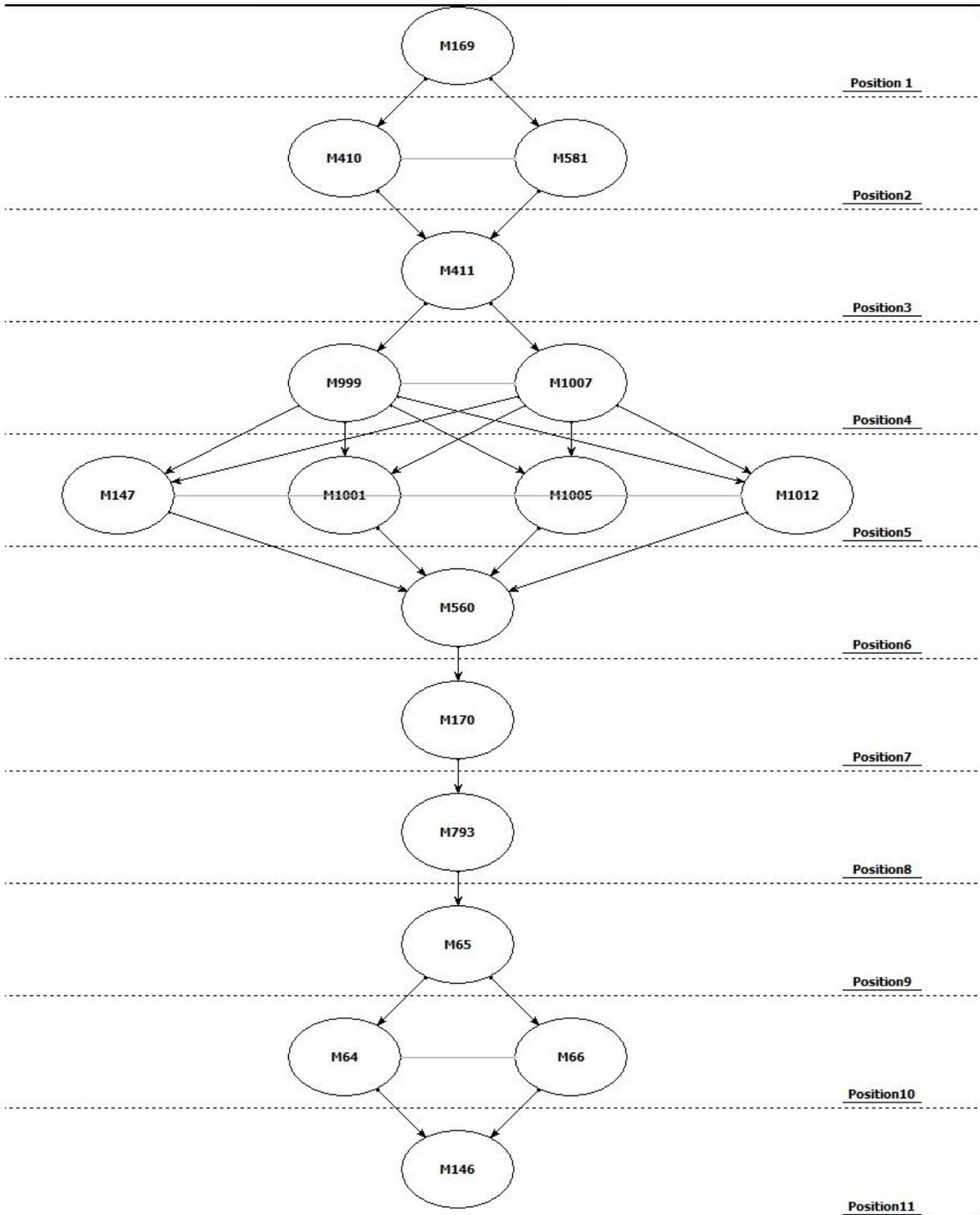






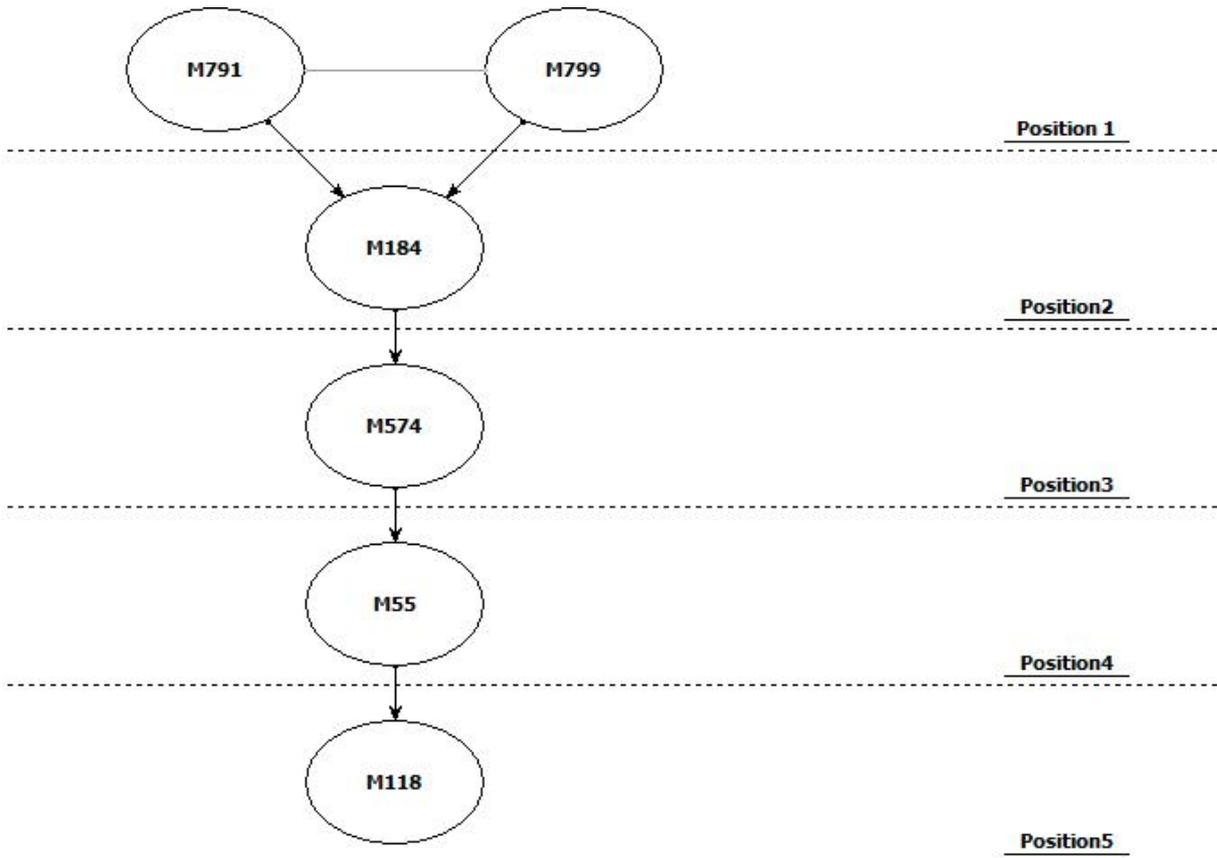
Fonte: Os autores (2022).

Figura VI - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 6.



Fonte: Os autores (2022).

Figura VII - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 7.



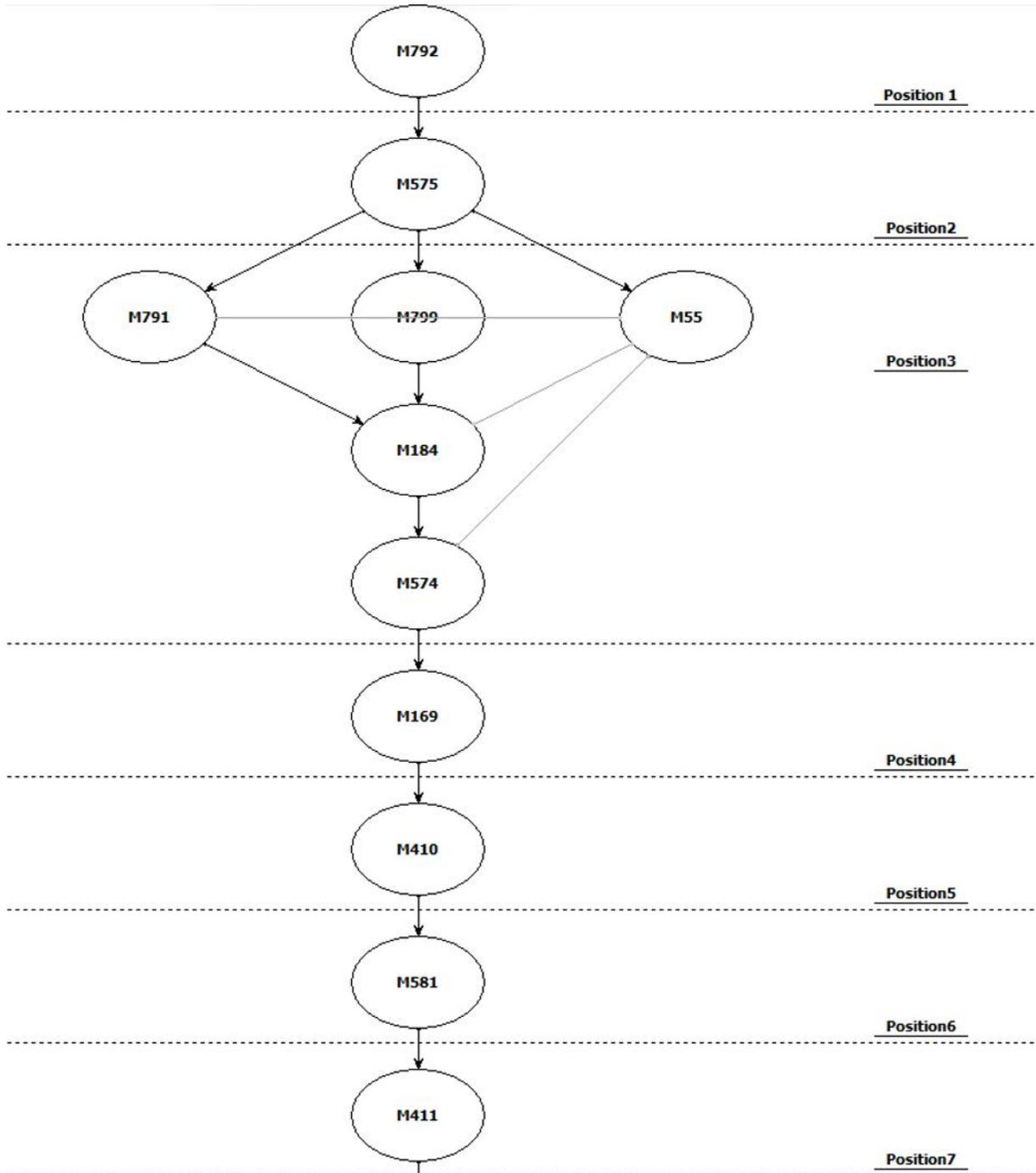
Fonte: Os autores (2022).

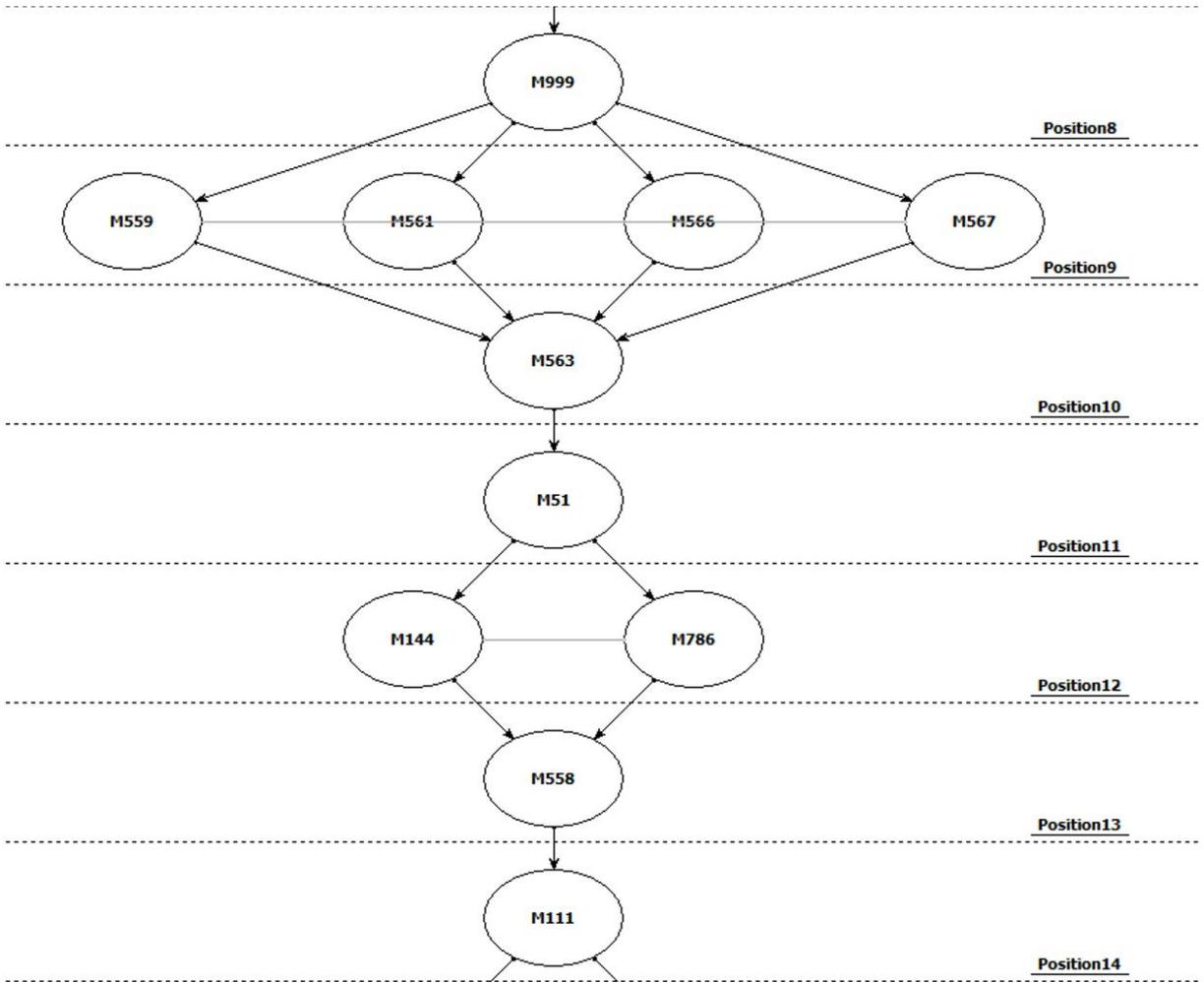
Figura VIII - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas da Classe 8.

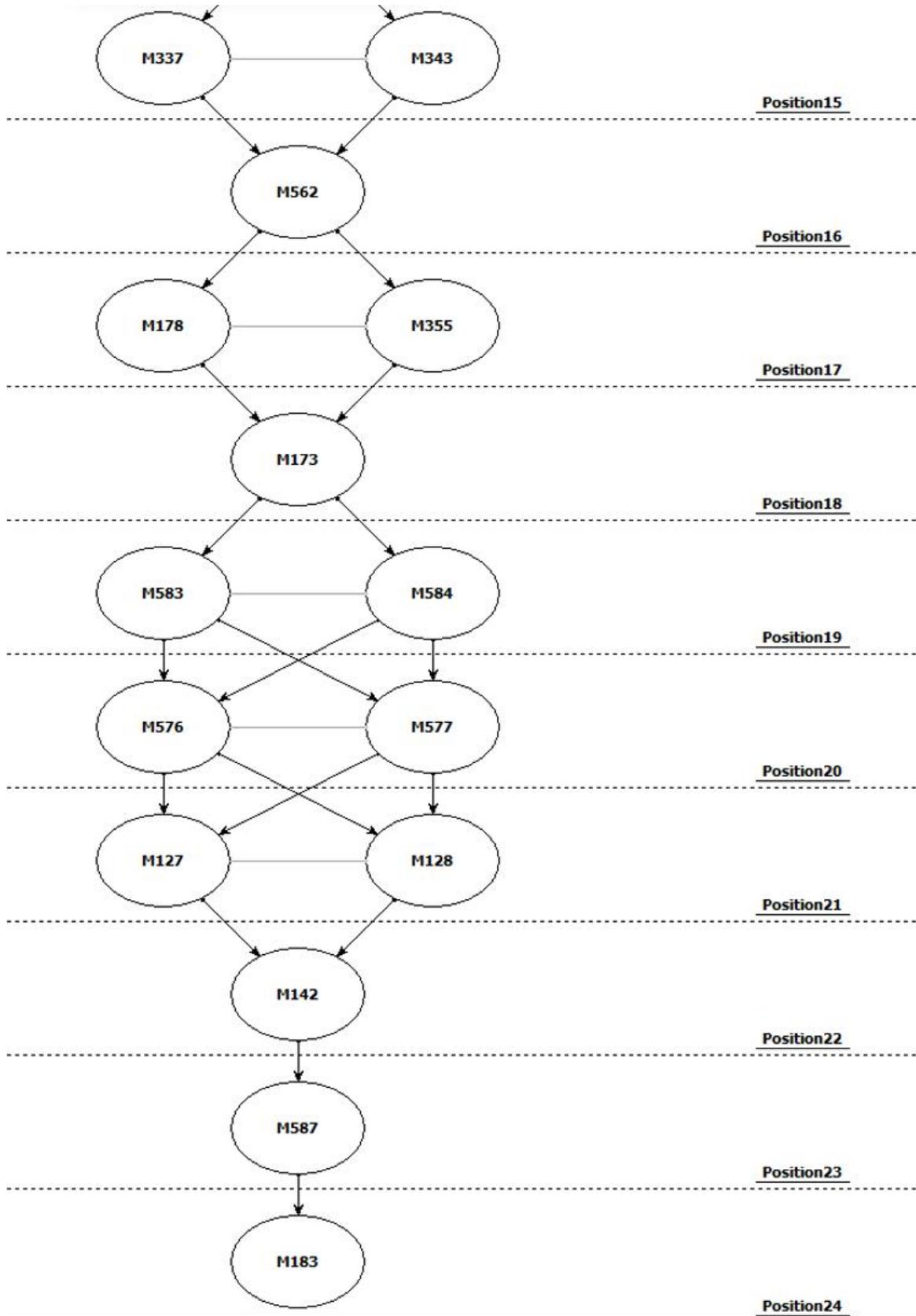


Fonte: Os autores (2022).

Figura IX - Diagrama de Hasse da ordem das máquinas do ranqueamento global.



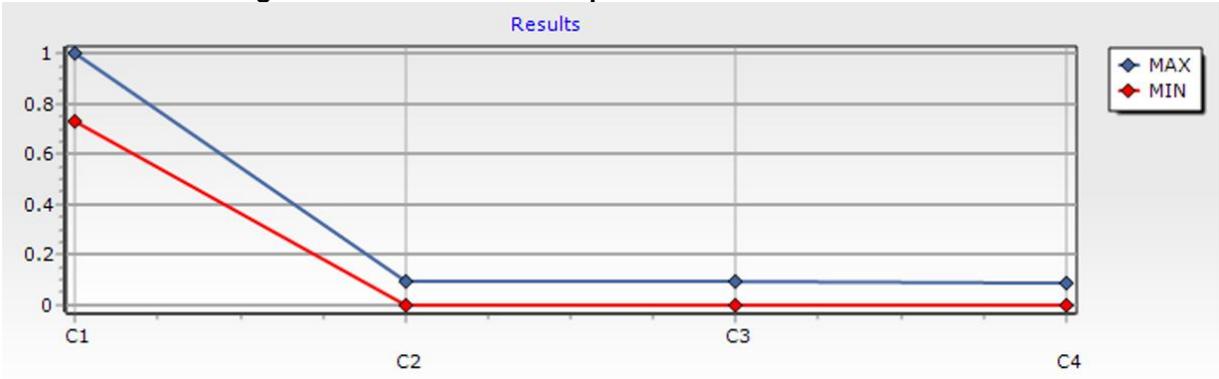




Fonte: Os autores (2022).

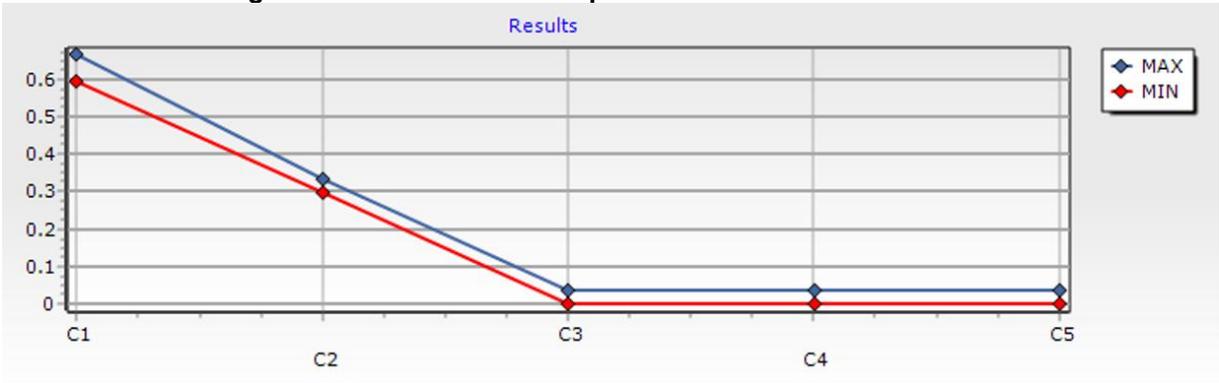
APÊNDICE C - VALOR LIMITE

Figura I - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 1



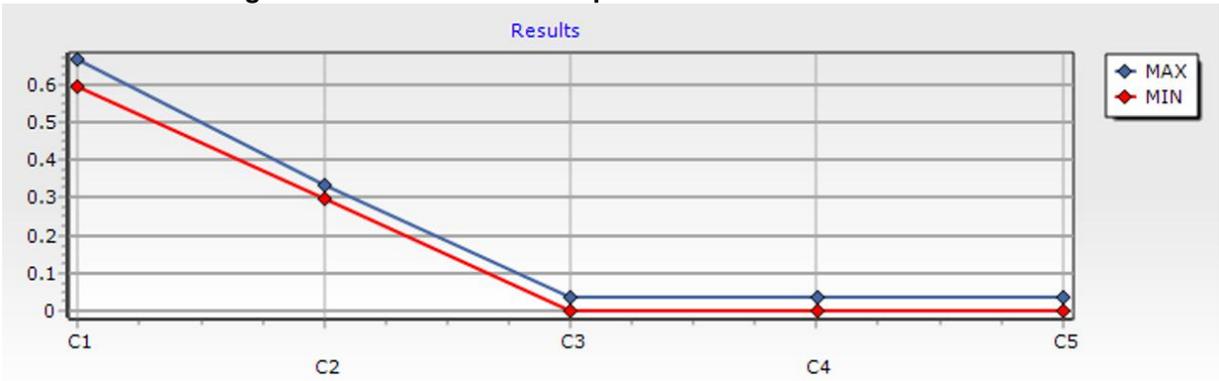
Fonte: Os autores (2022).

Figura II - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 2.



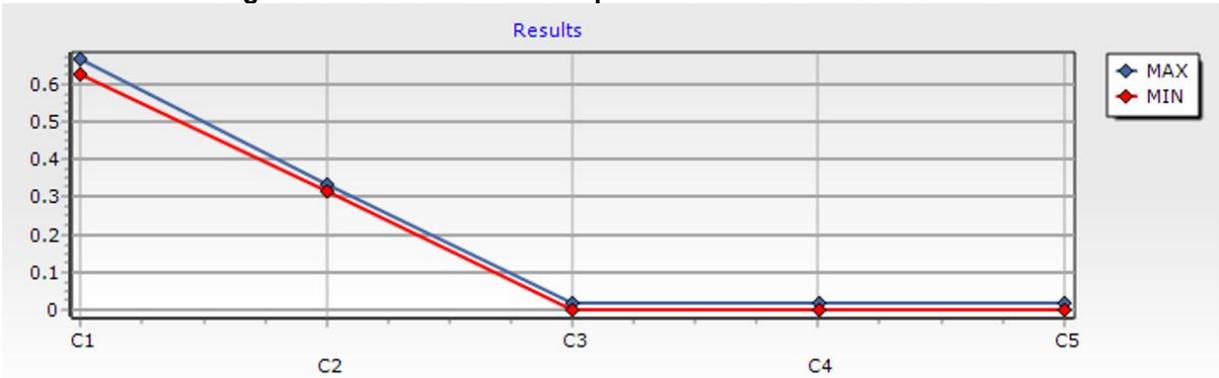
Fonte: Os autores (2022).

Figura III - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 3.



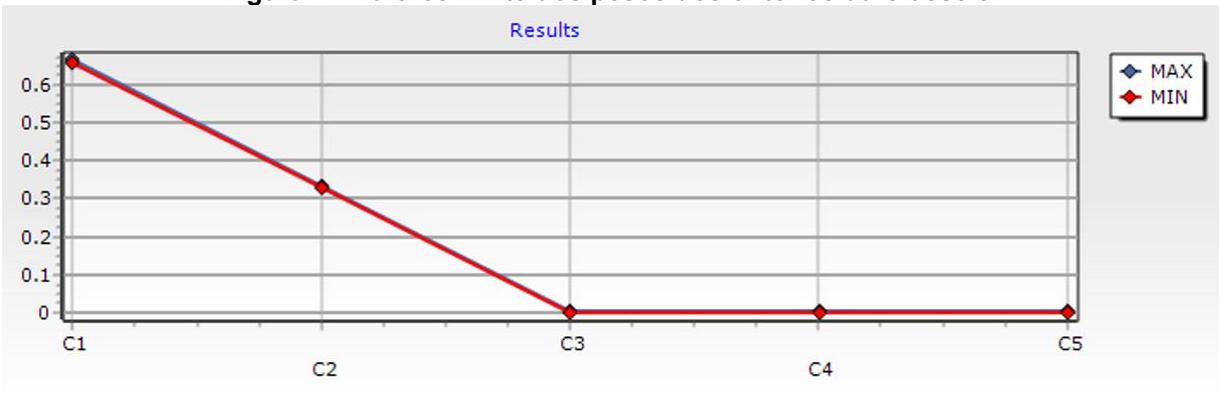
Fonte: Os autores (2022).

Figura IV - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 4.



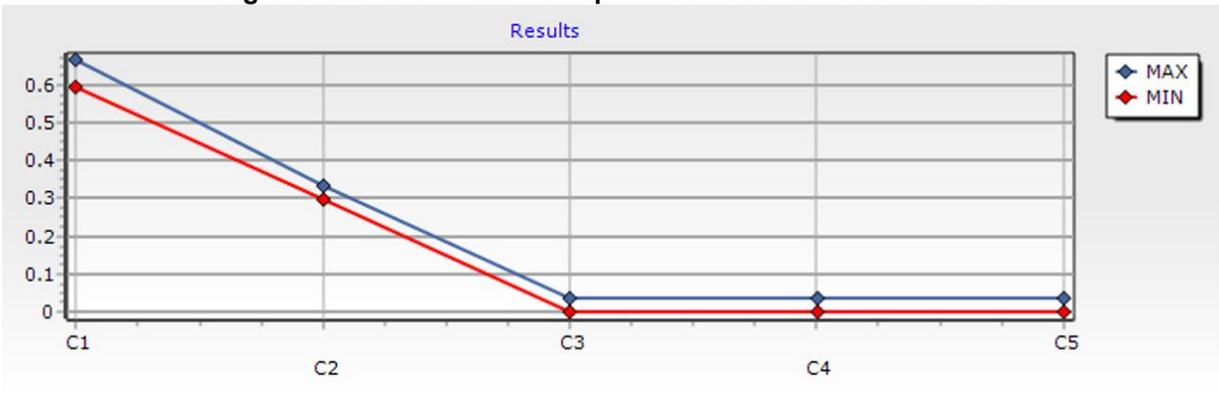
Fonte: Os autores (2022).

Figura V - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 5.



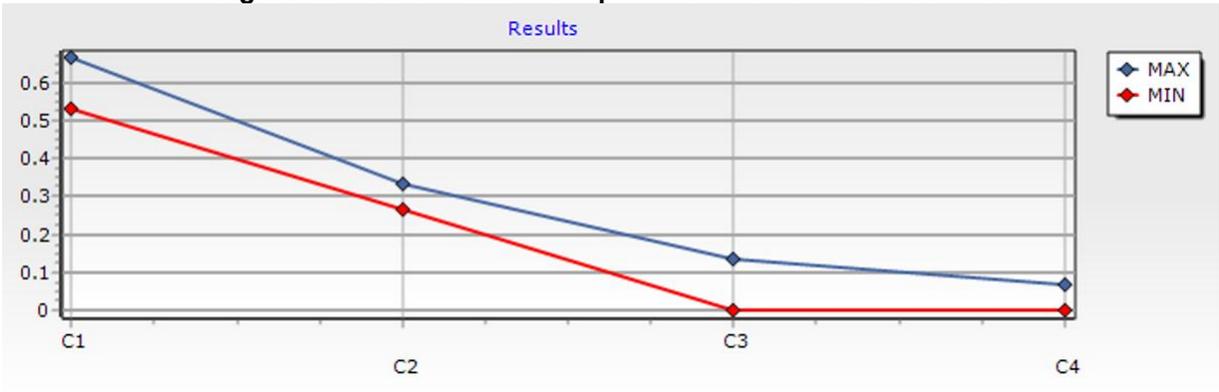
Fonte: Os autores (2022).

Figura VI - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 6.



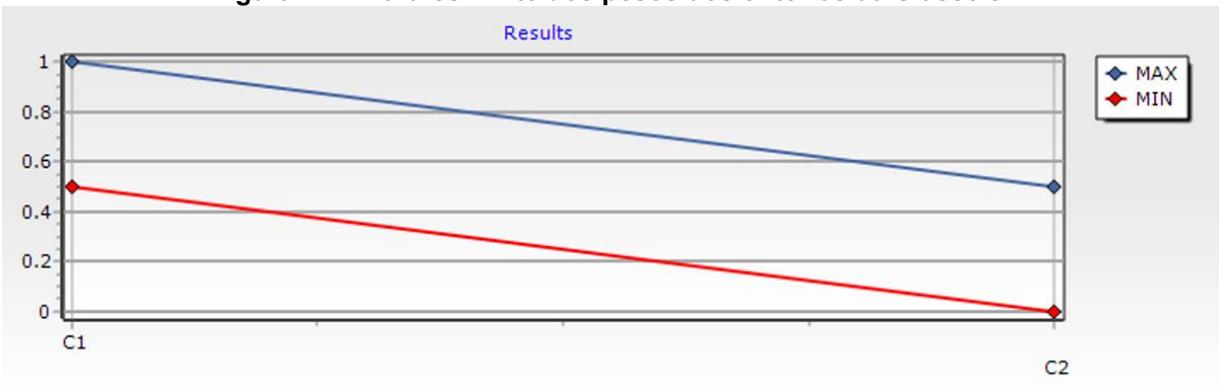
Fonte: Os autores (2022).

Figura VII - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 7.



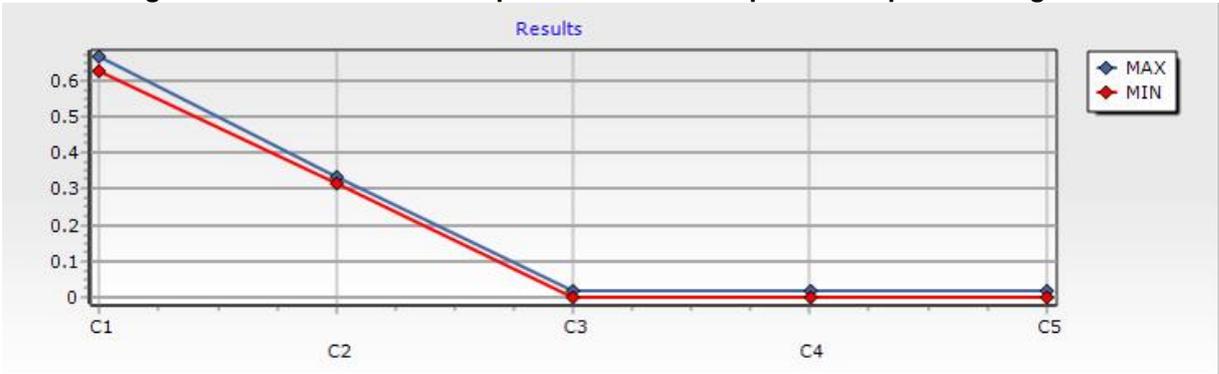
Fonte: Os autores (2022).

Figura VIII - Valores limite dos pesos dos critérios da Classe 8.



Fonte: Os autores (2022).

Figura IX - Valores limite dos pesos dos critérios para o ranqueamento geral.



Fonte: Os autores (2022).