

MÉTODOS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO NA IMPLANTAÇÃO DO MES - MANUFACTURING EXECUTION SYSTEM

Jáder Gustavo Decó¹, Leonardo Dagnino Chiwiacowsky²

Resumo: O trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo de decisão baseado em múltiplos critérios para avaliar as possibilidades de equipamentos para implantação de um MES (*Manufacturing Execution System*) em uma empresa do setor moveleiro. Para avaliação do modelo de decisão desenvolvido, foram aplicados dois diferentes métodos de análise multicritério para comparação dos resultados. Os métodos adotados foram o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e o TOPSIS (*Technique of order Preference Similarity to Ideal Solution*). Para o desenvolvimento do modelo de decisão e avaliação das alternativas, foi envolvida uma equipe específica da empresa para que os dados e informações garantissem a qualidade e assertividade dos resultados gerados. A equipe estabeleceu quatro alternativas de equipamentos e quatro critérios para compor o modelo de decisão que foi aprovado pela gestão. A avaliação do modelo de decisão com os dois métodos de análise multicritério forneceu ordenações semelhantes das alternativas, diferindo-se apenas pela inversão da posição entre a primeira e segunda alternativas identificadas de acordo com o método empregado na análise, porém com pontuações próximas.

Palavras-chave: MES; tomada de decisão; AHP; TOPSIS; métodos multicritério.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 pode ser considerada a próxima etapa da evolução das empresas de manufatura, onde conceitos ligados a essa nova transformação dos sistemas de produção estão relacionados principalmente à integração e à conexão digital dos sistemas produtivos. A estrutura necessária para uma empresa iniciar essa transformação está baseada no surgimento de novas tecnologias como Big Data, Internet das Coisas, Armazenamento em Nuvem,

1 Engenheiro de Produção pela Universidade de Caxias do Sul (UCS) e Especialista em Engenharia 4.0 pela Universidade de Caxias do Sul (UCS). E-mail: jgdeco@ucs.br.

2 Doutor em Computação Aplicada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Professor e Pesquisador da Universidade de Caxias do Sul (UCS). E-mail: ldchiwiacowsky@ucs.br.

Manufatura Aditiva, Simulação Virtual, *Machine Learning*, entre outras (CALABRESE et al., 2020). Conforme Da Silva e Weber (2020), destaca-se que a essência da Indústria 4.0 é a utilização de tecnologias de dados para implementar a internet das coisas e outros serviços, de modo que os processos de negócio e os processos de engenharia se integrem de forma profunda e duradoura.

Com a incorporação das novas tecnologias aos sistemas de produção, surge a necessidade de um monitoramento específico e acompanhamento sistemático dos equipamentos que fazem uso desses recursos produtivos, sendo comumente realizados pela coleta de dados gerados por meio do emprego de sensores presentes nestes equipamentos, e armazenados de acordo com a característica de cada tecnologia. Posteriormente, estes dados são analisados com o uso de softwares específicos, como o *Enterprise Resource Planning* (ERP), que tem o objetivo de organizar as atividades de manufatura a partir de dados dos funcionários, clientes, fornecedores, produtos, vendas e compras, ou também pelo uso do software *Customer Relationship Management* (CRM), que por ser um sistema direcionado à gestão da empresa, possui a capacidade de auxiliar, principalmente, a área de vendas na sua atuação junto ao portfólio de clientes. Os recursos de software mencionados evidenciam, conforme Souza das Neves et al. (2015), a busca pela diferenciação e aumento da eficiência dos processos produtivos, impulsionando o setor industrial a realizar grandes investimentos na automação do chão de fábrica nos últimos anos, principalmente no que diz respeito à aquisição de hardware e software.

A utilização dos recursos de software, como sistemas ERP e CRM, tem por objetivo facilitar a análise de dados consolidados (diários ou semanais), bem como auxiliar no processo de tomada de decisão estratégica nas organizações, em contextos específicos, geralmente complexos. Entretanto, a fim de dispor dos benefícios que os recursos da Indústria 4.0 proporcionam, é necessário um acompanhamento contínuo do processo produtivo, de modo que dados da manufatura possam ser utilizados em tempo real. Uma alternativa para lidar com este cenário seria a implementação do software *Manufacturing Execution System* (MES), que oferece alternativas essenciais para melhorar e aprimorar o manuseio e uso de dados coletados em um sistema produtivo. De acordo com Jasko (2020), o MES monitora, controla e otimiza os processos de manufatura, de modo a permitir que as informações fornecidas auxiliem os tomadores de decisão na compreensão de como os subsistemas envolvidos na produção estão interligados, podendo facilitar a melhoria contínua da manufatura.

Uma das principais barreiras para as empresas implementarem softwares como o MES é o investimento necessário para sua aquisição, sendo recomendada a sua implementação de forma incremental. Com isso, indica-se a sua instalação de forma gradual nas unidades produtivas de interesse, como por exemplo, em células de manufatura individuais. Com isso, surge a necessidade de definir quais unidades produtivas deverão primeiramente

receber a instalação do sistema MES. A partir da situação-problema descrita, a seguinte questão de pesquisa é formulada: “Como priorizar as unidades produtivas ou células de manufatura em um contexto industrial para terem seu funcionamento monitorado por um sistema de execução da manufatura (MES)?”

Uma possível abordagem para identificação da melhor opção de unidade ou processo produtivo a ser monitorado pelo MES é o emprego de uma abordagem de decisão baseada em múltiplos critérios. Desta forma, o presente artigo tem como objetivo desenvolver um modelo de suporte à decisão multicritério a ser avaliado por meio de dois métodos de análise multicritério, de modo a fornecer um ranqueamento das alternativas a partir de uma avaliação diferenciada das informações que compõem o modelo de decisão gerado.

O estudo apresentado nesse artigo foi realizado em uma empresa do setor moveleiro que tem como objetivo a implantação de um MES em sua fábrica. Em um primeiro momento, o sistema deverá ser implantado somente em uma célula de manufatura da fábrica, tendo a Gestão da empresa elencado possíveis alternativas para esta implantação. Portanto, com o desenvolvimento do presente estudo, pretende-se fornecer uma ordenação das alternativas, determinada a partir da avaliação de um conjunto abrangente de critérios relevantes para definir a ordem de priorização dos equipamentos para implantação do MES. A solução para o problema de decisão multicritério será obtida pelo emprego de dois diferentes métodos de análise de decisão, com a realização de uma análise quantitativa das priorizações obtidas e uma comparação qualitativa das ordenações geradas pelo emprego dos métodos *Analytic Hierarchy Process (AHP)* e *Technique of Order Preference Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* de análise multicritério. O uso dos dois métodos se justifica pela forma diferenciada em considerar o desempenho das alternativas em cada um dos critérios que compõem o modelo de decisão. Embora ambos forneçam como resultado uma ordenação completa com pontuações, o método AHP se baseia em conceitos compensatórios enquanto o método TOPSIS está apoiado em uma noção de compromisso entre aspectos positivos e negativos (ARULDOSS et al., 2013).

O presente artigo tem seu prosseguimento com a apresentação dos conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do estudo, seguido de uma descrição de como foi conduzido o trabalho de construção do modelo de decisão. Na sequência, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação das técnicas AHP e TOPSIS e a correspondente análise da solução para o problema de decisão. Por fim, são apresentadas as considerações finais sobre o estudo realizado, elencando possíveis recomendações para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

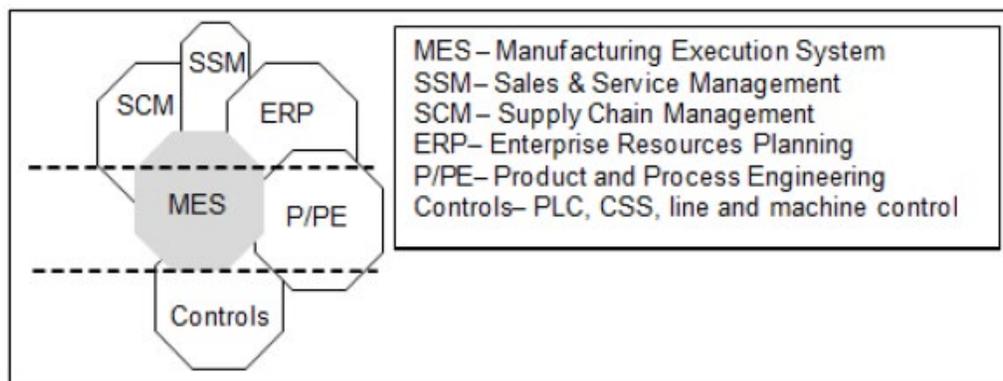
A presente seção está dividida em quatro partes: inicialmente são apresentadas as características do software MES, a segunda parte descreve conceitos relativos ao processo de decisão baseado em múltiplos critérios e as duas últimas partes descrevem os métodos AHP e TOPSIS, destacando os passos para a aplicação de cada um, bem como os cálculos envolvidos.

2.1 *Manufacturing Execution System - MES*

O MES é um software que tem como objetivo a integração de diferentes equipamentos a partir da coleta e análise de dados em tempo real. O acesso a esses dados em tempo real permite o desenvolvimento de estratégias para agilizar o processo de tomada de decisão nos demais setores da empresa. Segundo McClellan (1997), o MES representa um conjunto de sistemas informatizados para auxiliar o setor responsável pela gestão da produção a executar um determinado plano de manufatura, considerando um plano composto por vários elementos, como operações de manufatura, roteiros de fabricação, equipamentos, prazos de entrega, quantidades de produtos, alternativas de processamento, entre outras características.

Sistemas de Tecnologia da Informação (TI) têm se mostrado importantes para as empresas alcançarem vantagens competitivas diante do mercado. Portanto, tecnologias como Controle Numérico por Computador (CNC), *Computer-Aided Design* (CAD), *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) e *Material Requirement Planning* (MRP) são implantadas com o objetivo estratégico de melhorar a eficiência e auxiliar no atingimento dos resultados definidos pela empresa. Porém, esses recursos de TI não geram informações suficientes que permitam à alta gestão da empresa propor estratégias de integração, fazendo com que cada recurso trabalhe de forma isolada sem permitir uma conexão entre todas as informações que são geradas. O sistema MES preenche essa lacuna, envolvendo todos e integrando o chão de fábrica ao nível da alta gestão (SOUZA DAS NEVES et al., 2015). A Figura 1 mostra a visão esquemática do sistema que indica a integração por meio do emprego do MES.

Figura 1: Visão esquemática da integração do MES



Fonte: (SOUZA DAS NEVES et al., 2015)

O emprego do MES busca trazer ganhos aos sistemas produtivos ao dispor de algumas funcionalidades:

- Descrição detalhada das operações: o MES disponibiliza a sequência de produção com o detalhamento de todas as operações, com base nas características dos produtos e equipamentos;
- Alocação de recursos: essa funcionalidade é definida pela organização dos recursos produtivos disponíveis como, por exemplo, equipamentos, matéria-prima, mão de obra e máquinas, bem como, de toda documentação necessária envolvida nas operações;
- Administração de materiais: essa funcionalidade é caracterizada pelo gerenciamento dos materiais em toda a cadeia produtiva, utilizando dados relacionados aos materiais que já estão inseridos no fluxo de produção, além dos materiais em estoque antes do processo de produção, e controlando as quantidades já produzidas;
- Gerenciamento de manutenção: o MES permite acompanhar todas as atividades relacionadas à manutenção através de planos de manutenção, registro de manutenções corretivas, controle de materiais e custos de manutenção, estatísticas dos defeitos, desempenho da manutenção, controle de emissão de ordens de manutenção, entre outros;
- Gestão da qualidade: a função do MES neste processo é fundamental, pois além de fazer a fronteira com os operadores que executam os ensaios, testes e medições de qualidade, será também responsável pelas análises em tempo real, assim auxiliando em ações emergenciais e corretivas;
- Análise de desempenho dos equipamentos: esta funcionalidade tem como objetivo permitir ao MES medir o desempenho dos

equipamentos para uma posterior análise e controle, de modo que sejam utilizados para comparar processos, equipamentos e recursos na mesma fábrica.

A partir do conhecimento das funcionalidades de um sistema MES, é possível utilizá-lo na formulação de um modelo de decisão, cuja avaliação é feita por métodos de análise multicritério. A próxima seção destaca os métodos empregados no presente estudo.

2.2 Métodos multicritério de apoio à tomada de decisão

A tomada de decisão está presente e é necessária em todas as atividades de uma empresa, ao mesmo tempo que a assertividade e eficiência em um cenário de tomada de decisão é muito importante para o resultado esperado e o atingimento de metas estabelecidas. Os métodos de análise multicritério são destinados à solução de problemas que consideram o uso de mais de um critério para avaliação de uma ou mais alternativas. Esses métodos são um importante conjunto de ferramentas para tratar situações complexas de tomada de decisão em organizações, auxiliando os gestores em um contexto de incertezas, complexidade e objetivos conflitantes (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015). Um método de análise multicritério possui um caráter científico e auxilia na realização de uma análise mais ampla do problema de decisão, considerando todas as características importantes a partir da sua representação por um modelo de decisão multicritério. A aplicação do método de análise multicritério não apresenta ao tomador da decisão uma solução, e sim apoia o processo de decisão ao estabelecer uma avaliação adequada das alternativas e dos dados do problema. Esses métodos são capazes de contribuir para a eficiência da tomada de decisão por justificar os processos de decisão e por permitirem o processamento mais rápido e automatizado dos dados.

Conforme Ishizaka e Nemery (2013), os principais métodos de análise multicritério são classificados de acordo com sua abordagem. Os métodos classificados como da escola americana, ou abordagens de agregação total, consistem na atribuição de uma pontuação para cada critério e as alternativas avaliadas são ordenadas de acordo com uma pontuação global. Esta abordagem assume pontuações compensatórias onde um desempenho ruim em um critério pode ser compensado por um bom desempenho em outro critério. Já nos métodos que se enquadram na abordagem de superação ou dominância, classificados como métodos da escola francesa, um mau desempenho não pode ser compensado por um desempenho melhor, duas alternativas podem ter a mesma pontuação, mas podem ser incomparáveis. Por último, as abordagens baseadas em meta ou nível de referência definem um valor objetivo para o desempenho em cada critério, identificando as alternativas mais próximas do objetivo ideal.

Neste trabalho, são empregados um método da escola americana (AHP) e outro baseado em metas (TOPSIS), cujos detalhamentos são apresentados na seções a seguir.

2.3 Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

O método AHP é baseado na decomposição e síntese das relações entre os critérios e alternativas, até que se obtenha a priorização de seus indicadores, aproximando os resultados da melhor resposta de medição única de desempenho (MARCHEZETTI, 2011). Esse método é utilizado em problemas de decisão que necessitam de uma priorização de possíveis soluções através da avaliação e análise de um conjunto de critérios, apresentando um caráter compensatório, quando um mau desempenho em um critério pode ser compensado por um bom desempenho em outro critério. Conforme Saaty (1990), a fase mais importante da criação do modelo de decisão é a escolha dos fatores mais relevantes para essa análise.

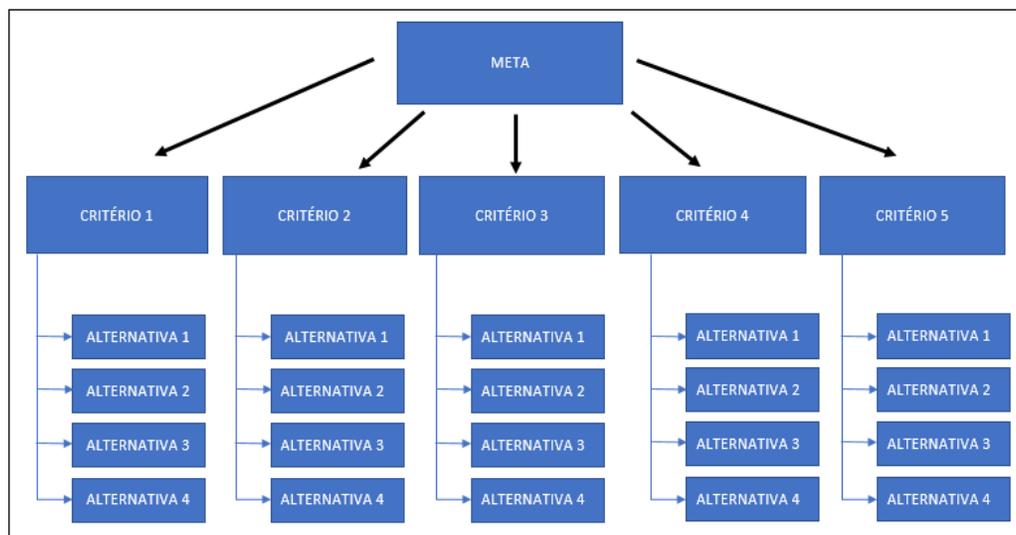
A tomada de decisão envolve priorizar as ideias e juízos de valor de acordo com a conjuntura enfrentada no momento da análise ou que será enfrentada no futuro. Um ponto fundamental em um problema de tomada de decisão é como avaliar critérios intangíveis e como interpretar corretamente medidas de critérios tangíveis. Segundo Saaty (2005), o método AHP apresenta características que possibilita combinar corretamente estes dois tipos de avaliação para obter resultados numéricos corretos.

Para aplicação do método AHP, é necessário seguir algumas etapas essenciais: estruturação do problema, cálculo de prioridades, avaliação da consistência, agregação das prioridades e análise de sensibilidade. A seguir, cada uma destas etapas é detalhada.

2.3.1 Estruturação do problema

A etapa de estruturação está baseada na organização hierárquica do problema mostrando as ligações entre a meta ou objetivo em um nível superior, os critérios que indicam os fatores de avaliação, logo abaixo, e as alternativas que envolvem as possíveis soluções, no nível inferior. A Figura 2 apresenta o esquema de construção da estruturação hierárquica de um problema hipotético com três níveis: o primeiro contendo o objetivo ou meta do problema de decisão, o segundo nível apresentando o conjunto de cinco critérios considerados na análise e, por fim, o terceiro nível contendo o conjunto de quatro alternativas avaliadas.

Figura 2: Exemplo de estrutura hierárquica de um problema de decisão.



Fonte: adaptado de Ishizaka e Nemery (2013)

2.3.2 Cálculo de Prioridades

Após a construção da estrutura hierárquica, são realizadas as comparações par-a-par, organizadas em uma matriz de comparação quadrada, construída a partir da definição das avaliações de importância com base em uma escala predefinida.

A prioridade é um peso que ordena a importância de critérios de decisão ou a preferência das alternativas, sendo identificados três tipos de prioridade (ISHIZAKA; NEMERY, 2013):

1. Prioridades dos critérios: onde é determinada a importância de cada critério;
2. Prioridades locais das alternativas: onde é determinada a importância de uma alternativa em relação a um critério específico;
3. Prioridades globais das alternativas: onde as prioridades das alternativas locais são agregadas em uma medida única global com base nas prioridades dos critérios.

A aplicação da etapa de cálculo de prioridades é feita a partir da avaliação das matrizes de comparação. Para converter a escala verbal das comparações em uma escala numérica, recomenda-se o uso da escala fundamental, conforme proposto por Saaty (1990) e mostrado no Quadro 1:

Quadro 1: Escala Fundamental de Saaty

1	Igual importância entre as variáveis
3	Importância pequena de uma sobre a outra
5	Importância grande ou essencial
7	Importância muito grande ou demonstrada
9	Importância absoluta de uma sobre a outra
2, 4, 6, 8,	Valores intermediários de importância

Fonte: adaptado de Saaty (1990)

A regra para preenchimento da matriz é a comparação entre os critérios dispostos nas linhas em relação aos critérios dispostos nas colunas. A diagonal principal tem o valor 1 pois indica a comparação de um critério com ele mesmo. Os valores em posições simétricas obedecem a regra do recíproco.

Para o cálculo das prioridades de uma matriz de comparação genérica $A_{n \times n}$, pode ser empregado o Método Aproximado, descrito pelas seguintes etapas (MARCHEZETTI, 2011):

1º etapa: soma dos elementos de uma coluna j , dado pela equação (1):

$$s_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

2º etapa: normalização das colunas, conforme a equação (2):

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{s_j}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

3º etapa: cálculo do vetor prioridade pela média das linhas de acordo com a equação (3):

$$p_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n N_{ij}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

2.3.3 Avaliação da Consistência

Conforme Saaty (2000), as pessoas têm a habilidade de estabelecer relações entre objetos e ideias de forma que elas sejam coerentes, sendo que suas relações apresentem consistência. Com isso, na aplicação do método AHP propõe-se calcular a Razão de Consistência (CR) dos julgamentos. Para isso, é necessário que as regras de transitividade e reciprocidade sejam respeitadas.

A análise da consistência tem o objetivo de identificar, numericamente, possíveis contradições entre as avaliações definidas na matriz de comparação. De acordo com Ishizaka e Nemery (2013), isso pode ocorrer, por exemplo,

quando os problemas não são bem definidos, seja por falta de informações suficientes, informação incerta, falta de concentração, entre outros fatores. O método AHP admite uma inconsistência de até 10%, ou seja, segundo Saaty (2000) a Razão de Consistência dos julgamentos deve ser menor ou igual a 0,10.

Os valores médios de inconsistência são denominados Índice Aleatório (RI), sendo específicos para cada tamanho da matriz de comparação, conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1: Índice de Inconsistência Aleatória

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: adaptado de Saaty(1990)

Para o cálculo da Razão de Consistência, inicialmente deve-se calcular o Índice de Consistência (CI) conforme a equação (4):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

onde $\lambda_{max} = \sum_i (\sum_j a_{ij} p_j)$ representa o maior autovalor da matriz de comparação em análise. Em seguida, o valor da Razão de Consistência (CR) é calculado conforme a equação (5):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

2.3.4 Agregação das prioridades

A última etapa do método AHP é a agregação das prioridades locais em uma medida única global, para cada uma das n alternativas avaliadas. Para o cálculo desta medida, deve-se considerar o peso de cada um dos m critérios a fim de identificar a prioridade global. Neste trabalho, para determinação da priorização global das alternativas, é adotada a abordagem denominada modo distributivo (ISHIZAKA; NEMERY, 2013), conforme a equação (6):

$$P_i = \sum_{j=1}^m w_j \times p_{ij}, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

onde P_i é a prioridade global da alternativa i , p_{ij} é a prioridade local da alternativa i com relação ao critério j , e w_j é o peso do critério j .

2.3.5 Análise de sensibilidade

Esta etapa é usada para avaliar como incertezas de julgamento ou definições imprecisas de parâmetros podem impactar na priorização final das alternativas. Esta análise traz um conhecimento maior sobre o problema, aumentando a confiabilidade dos resultados, uma vez que é avaliada a robustez do resultado obtido. Esta etapa é realizada impondo-se alterações aos parâmetros originais do modelo de decisão, comumente os valores de peso dos critérios (ENSSLIN et al., 2001). Neste caso, o novo valor de peso de um critério arbitrário k e imposto, e a consequente alteração no valor do peso dos demais critérios é calculada pelo emprego da equação (7):

$$\text{novo_peso}_j = \text{peso}_j \times \left[\frac{1 - \text{novo_peso}_k}{1 - \text{peso}_k} \right] \quad (7)$$

Assumindo m critérios ($j = 1, \dots, m$) e um novo valor para o peso do critério k , a equação (7) é empregada para gerar os novos valores dos pesos para os demais critérios, isto é, para os critérios $j = 1, \dots, k - 1, k + 1, \dots, m$.

2.4 Método *Technique of Order Preference Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS)

Em tradução livre, a sigla TOPSIS significa Técnica de Ordem de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal, refletindo o conceito básico do método onde a melhor solução é aquela que apresenta a menor distância em relação à solução ideal e a maior distância em relação à solução não-ideal ou anti-ideal. Portanto, o método TOPSIS realiza uma avaliação integrada dos bons e maus desempenhos de cada alternativa em relação ao conjunto de critérios estabelecido. Conforme Behzadian et al. (2012), o método TOPSIS identifica alternativas que simultaneamente apresentam a menor distância de uma solução hipotética positiva (ideal) e a maior distância de uma solução hipotética negativa (não-ideal). Como solução hipotética ideal define-se uma configuração que maximize os critérios de benefício e minimize os critérios de custo, enquanto a solução hipotética não-ideal deverá maximizar os critérios de custo e minimizar os critérios de benefício. O método TOPSIS é composto por quatro etapas, descritas em detalhes a seguir.

2.4.1 Normalização dos desempenhos

Conforme Lima Junior e Carpinetti (2015), uma matriz de decisão, ou desempenho, $\mathbf{X} = (x_{ij})$, onde $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, m$, reúne os desempenhos de n alternativas em relação a m critérios e que devem passar por um processo de normalização.

A normalização dos desempenhos deve ser realizada para permitir a comparação adequada das alternativas, uma vez que os valores originais são

representados em diferentes unidades de medida e, conseqüentemente, em diferentes ordens de grandeza.

Neste trabalho, é adotada a normalização denominada distributiva, que exige que os desempenhos sejam divididos pela raiz quadrada da soma do quadrado dos desempenhos das alternativas em relação a cada critério, conforme a equação (8):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m \quad (8)$$

2.4.2 Ponderação da Matriz

Nesta etapa, é realizada a multiplicação dos desempenhos normalizados pelo peso correspondente ao respectivo critério, conforme equação (9):

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

2.4.3 Definição das soluções ideal e não ideal

Os desempenhos normalizados ponderados são empregados para comparar cada alternativa em relação às alternativas ideal e não-ideal. Para a definição destas alternativas de referência, deve-se considerar o pior e o melhor desempenho na matriz normalizada ponderada, em relação a cada critério. A alternativa ideal é definida como $A^+ = (v_1^+, \dots, v_m^+)$, onde v_j^+ representa o melhor desempenho no critério j , enquanto a alternativa não-ideal é definida como $A^- = (v_1^-, \dots, v_m^-)$, onde v_j^- representa o pior desempenho no critério j .

2.4.4 Cálculo das distâncias

Nesta etapa, são calculadas as distâncias entre cada alternativa avaliada no processo decisório e as alternativas ideal e não-ideal identificadas, seguido do cálculo do coeficiente de proximidade. Para o cálculo da distância de cada alternativa em relação à alternativa ideal, de acordo com Lima Junior e Carpinetti (2015), para cada alternativa avaliada, deve-se calcular a distância euclidiana empregando-se os valores de desempenho normalizados ponderados e os valores da alternativa ideal, de acordo com a equação (10):

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_j (v_j^+ - v_{ij})^2}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (10)$$

De forma análoga, o cálculo da distância para a alternativa não-ideal emprega os valores de desempenho normalizados ponderados e os valores da alternativa não-ideal, de acordo com a equação (11):

$$d_i^- = \sqrt{\sum_j (v_j^- - v_{ij})^2}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (11)$$

Com base nas distâncias calculadas, o coeficiente de proximidade de cada alternativa é calculado pelo emprego da equação (12):

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (12)$$

O coeficiente de proximidade é um valor entre 0 e 1, onde 1 indica uma alternativa preferível. De acordo com Lima Junior e Carpinetti (2015), o coeficiente de proximidade corresponde ao desempenho global ou à pontuação final da alternativa a , permitindo a ordenação final das alternativas, do menor para o maior valor.

As técnicas de análise multicritério aqui descritas foram empregadas para geração de uma ordenação completa das alternativas de unidades produtivas a receberem a instalação do sistema MÊS. Para definição desta ordenação, é necessária a formulação de um modelo de decisão multicritério, cujas etapas de construção são apresentadas na próxima seção.

3 MÉTODO

O desenvolvimento desta pesquisa visou a avaliar quais alternativas de recursos de uma empresa com atuação no setor moveleiro seria a melhor opção para se iniciar a implantação do sistema MES. O trabalho de construção do modelo de decisão foi realizado por um grupo de três decisores, constituído por dois Analistas de Engenharia, sendo um formado em Engenharia de Produção e o segundo estudante do curso de Engenharia de Produção, e um Analista de Produção com formação em Administração de Empresas. O grupo foi supervisionado pelo decisor responsável, que neste caso foi o Supervisor de Engenharia, não tendo influenciado nos juízos de valor dos integrantes do grupo de decisores. O processo de construção do modelo de decisão passou por diversas rodadas de reuniões para discussão dos dados até que o modelo atingisse uma maturidade adequada para aplicação do método de análise. Foram empregados no estudo dois métodos de análise multicritério para apoio à tomada de decisão (AHP e TOPSIS), e o tipo de pesquisa e coleta dos dados foi quali-quantitativo. A metodologia de trabalho foi aplicada considerando quatro etapas:

1º Etapa: a partir da necessidade da empresa de buscar novas alternativas para aumentar a competitividade diante do mercado em que está inserida, surgiu através da gestão da empresa, a solicitação de implementação do software MES na fábrica. A empresa possui atualmente 144 recursos em operação no ambiente produtivo, sendo um desafio identificar as melhores alternativas para iniciar a implantação do software na empresa.

2º Etapa: para responder satisfatoriamente à demanda imposta, foi elaborado um estudo de tomada de decisão baseado em múltiplos critérios, a fim de avaliar adequadamente um conjunto de possíveis alternativas. A gestão da empresa elencou três alternativas de recursos para serem avaliados, sendo que somente um recurso terá o sistema implantado.

3º Etapa: com a definição das alternativas, é necessário definir o conjunto de critérios e atributos que permitirão avaliar qual das opções é a mais adequada no entendimento dos envolvidos no processo decisório. Para isso, os seguintes critérios foram definidos pelo grupo de análise:

- Investimento total: para realização do orçamento de implementação do software MES, foram analisadas as características de cada alternativa de recurso, sendo identificado um montante diferente de investimento para cada equipamento. Este critério é caracterizado como de minimização e será avaliado em uma escala monetária;
- Eficiência do equipamento: existe um monitoramento de eficiência dos equipamentos avaliados no estudo por meio do emprego da medida do IROG (Índice de Rendimento Operacional Global). Para avaliação deste critério, é considerada a média percentual de eficiência no ano de 2021, sendo um critério de minimização, uma vez que quanto menor o percentual de eficiência, maior é a necessidade de implantação do software MES;
- Índices de qualidade: esses índices são monitorados de acordo com o número total de peças com defeitos produzidas no equipamento. Para a análise, foi considerada a média no ano de 2021 de peças com defeitos registradas em cada equipamento, sendo um critério de maximização, uma vez que quanto maior esse índice maior é a necessidade de implantação do MES;
- Tempo de implementação: esse critério foi analisado de acordo com o tempo total de meses necessário para implementação do software em cada um dos recursos avaliados, sendo um critério de minimização.

Com base na definição dos componentes do modelo de decisão, as alternativas identificadas como possíveis soluções do problema foram avaliadas em cada um dos critérios definidos. A Tabela 2 apresenta a matriz de desempenho contendo as avaliações de cada alternativa em relação a cada critério.

Tabela 2: Matriz de Desempenho

Equipamento	Investimento (R\$)	Eficiência (%)	Qualidade (peças)	Tempo (meses)
1	11.041,00	62	21	3
2	8.863,00	71	5	6
3	15.932,00	57	19	9
4	19.327,00	68	37	12

Fonte: Autores

4º Etapa: a partir da avaliação das alternativas, a etapa seguinte corresponde à análise das alternativas, tendo sido realizada pelo emprego dos métodos AHP e TOPSIS.

A partir da formulação do modelo de decisão, os métodos de análise multicritério avaliados no estudo foram empregados, cujos respectivos resultados são apresentados na próxima seção.

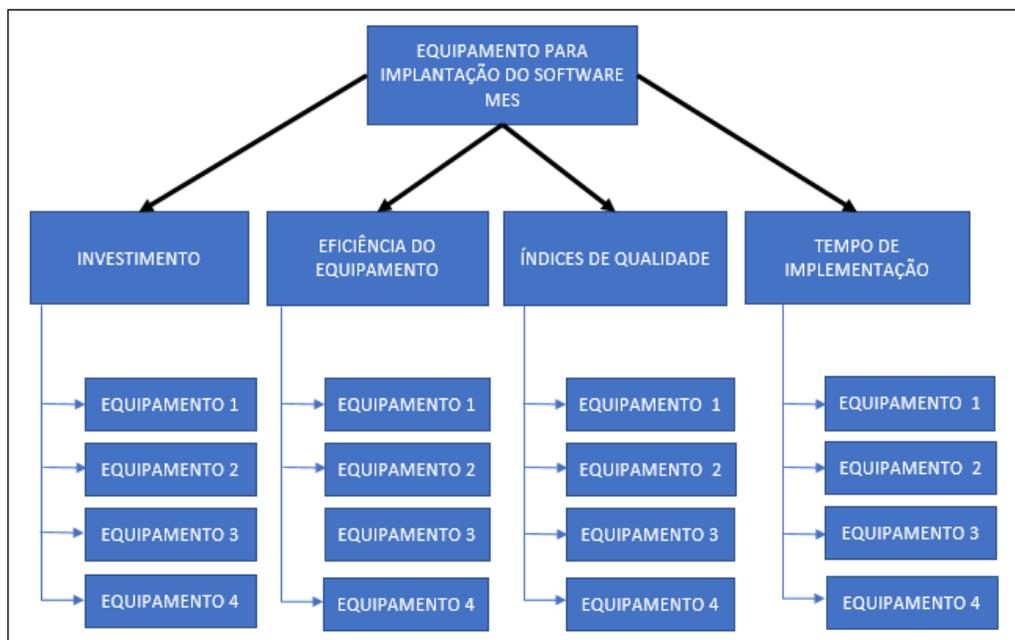
4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados dos cálculos realizados na análise com o emprego de cada um dos métodos propostos para priorização das alternativas. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos pelo emprego do método AHP e, na sequência, os resultados obtidos com o emprego do método TOPSIS.

4.1 Resultados do método AHP

Conforme etapas do método AHP descritas na seção 2.3, foi realizada a estruturação do problema para estabelecer a hierarquia e evidenciar as relações de influência entre os elementos de cada um dos níveis da estrutura do modelo. No caso estudado, são empregados quatro critérios e três alternativas de escolha, conforme mostrado na Figura 3:

Figura 3: Estrutura Hierárquica



Fonte: Autores

O próximo passo é a construção da matriz de comparação dos critérios de acordo com a escala fundamental apresentada no Quadro 1. A matriz resultante da análise realizada pelo grupo de decisores é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de Comparação

	Investimento	Eficiência	Qualidade	Tempo
Investimento	1	1/7	1/5	1/3
Eficiência	7	1	3	5
Qualidade	5	1/3	1	3
Tempo	3	1/5	1/3	1

Fonte: Autores

A seguir, é realizada a soma de cada coluna da matriz de comparação (equação (1)) e efetuada a respectiva normalização (equação (2)) para proceder com o cálculo do vetor de priorização dos critérios (equação (3)). Este cálculo forneceu os seguintes valores percentuais de priorização: *Investimento* com 5,7% de importância, seguido do critério *Tempo de Implantação* com 12,2%, já o critério

de *Qualidade* teve como resultado 26,3% e, por fim, a *Eficiência do Equipamento*, que se mostrou como sendo a mais relevante, com 55,8%.

O Índice de Consistência (CI) foi calculado de acordo com a equação (4) e teve como resultado o valor 0,05889, e assumindo-se o valor de 0,9 para o Índice Aleatório (RI), conforme a Tabela 1, é possível calcular a Razão da Consistência (CR), que teve como resultado o valor 0,065. Observa-se que este resultado não viola o nível aceitável de inconsistência dos julgamentos no valor de 0,10, conforme Saaty (2000).

Para o cálculo dos vetores de priorização das alternativas em relação a cada uma dos critérios presentes no modelo de decisão, foi utilizado um procedimento que faz uso dos próprios valores de desempenho das alternativas em cada um dos critérios. Com base nos valores reunidos na Matriz de Desempenho (Tabela 2), os valores das comparações par-a-par, que constituirão as matrizes de comparação das alternativas em relação a um critério k , seguem diferentes estratégias dependendo do tipo de critério. Se o critério é de maximização ou benefício, adota-se o cálculo descrito na equação (13). Por outro lado, se o critério for de minimização ou custo, adota-se o cálculo descrito na equação (14):

$$a_{ij}^k = \frac{a_i^k}{a_j^k}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (13)$$

$$a_{ij}^k = \frac{a_j^k}{a_i^k}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (14)$$

As matrizes de comparação geradas pela adoção desta estratégia e os respectivos vetores de priorização locais, obtidos pelo emprego do Método Aproximado, são apresentados no conjunto de Tabelas 4.

Tabela 4: Matrizes de Comparação das Alternativas e respectivos vetores de priorização

INVESTIM.	Equip. 1	Equip. 2	Equip. 3	Equip. 4	Priorização
Equipamento 1	1	0,80	1,44	1,75	0,2849
Equipamento 2	1,25	1	1,80	2,18	0,3549
Equipamento 3	0,69	0,56	1	1,21	0,1974
Equipamento 4	0,57	0,46	0,82	1	0,1628

EFICIÊNCIA	Equip. 1	Equip. 2	Equip. 3	Equip. 4	Priorização
Equipamento 1	1	1,15	0,92	1,10	0,2582
Equipamento 2	0,87	1	0,80	0,96	0,2255
Equipamento 3	1,09	1,25	1	1,19	0,2809
Equipamento 4	0,91	1,04	0,84	1	0,2354

QUALIDADE	Equip. 1	Equip. 2	Equip. 3	Equip. 4	Priorização
Equipamento 1	1	4,2	1,11	0,57	0,2561
Equipamento 2	0,24	1	0,26	0,14	0,0610
Equipamento 3	0,90	3,80	1	0,51	0,2317
Equipamento 4	1,77	7,40	1,95	1	0,4512

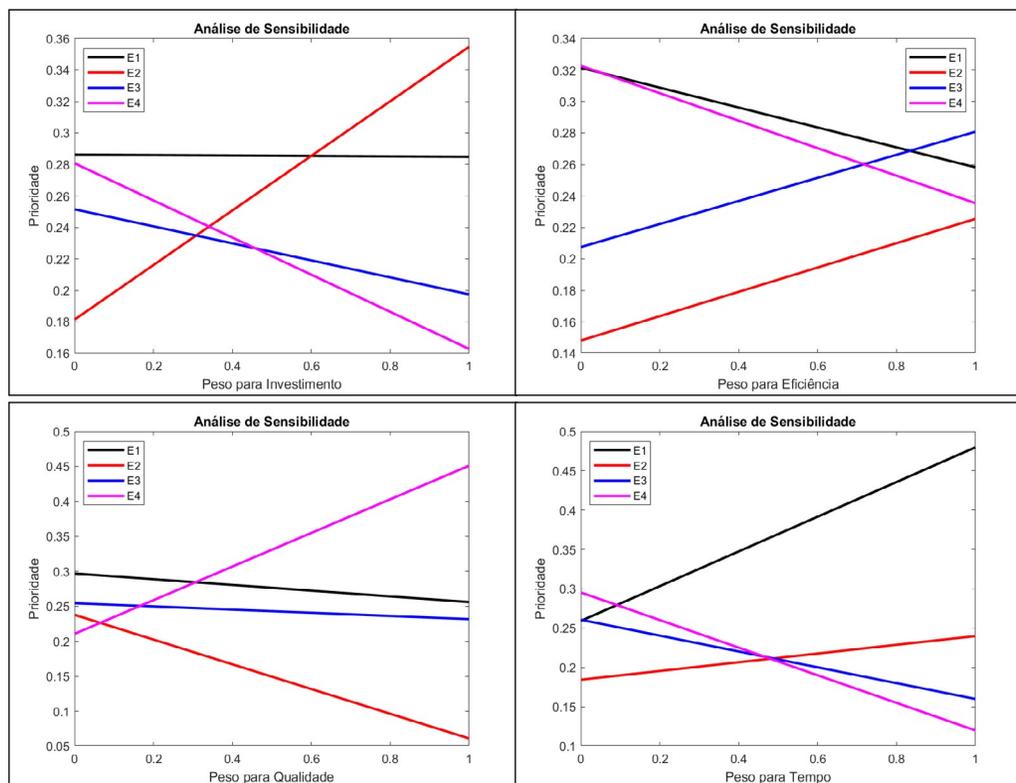
TEMPO	Equip. 1	Equip. 2	Equip. 3	Equip. 4	Priorização
Equipamento 1	1	2,00	3,00	4,00	0,4800
Equipamento 2	0,50	1	1,50	2,00	0,2400
Equipamento 3	0,33	0,67	1	1,33	0,1600
Equipamento 4	0,25	0,50	0,75	1	0,1200

Fonte: Autores

Uma vez obtidas as priorizações locais, isto é, a priorização de cada uma das alternativas em relação a cada um dos critérios, aplicou-se o cálculo da agregação e obtenção da priorização global. Aplicando o modo distributivo, de acordo com a equação (6), a seguinte ordem de priorização é obtida: com 28,6% o Equipamento 1 (E1) é o preferível, seguido do Equipamento 4 (E4) com 27,4%, depois o Equipamento 3 (E3) com 24,9% e, por último, o Equipamento 2 (E2), com 19,1% da preferência. Por outro lado, o cálculo das prioridades globais pelo emprego do modo ideal, de acordo com a equação (9), traz como resultado o Equipamento 2 (E2) com 36,2%, seguido do Equipamento 1 (E1) com 24,7%, após o Equipamento 3 (E3) com 20,7% e, por último o Equipamento 4 (E4) com 18,4% de preferência. Portanto, as alternativas estão assim ordenadas: $E1 > E4 > E3 > E2$.

A fim de avaliar a robustez da ordenação final, é recomendada a realização da Análise de Sensibilidade. Esta análise permite verificar se a ordenação é mantida quando assumida uma variação no peso de cada um dos critérios. Para cada critério, foi imposta uma variação entre 0 e 1 para o seu peso enquanto o valor do peso correspondente aos demais critérios é obtido pelo emprego da equação (7). A Figura 4 apresenta os gráficos da Análise de Sensibilidade em relação a cada um dos critérios definidos no modelo de decisão.

Figura 4: Gráficos da Análise de Sensibilidade - AHP



Fonte: Autores

A partir dos gráficos da Análise de Sensibilidade, observa-se que a ordenação das alternativas preferíveis (E1 e E4) não se altera quando considerada uma variação limitada dos valores originais dos pesos dos critérios *Investimento* e *Eficiência*. Porém, existe uma inversão de ordem destas duas alternativas quando considerada uma variação limitada dos valores originais dos pesos dos critérios *Qualidade* e *Tempo*. Este comportamento não se observa para as alternativas E3 e E2 quando assumidas pequenas variações dos valores originais dos pesos de qualquer dos critérios considerados no estudo. Com isso, pode-se concluir que a indicação das duas primeiras opções de equipamento (E1 e E4), originalmente identificadas para implantação do sistema MES, é suficientemente robusta.

4.2 Resultados do método TOPSIS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos pelo emprego do método TOPSIS, conforme detalhado na seção 2.4. O método TOPSIS é aplicado sobre a matriz de desempenho das alternativas em relação a cada um dos critérios, mostrada na Tabela 2. A primeira etapa de cálculo é representada

pela normalização dos desempenhos. A Tabela 5 mostra o resultado da etapa de normalização, obtido pela aplicação da equação (8). Observa-se que os resultados obtidos com o uso da normalização ideal (equações (12) e (13)) não serão apresentados.

Tabela 5: Matriz de desempenhos normalizada

	Investimento	Eficiência	Qualidade	Tempo
Equipamento 1	0,3837	0,4789	0,4481	0,1826
Equipamento 2	0,3080	0,5485	0,1067	0,3651
Equipamento 3	0,5537	0,4403	0,4055	0,5477
Equipamento 4	0,6717	0,5253	0,7896	0,7303

Fonte: Autores

Na sequência da aplicação do método TOPSIS, é calculada a matriz normalizada ponderada, conforme equação (9). Para este cálculo, foram empregados os pesos obtidos pelo emprego do método AHP e apresentados na seção 4.1. A matriz normalizada ponderada obtida é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Matriz de desempenhos normalizada ponderada

	Investimento	Eficiência	Qualidade	Tempo
Equipamento 1	0,0218	0,2672	0,1180	0,0223
Equipamento 2	0,0175	0,3060	0,0281	0,0445
Equipamento 3	0,0315	0,2456	0,1068	0,0668
Equipamento 4	0,0382	0,2931	0,2079	0,0890

Fonte: Autores

As soluções ideal e não-ideal são obtidas a partir do melhor e do pior valor de desempenho normalizado ponderado das alternativas em relação a cada critério, respectivamente, conforme definido na seção 2.4.3. Estas soluções são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Soluções ideal e não ideal

	Investimento	Eficiência	Qualidade	Tempo
A ⁺	0,0175	0,2456	0,2079	0,0223
A ⁻	0,0382	0,3060	0,0281	0,0890

Fonte: Autores

De posse das soluções ideal e não-ideal, são calculadas as distâncias entre cada uma das alternativas e as soluções de referência pelo emprego das equações (10) e (11), respectivamente. As distâncias calculadas para cada uma das alternativas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Distâncias ao ponto ideal e não-ideal

	Equipamento 1	Equipamento 2	Equipamento 3	Equipamento 4
d ⁺	0,0926	0,1910	0,1114	0,0844
d ⁻	0,1196	0,0491	0,1018	0,1803

Fonte: Autores

A última etapa do método TOPSIS é o cálculo do coeficiente de proximidade de cada alternativa com base nas distâncias calculadas, conforme a equação (12). Os resultados obtidos para estes coeficientes, bem como para a sua medida normalizada, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Coeficientes de proximidade

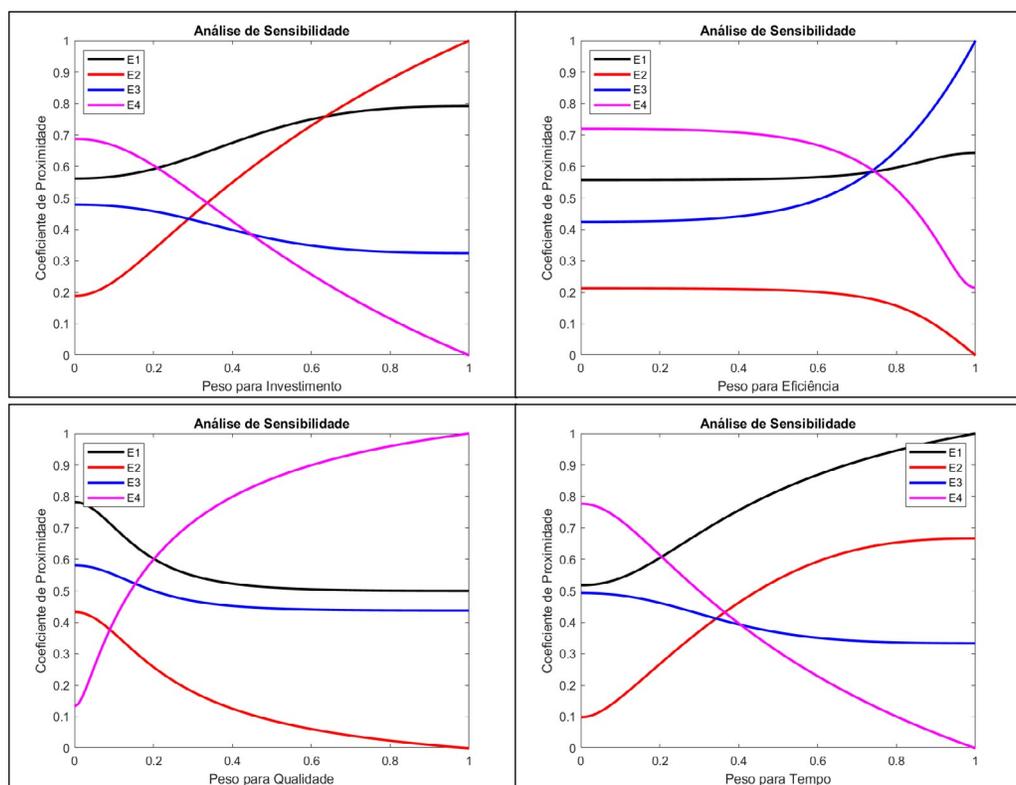
	Equipamento 1	Equipamento 2	Equipamento 3	Equipamento 4
C	0,5638	0,2044	0,4776	0,6810
C normalizado	0,2926	0,1061	0,2479	0,3534

Fonte: Autores

Com base nos valores apresentados, observa-se que a ordem de priorização obtida pelo emprego do método TOPSIS mostra o Equipamento 4 como o preferível, apresentando o maior valor para o coeficiente de proximidade, seguido pelo Equipamento 1, após o Equipamento 3, e com o pior valor do coeficiente de proximidade tem-se o Equipamento 2. Portanto, a ordenação final obtida é assim representada: $E4 > E1 > E3 > E2$.

Da mesma forma como realizado quando empregado o método AHP, a robustez da ordenação final obtida pelo método TOPSIS foi avaliada pela realização da Análise de Sensibilidade. A Figura 5 apresenta os gráficos da Análise de Sensibilidade em relação a cada um dos critérios definidos no modelo de decisão.

Figura 5: Gráficos da Análise de Sensibilidade - TOPSIS



Fonte: Autores

A partir dos gráficos da Análise de Sensibilidade, observa-se que a alternativa preferível (E4) tem sua posição na ordenação invertida com a alternativa E1, quando considerada uma variação limitada dos valores originais dos pesos dos critérios *Investimento*, *Qualidade* e *Tempo*. No caso da análise de sensibilidade do critério *Eficiência*, o de maior peso na análise, a inversão de ordem se daria com a alternativa E3, porém para variações acentuadas do peso deste critério, superiores 30%. Com isso, pode-se concluir que a designação das alternativas E4 ou E1 como o equipamento preferível para receber o sistema MES é robusta, não havendo indicativo de alteração quando assumidas ponderações próximas àquelas estipuladas originalmente para os critérios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção traz as considerações finais sobre os resultados obtidos pela aplicação dos métodos AHP e TOPSIS no apoio à decisão para a escolha de uma unidade produtiva ou equipamento para implantação do sistema MES. O comparativo dos resultados foi realizado a partir dos seguintes parâmetros: comparação das ordenações e pontuações obtidas com a aplicação de ambos os

métodos no mesmo problema de decisão, bem como, aspectos relacionados ao desenvolvimento e aplicação de cada método.

A Tabela 10 mostra o comparativo das pontuações e ordenações obtidas pelo emprego de cada um dos métodos utilizados:

Tabela 10: Comparativo dos resultados

Equipamento	AHP	TOPSIS	Ordenação	AHP	TOPSIS
1	28,6%	29,3%	1ª opção	Equip. 1	Equip. 4
2	19,1%	10,6%	2ª opção	Equip. 4	Equip. 1
3	24,9%	24,8%	3ª opção	Equip. 3	Equip. 3
4	27,4%	35,3%	4ª opção	Equip. 2	Equip. 2

Fonte: Autores

Com base nos resultados apresentados, observa-se que os métodos empregados forneceram ordenações diferentes. Porém, a diferença existe apenas nas duas primeiras posições da ordenação, onde os Equipamentos 1 e 4 aparecem como os preferíveis para receber a implantação do sistema MES, porém em ordem invertida de acordo com a técnica utilizada. Com relação às pontuações geradas por cada um dos métodos, observa-se que pelo método AHP as alternativas E1 e E4 apresentam valores próximos, sendo praticamente indiferente a escolha de uma opção ou outra. Por outro lado, a pontuação fornecida pelo método TOPSIS revela uma diferença entre estas duas alternativas, com uma preferência maior para a alternativa E4, que agora não se mostra tão próxima da alternativa E1.

Na aplicação dos métodos AHP e TOPSIS, em ambos foi utilizado o mesmo vetor de ponderação dos critérios, obtido pela avaliação par-a-par realizada pelo grupo de decisores, de modo que a diferença na ordenação se deve à forma como cada técnica combina os desempenhos individuais das alternativas em cada critério. A avaliação da importância de cada critério retrata a opinião de cada decisor, sendo esse juízo de valor refletido na ponderação destes critérios e, posteriormente, refletindo na ordenação final das alternativas. Esta observação é importante para destacar que o resultado obtido reflete o entendimento do grupo de decisores e o momento vivenciado pela empresa. Desta forma, conclui-se que ambos os métodos são adequados para aplicação da situação de escolha de um Equipamento para implantação do software MES.

Como sugestões para trabalhos futuros, indica-se a aplicação de algum método da escola francesa como, por exemplo, o PROMETHEE II ou ELECTRE II, o que traria à análise do problema avaliados aspectos ainda não considerados, como a incomparabilidade entre alternativas ou um limiar de veto para cada critério. Outra sugestão para avaliação futura seria o emprego de abordagens fuzzy das técnicas AHP e TOPSIS, onde é possível modelar incertezas, inerentes

ao processo decisório, tanto na etapa de ponderação dos critérios quanto na etapa de avaliação das alternativas.

REFERÊNCIAS

ARULDOSS, M.; LAKSHMI, T.M.; VENKATESAN, V.P. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. **American Journal of Information Systems**, v. 1, n. 1, p 31-43, 2013.

BEHZADIAN, M; OTAGHSARA, S.K.; YAZDANI, M; IGNATIUS, J. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 17, p. 13051-13069, 2012.

CALABRESE, A.; DORA, M.; GHIRON, N.L.; TIBURZI, L. Industry's 4.0 transformation process: how to start, where to aim, what to be aware of. **Production Planning & Control**, v. 33, n. 5, p 492-512, 2022.

DA SILVA, M.H.; WEBBER, C.G.; Análise Comparativa entre Plataformas para o Desenvolvimento da Indústria 4.0. **Scientia Cum Industria**, v.8, n.2, p. 115-122, 2020.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S. M. **Apoio à Decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. Insular, São Paulo, 2001.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria Decision Analysis: methods and software**. Wiley, 2013.

JASKÓ, S.; SKROP, A.; HOLCZINGER, T.; CHOVÁN, T.; ABONYI, J.; Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard and ontology based methodologies and tools. **Computers in Industry**, v. 123, p. 103300, 2020.

LIMA JUNIOR, F.R.; CARPINETTI, L.C.R.; Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.22, n.1, p 17-34, 2015.

MARCHEZETTI, A.L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M.C.B. Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 173-187, 2011.

MC CLELLAN, M. **Applying Manufacturing Execution Systems**, Boca Raton, USA, St. Lucie Press, 1997.

SAATY, T.L.; **Decision making for leaders**. Pittsburg, USA: WS Publications, 2000.

SAATY, T.L.; How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, T.L.; Making and validating complex decisions with the AHP/ANP. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 14, p. 1-36, 2005.

SOUZA DAS NEVES, J.M.; MARINS, F.A.S.; AKABANE, G.K.; KANAANE, R.; Deployment the MES (Manufacturing Execution System) Aiming to Improve Competitive Priorities of Manufacturing. **Independent Journal of Management & Production**, v. 6, n. 2, p. 449-463 2015.