LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Seleção de Impressoras 3D para Aplicações no Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV): Uma Abordagem Multicritério Inovadora

Igor Pinheiro de Araújo de Araújo Costa[1,2*], Rebeca Menezes Bezerra[1], Thaís Evelin Santos de Oliveira[1,2], Gabriel Custódio Rangel[1], Victor Benicio Ardilha da Silva Alves[1], Carlos Francisco Simões Gomes[2], Marcos dos Santos[2,3]

[1] Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV)
[2] Universidade federal Fluminense (UFF)
[3] Instituto Militar de Engenharia (IME)
*E-mail: costa_igor@id.uff.br

RESUMO

O avanço da tecnologia de impressão 3D tem desempenhado um papel revolucionário em uma ampla gama de setores. No entanto, a seleção adequada de impressoras 3D para atender às necessidades específicas do setor é um desafio complexo, devido à variedade de critérios envolvidos. Neste contexto, o presente estudo propôs uma metodologia inovadora chamada *Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors – Princpal Components* (SAPEVO-PC) aliado ao *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) para avaliar e priorizar impressoras 3D a serem empregadas no CASNAV. A relevância deste estudo é evidente tanto para a academia quanto para a sociedade. Academicamente, o estudo apresenta uma metodologia robusta que pode ser adaptada a diversas situações complexas, promovendo uma abordagem mais estruturada e racional para a tomada de decisões. Ademais, contribui para o avanço da pesquisa sobre impressão 3D, incentivando a inovação e a produção de formas complexas de maneira eficiente.

PALAVRAS CHAVE. SAPEVO-PC, CASNAV, Manufatura Aditiva, Apoio Multicritério à Decisão.

Tópicos: SE - Poder Marítimo, Defesa & Pesquisa Operacional; D&SP - PO em Defesa e Segurança Pública.

ABSTRACT

The advancement of 3D printing technology has played a revolutionary role in a wide range of industries. However, properly selecting 3D printers to meet industry-specific needs is a complex challenge due to the variety of criteria involved. In this context, the present study proposed an innovative methodology called Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors – Princpal Components (SAPEVO-PC) combined with the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to evaluate and prioritize 3D printers to be used at CASNAV. The relevance of this study is evident both for academia and society. Academically, this study presents a robust methodology that can be adapted to various complex situations, promoting a more structured and rational approach to decision-making. Furthermore, it contributes to the advancement of research on 3D printing, encouraging innovation and the efficient production of complex shapes.

KEYWORDS. SAPEVO-PC. CASNAV. Additive Manufacturing. Multicriteria Decision Aid.

Paper topics: SE - Maritime Power, Defense & Operational Research; D&SP - OR in Defense and Public Security.

1. Introdução

A Manufatura Aditiva (AM – *Additive Manufacturing*), comumente conhecida como impressão 3D, emergiu como uma tecnologia de fabricação inovadora com uma

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

presença crescente em uma ampla gama de setores, incluindo automotivo, aeroespacial e aplicações espaciais [Barad et al. 2023]. Esta tecnologia oferece inúmeras vantagens em comparação com métodos tradicionais de fabricação, incluindo economia de custos, redução no tempo de desenvolvimento de produtos e produção mais ágil, permitindo a criação de geometrias complexas de forma eficaz [Dohale et al. 2021].

Segundo Subramani et al. [2022], o princípio da fabricação aditiva surgiu completamente das lacunas de pesquisa dos conceitos de fabricação convencional, como a eliminação de desperdícios e a produção do componente camada por camada.

As tecnologias de impressão 3D definem a essência da AM e tornam possível a produção ágil de peças personalizadas a partir de diferentes materiais, com menor custo unitário e geração de resíduos [Drumond et al. 2021]. A tecnologia de impressão 3D é vista como uma alternativa às máquinas de fabricação convencionais tradicionalmente usadas no setor de manufatura [Subramani et al. 2022]. Atualmente, uma das tecnologias de impressora 3D mais difundidas é o tipo *Fused Deposition Modeling* (FDM), que operam adicionando camadas sucessivas de material para criar objetos físicos a partir de representações geométricas [Barad et al. 2023;Maity et al. 2023].

Neste contexto de inovação, destaca-se o Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), uma Instituição Científica, Tecnológica e de Inovação (ICT) da Marinha do Brasil (MB). A missão do CASNAV é realizar atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, a fim de contribuir para o desenvolvimento cientifico e tecnológico da MB e do País [CASNAV 2024]. Esta Organização Militar atua provendo soluções inteligentes, integradas, convergentes e interoperáveis, baseadas em estudos de problemas de alto nível, nas áreas prioritárias de Tecnologia da Informação, Pesquisa Operacional, Simulação, Criptologia e Segurança Cibernética [CASNAV 2024].

Uma das áreas de destaque do CASNAV é a Divisão de Modelagem e Simulação, que busca aumentar a eficácia operacional da MB pelo desenvolvimento de ferramentas de treinamento e análise, atuando na resolução de problemas reais por meio do uso de simuladores. Dentre os principais produtos criados pelo CASNAV no âmbito da simulação, destacam-se o Simulador de Passadiço, de Navegação de Paraquedas, Console de Imagens Táticas de Realidade Aumentada (CITRA) e o Veículo de Superfície Não Tripulado (VSNT). Para o desenvolvimento desses projetos, o CASNAV faz uso de impressoras 3D, principalmente para confecção de peças para seus simuladores e sensores de feedback do VSNT, de uma maneira eficiente e eficaz.

Embora a AM ofereça uma ampla variedade de materiais e processos, a escolha adequada das máquinas, modelagens e dos materiais é crucial para garantir a qualidade do produto final, suas propriedades mecânicas e outros fatores importantes [Algunaid e Liu 2022]. Neste contexto, para gerenciar de forma eficaz a seleção de materiais de AM, é comum a utilização de Métodos de Apoio Multicritério à Decisão (*Multicriteria Decision-Making* - MCDM) [Malaga et al. 2022].

As técnicas de MCDM representam um arcabouço que compreende uma série de abordagens formais com o propósito de incorporar a consideração explícita de múltiplos critérios na resolução de problemas, de forma a auxiliar stakeholders e grupos na exploração de decisões relevantes [Belton e Stewart 2002]. Os seus componentes fundamentais incluem um conjunto finito ou infinito de ações (também denominadas alternativas), pelo menos dois critérios e um Decisor (DM - *Decision Maker*). As principais problemáticas são seleção, ordenação ou classificação ordenada de ações disponíveis [Greco et al. 2016].

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

A seleção adequada de materiais, parâmetros de impressão e critérios específicos são muito importantes para aplicações de manufatura aditiva para uma ICT como o CASNAV. Neste sentido, as técnicas MCDM podem desempenhar um papel importante na avaliação de critérios conflitantes, como resistência mecânica, custo e capacidade de impressão. Em contextos em que a precisão e durabilidade são cruciais para atender aos requisitos técnicos e operacionais, a aplicação de técnicas MCDM auxilia na seleção de materiais ideais, processos de impressão e parâmetros para criar componentes de alta qualidade e precisão.

Algunaid e Liu [2022] destacam que o grande número de processos/máquinas de AM, materiais e a sobreposição entre eles, em termos de capacidade e funcionalidade, complicam a tarefa de seleção. Com isso, a metodologia proposta neste estudo visa superar esses desafios por meio da introdução de um novo método da família SAPEVO (*Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors*). O novo método denomina-se SAPEVO-*Principal Components* (SAPEVO-PC), e permite uma diminuição considerável das avaliações par a par necessárias para obter os pesos dos critérios. Para obtenção do ranking das impressoras será aplicado o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*).

Essa abordagem inovadora é projetada para reduzir significativamente o esforço cognitivo do decisor, aumentar a eficiência do processo de tomada de decisão e, ao mesmo tempo, aprimorar a consistência dos julgamentos, tornando-o mais confiável e eficaz na seleção de impressoras 3D para aplicações na área naval.

Em suma, este trabalho propõe uma abordagem multicritério híbrida para avaliar impressoras 3D, com foco nas aplicações do CASNAV. A intenção é desenvolver um método que permita a seleção adequada de impressoras 3D considerando múltiplos critérios, de forma a atender às demandas específicas desse setor em constante evolução. Essa abordagem visa combinar e aproveitar os pontos fortes de diferentes técnicas de avaliação multicritério, a fim de fornecer uma estrutura robusta e eficaz para a tomada de decisões relacionadas à escolha de impressoras 3D.

2 Referencial teórico

Nesta seção serão apresentados e discutidos os principais trabalhos publicados integrando AM e MCDM, com o intuito de identificar tendências e lacunas dos temas em lide, e como a metodologia proposta pode contribuir para uma tomada de decisão mais assertiva e confiável. Além disso, serão apresentados os principais conceitos referentes aos métodos SAPEVO, TOPSIS e o novo método proposto.

2.1 Métodos SAPEVO

O método SAPEVO, introduzido por Gomes e Gomes [1997], adota uma abordagem em que os dados de entrada são tratados de forma ordinal na avaliação de variáveis em um cenário específico. Em termos de métodos multicritério, esse enfoque viabiliza o processamento de dados que refletem a subjetividade do tomador de decisão.

Ao longo do tempo, diversos métodos da família SAPEVO foram sendo implementados. Introduzindo a integração dos modelos de sobreclassificação, surgiram abordagens híbridas como o PROMETHEE-SAPEVO-M1, desenvolvido por Moreira et al. [2021], e o ELECTRE-MOr, proposto por Costa et al. [2021]. Essas abordagens complexas de avaliação permitem analisar variáveis de natureza tanto quantitativa quanto qualitativa. Elas incorporam conceitos axiomáticos do método SAPEVO-M, possibilitando a avaliação de dados cardinais e ordinais (subjetivos) em processos de tomada de decisão.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

Adicionalmente, foi desenvolvida uma abordagem não compensatória denominada SAPEVO-M-NC, conforme Maêda et al. [2021], e uma versão baseada em uma estrutura hierárquica chamada SAPEVO-H², apresentada por Moreira et al. [2023]. Este último integra múltiplos decisores em uma abordagem de avaliação multinível, envolvendo variáveis de natureza quantitativa e qualitativa. Como resultado, essa família de métodos compreende seis tipos distintos de modelagens, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 – Família de modelos baseados no método SAPEVO com características técnicas.

Método	Compensatório	Não Compensatório	Ordinal	Cardinal	Ordenação	Classificação	Grupo
SAPEVO (Gomes e Gomes, 1997)	X		X		X		
SAPEVO-M (Gomes et al., 2020)	X		X		X		X
PROMETHEE-SAPEVO-M1 (Moreira et al., 2021)	X		X	X	X		
ELECTRE-MOr [Costa et al. 2021]	X		X	X		X	X
SAPEVO-M-NC [Maêda et al. 2021]		X	X		X		X
SAPEVO-H² [Moreira et al. 2023]	X		X	X	X		X

Fonte: [Moreira et al. 2022].

Analisando os dados da Tabela, verifica-se que os métodos da família SAPEVO representam um conjunto abrangente de abordagens que englobam as principais tipologias de problemas MCDM (ordenação, seleção e classificação). Esses métodos têm demonstrado sua flexibilidade e capacidade de adaptação a uma ampla gama de contextos de decisão, abordando desde questões de natureza quantitativa até aquelas de caráter mais qualitativo. No entanto, é importante ressaltar que, apesar da diversidade de aplicações e variações dentro da família SAPEVO, todos esses métodos compartilham uma característica fundamental: a realização de avaliações par a par dos critérios e alternativas. A eq. (1) apresenta a quantidade de avaliações par a par necessárias para aplicação dos métodos SAPEVO originais:

$$P = n * \left(\frac{n-1}{2}\right) \quad (1)$$

Em que P representa o número de avaliações par a par necessárias para obter os pesos de cada um dos critérios e pontuações de cada uma das alternativas à luz dos critérios qualitativos; n corresponde ao número de critérios e/ou alternativas analisados.

Em cenários de decisão que envolvem um número significativo de critérios e alternativas, é notório que o número de avaliações par a par cresce demasiadamente. Esse aumento na quantidade de comparações a serem realizadas pode gerar um considerável esforço cognitivo por parte dos decisores, tornando o processo de tomada de decisão mais desafiador e suscetível a inconsistências nos julgamentos. O acúmulo de avaliações paritárias pode sobrecarregar os decisores, tornando árdua a tarefa de manter a coerência e a precisão nas comparações. Essa complexidade é agravada em problemas complexos, como a seleção de impressoras 3D para aplicações no setor naval, em que a diversidade de critérios e a sobreposição entre máquinas e materiais podem amplificar o desafio da escolha apropriada.

Portanto, é imperativo que a metodologia proposta neste estudo leve em consideração a gestão eficaz desse aumento na carga cognitiva decorrente do crescente número de critérios e alternativas, ao mesmo tempo em que busca garantir a consistência dos julgamentos realizados pelos decisores. A abordagem híbrida SAPEVO-PC, que será introduzida neste artigo, representa uma evolução na família de métodos SAPEVO,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

visando proporcionar uma solução mais eficaz para a avaliação de impressoras 3D em uma ICT, considerando a complexidade inerente a esse cenário de tomada de decisão.

2.2 Método TOPSIS

O Método TOPSIS, proposto por Hwang e Yoon [1981], tem como objetivo ordenar as alternativas de acordo com a proximidade em relação à Solução Ideal Positiva (PIS). A alternativa mais adequada é aquela que se encontra mais próxima da SIP e mais distante da Solução Ideal Negativa (NIS). Para a sua aplicação, observa-se os seguintes passos:

I. Estabelecimento da Matriz de Decisão, que reflete as pontuações de cada alternativa em relação a cada critério avaliado;

II. Normalização da Matriz de Decisão;

III. Construção da Matriz de Decisão Normalizada Ponderada, na qual as matrizes ponderadas resultam da multiplicação dos pesos dos critérios pelas matrizes normalizadas;

IV. Determinação da PIS (A^+) e NIS (A^-), representando as Soluções Ideais Positiva e Negativa, de acordo com a eq. (2);

$$A^+ = \{p_1^+, p_2^+, \dots, p_m^+\}; \quad A^- = \{p_1^-, p_2^-, \dots, p_m^-\} \tag{2}$$

V. Cálculo das distâncias euclidianas entre cada alternativa e a PIS (D_i^+), eq. (3), e entre cada alternativa e a NIS (D_i^-), por meio da eq. (4);

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (p_{ij} - p_j^+)^2} \tag{3}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (p_{ij} - p_j^-)^2} \tag{4}$$

VI. Avaliação da proximidade relativa de cada alternativa em relação à alternativa ideal, por meio da eq. (5); e

$$C_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ - D_i^-} \tag{5}$$

VII. Obtenção do ranking das alternativas com base nos resultados obtidos.

2.3 Método SAPEVO-PC

Neste tópico, será apresentado o método SAPEVO-PC. Esta abordagem representa uma evolução dos métodos da família SAPEVO, e visa abordar o desafio de atribuir pesos aos critérios, considerando a perspectiva do DM. A principal contribuição do SAPEVO-PC é a introdução dos critérios conhecidos como Elemento Ideal Positivo (EIP) e Elemento Ideal Negativo (EIN) no processo de obtenção dos pesos dos critérios.

O método SAPEVO-PC é fundamentado na comparação par a par do EIP em relação aos demais critérios e destes em relação ao EIN, por meio de uma escala ordinal de sete pontos, apresentada na Tabela 2. Essa escala varia de 1 (Igualdade) a 7 (Absolutamente melhor/pior), permitindo que o DM estabeleça as preferências de forma qualitativa, conforme suas avaliações subjetivas.

Tabela 2 – Escala de comparações do método SAPEVO-PC.

Grau	Escala conceitual	Descrição
1	Igualdade	O EIP possui igual importância em relação a determinado componente
2	Importância Pequena	O EIP é ligeiramente mais importante em relação a determinado componente
3	Importância moderada	O EIP tem uma importância moderada em relação a determinado componente
4	Importância considerável	O EIP tem uma importância considerável em relação a determinado componente
5	Importância grande	O EIP tem uma importância grande em relação a determinado componente
6	Importância muito grande	O EIP tem uma importância muito grande em relação a determinado componente

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

7	Importância Absoluta	O EIP tem uma importância absoluta em relação a determinado componente

Para obtenção das comparações par a par dos critérios em relação ao EIN, serão atribuídos valores simétricos aos apresentados na Tabela acima, uma vez que este parâmetro é o pior entre todos os outros critérios em análise (todos os graus atribuídos ao EIN em relação aos demais serão negativos).

Abordando agora a quantidade de avaliações paritárias do SAPEVO-PC em relação aos demais métodos da família SAPEVO, verifica-se uma diminuição considerável. A eq. (6) apresenta a quantidade de avaliações par a par (K) necessárias para obtenção dos pesos dos critérios e avaliação das alternativas em critérios qualitativos aplicando o método SAPEVO-PC.

$$K = 2n - 3 \quad (6)$$

Em que n é a quantidade de critérios e/ou alternativas em avaliação.

A título de comparação, a Tabela 3 apresenta o número de comparações requeridas para aplicação dos métodos SAPEVO clássicos e o SAPEVO-PC, de acordo com a quantidade n de critérios:

Tabela 3: Comparação entre número de avaliações par a par

Número de critérios	SAPEVO clássico	SAPEVO-PC
2	1	1
3	3	3
4	6	5
5	10	7
6	15	9
7	21	11
8	28	13
9	36	15
10	45	17
11	55	19
12	66	21
13	78	23
14	91	25
15	105	27

Verifica-se que o SAPEVO-PC passa a ser vantajoso a partir de 4 critérios de avaliação, com a diferença ficando cada vez maior à medida que se aumenta o número de critérios e alternativas.

2.3.1 Passos do Método SAPEVO-PC

O processo de aplicação do SAPEVO-PC pode ser dividido em seis etapas:

Passo 1. Determine um conjunto de critérios de decisão. Nesta etapa, é definido o conjunto de critérios C = {C_1; C_2; …; C_n} que serão avaliados no processo decisório.

Passo 2. Determinar o melhor (mais desejável, mais importante) e o pior (menos desejável, menos importante) critérios. Nesta etapa, o tomador de decisão identifica o melhor e o pior dentre os critérios estabelecidos. Nenhuma comparação é feita nesta fase.

Passo 3. Determinar a preferência do melhor critério geral em relação aos demais critérios (A^+) usando a escala de 7 pontos apresentada na Tabela 2. O resultado da avaliação de precedência do melhor critério (EIP) em relação aos demais é apresentado por meio do vetor representado em (7):

$$A^+ = \{a_{P1}, a_{P2}, \dots, a_{Pn}\} \quad (7)$$

Em que a_{Pj} representa a preferência do melhor critério EIP sobre um determinado critério j, n representa o número de critério. Observa-se que o elemento $a_{PP} = 1$, pois representa a comparação do elemento EIP com ele próprio.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

Passo 4. Determinar a preferência de todos os critérios sobre EIN (A^-) usando os valores simétricos (multiplicados por -1) da Tabela 2. O resultado das avaliações de precedência dos demais critérios em relação ao EIN formam o vetor representado em (8):

$$A^- = \{a_{N1}, a_{N2}, \dots, a_{Nn}\} \quad (8)$$

onde a_{Nj} indica a preferência do critério j sobre o pior critério EIN. Ressalta-se que o elemento $a_{NN} = 1$, pois corresponde à comparação de EIN com ele mesmo.

Passo 5. Obter o elemento A^*, representado pela soma global de A^- e A^+ para cada critério, conforme (9):

$$A^* = \{(a_{N1} + a_{P1}), (a_{N2} + a_{P2}), \dots, (a_{Nn} + a_{Pn})\} \quad (9)$$

Esse termo representa o nível de precedência global de cada um dos critérios.

Passo 6. Calcular os valores de precedência normalizados A_N para cada critério, de acordo com o vetor (10):

$$A_N = \left\{\left(\frac{a_1^* - \min a_j^*}{\max a_j^* - \min a_j^*}\right), \left(\frac{a_2^* - \min a_j^*}{\max a_j^* - \min a_j^*}\right), \dots, \left(\frac{a_n^* - \min a_j^*}{\max a_j^* - \min a_j^*}\right)\right\} \quad (10)$$

onde a^*_j indica a soma dos elementos a_{Nj} e a_{Pj}. Ressalta-se que os valores normalizados obtidos variam de 0 a 1, com o peso do EIN sendo igual a 0 e EIP recebendo o peso máximo, igual a 1. Assim como nos modelos SAPEVO clássicos, tal normalização resulta em critérios com pesos iguais a 0, o que, conceitualmente, não faz sentido, pois isso não levaria tal critério em consideração na análise.

Para mitigar tal limitação, Gomes et al. [2020] propuseram atribuir o peso de 1% do menor valor subsequente. Entretanto, tais valores na prática ainda permanecem muito próximos de 0. Neste artigo, propõe-se atribuir ao critério com menor importância o peso de 20% do menor valor subsequente. Os resultados obtidos correspondem a pontuações cardinais dos critérios e/ou alternativas para os critérios qualitativos, tornando possível esclarecer as relações de preferências para cada variável em cada contexto de avaliação.

3. Metodologia

De acordo com a classificação proposta por Creswell e Creswell (2017), esta pesquisa pode ser caracterizada como qualitativa-quantitativa mista, combinando estudo de caso e modelagem matemática [Bertrand e Fransoo 2002]. O foco da investigação é a seleção de impressoras 3D a ser aplicada no CASNAV. A modelagem matemática foi conduzida por meio dos métodos SAPEVO-PC, para obtenção dos pesos dos critérios, e o método TOPSIS para gerar o ranking das impressoras avaliadas. Inicialmente, foram realizadas entrevistas com três especialistas em Manufatura aditiva, notadamente em impressoras 3D aplicadas em atividades de ciência e tecnologia.

A Tabela 4 apresenta os critérios considerados importantes para a análise proposta neste artigo.

Tabela 4: Apresentação e descrição dos critérios em análise.

Critério	Descrição
Volume útil	O volume de construção máximo da impressora 3D, que determina o tamanho máximo das peças que podem ser impressas. Geralmente medido em centímetros cúbicos (cm^3).
Nivelamento	O método de nivelamento da cama da impressora 3D pode ser manual (requer intervenção do usuário) ou automático (realizado pela própria impressora).
Mesa	O tipo de superfície de construção da impressora 3D pode ser feito de materiais como fibra de vidro, manta magnética, placa PEI, mesa de vidro etc.
Extrusor	O tipo de extrusor usado na impressora 3D pode ser do tipo "Bowden" (um tipo de alimentação direta) ou "Direct" (alimentação direta).
Temperatura máxima	A temperatura máxima que a impressora pode atingir é relevante para aplicações que envolvem materiais que requerem altas temperaturas.
Velocidade máxima	A velocidade máxima com a qual a impressora 3D pode imprimir é medida em milímetros por segundo (mm/s).
Custo	O custo total da impressora 3D inclui o preço de compra e os custos recorrentes, como materiais de impressão.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

Ainda com o auxílio dos especialistas, foi estabelecido o conjunto de impressoras para compor a matriz de decisão, ilustrada na Tabela 5. Avaliando os dados obtidos, verifica-se que três dos sete critérios apresentam natureza qualitativa e foram avaliados pelos decisores utilizando uma escala de 0 a 10.

Tabela 5: Matriz de decisão quantificada.

Alternativas/ Critérios	Volume útil	Mesa	Extrusor	Nivelamento	Temperatura máxima	Velocidade máxima	Custo
ENDER 3	12.1	7	4	3	260	120	1199
ENDER 3 V2 NEO	12.1	6	4	9	260	120	1999
ENDER 3 S1	13,068	6	9	9	260	150	2729
ENDER 3 S1 PRO	13,068	10	10	9	300	150	3499
ENDER 3 S1 PLUS	27	6	9	10	260	150	3899
ENDER 5 PLUS	49	8	4	4	260	150	5299
ENDER 6	25	8	4	3	260	180	5189
ENDER 7	18.75	7	4	3	260	180	5199
CR 5 PRO H	256.5	8	4	9	300	150	8999
CR 10 SMART	36	6	4	9	260	150	3399
CR 10 SMART PRO	36	10	10	9	300	150	5858
CR 30	150	4	4	6	240	100	5999
CR 5060 PRO	150	8	4	6	300	150	54900

As quantificações dos critérios qualitativos foram obtidas considerando as seguintes premissas:

- Extrusor do tipo Bowden recebeu uma pontuação baixa (4); extrusor Direct recebeu uma pontuação mais alta (9); extrusor Direct All Metal recebeu a pontuação máxima (10), de acordo com as diferenças de qualidade entre eles.
- As impressoras com mesas de melhor qualidade, como "Placa PEI" e "Mesa de vidro Carborundum," receberam pontuações mais altas.
- Impressoras com nivelamento automático receberam pontuações mais altas (9 a 10) porque são mais convenientes e eficientes. Ressalta-se que o nivelamento automático realizado por meio de Manta magnética é considerado menos preciso e estável em comparação com opções como Placa PEI ou Direct Drive All Metal.
- Impressoras com nivelamento manual receberam pontuações mais baixas (3 a 6) porque exigem mais intervenção do usuário e podem ser menos precisas.

4. Resultados

Nesta seção serão detalhados os resultados, de acordo com a metodologia proposta, que segue as seis etapas principais do SAPEVO-PC, além da etapa adicional de aplicação do método TOPSIS para geração do ranking. A análise teve início com a determinação do conjunto de critérios a serem considerados na decisão, no Passo 1: Volume útil, Nivelamento, Mesa, Extrusor, Temperatura máxima, Velocidade máxima e Custo.

Em seguida, no Passo 2, os especialistas identificaram o melhor (EIP) e o pior (EIN) critério. Neste contexto, o critério "Custo" foi identificado como o EIP, pois é o mais desejável, enquanto o critério "Temperatura Máxima" foi definido como o EIN, sendo o menos desejável.

Nos Passos 3 e 4, são estabelecidas as preferências do EIP (Custo) em relação aos demais critérios, e destes em relação ao EIN (Temperatura Máxima), utilizando a escala conceitual de 7 pontos do método SAPEVO-PC. Os resultados estão expressos numericamente na Tabela 6 e representam as relações de precedência.

Tabela 6: Relações de precedência entre critérios.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

	Critérios	Volume útil	Nivelamento	Mesa	Extrusor	Temperatura máxima	Velocidade máxima	Custo
EIP	**Custo**	2	4	3	4	6	5	1
EIN	**Temperatura máxima**	-5	-3	-4	-4	1	-2	-7

O critério Custo foi considerado pelos decisores como tendo: Importância pequena em relação ao Volume útil (Grau 2); Importância considerável em relação ao Nivelamento (Grau 4); Importância moderada quando comparado à Mesa (Grau 3); Importância considerável em relação ao Extrusor (Grau 4); Importância muito grande em relação à Temperatura Máxima (Grau 6); e Importância grande quando comparado à Velocidade Máxima (Grau 5). Ressalta-se que a atribuição do custo em relação a ele próprio é 1, pois representa igualdade entre os elementos.

Analisando a Temperatura máxima (EIN), chega-se às seguintes atribuições: Importância grande em favor do Volume útil (Grau -5); Importância moderada em favor do Nivelamento (Grau -3); Importância considerável em favor da Mesa (Grau -4); Importância considerável em favor do Extrusor (Grau -4); Importância pequena em favor da Velocidade Máxima; e Importância absoluta em favor do Custo (Grau -7, recíproca do valor atribuído ao custo em relação ao EIN). A atribuição do EIN relação a ele próprio também é 1, assim como na avaliação do EIP.

No Passos 5 e 6, são calculados os elementos A_G e A_N, que representam respectivamente a soma global das preferências e os valores normalizados dos pesos dos critérios. Esses valores indicam o nível de precedência global de cada critério em relação aos demais, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Obtenção de A_G e A_N.

	Critérios	Volume útil	Nivelamento	Mesa	Extrusor	Temperatura máxima	Velocidade máxima	Custo
EIP	Custo	2	4	3	4	6	5	1
EIN	Temperatura máxima	-5	-3	-4	-4	1	-2	-7
A_G		-3	1	-1	0	7	3	-6
A_N		0.77	0.46	0.62	0.54	0.06	0.31	1.00

Ressalta-se que, quanto menor o valor de A_G, maior a precedência de um critério em relação aos demais. Neste sentido, verifica-se que o EIP assume o menor valor absoluto (A_G igual a -6) e o EIN assume o maior valor (A_G igual a 7). No Passo 6, são calculados os valores de precedência normalizados para cada critério, considerando as ponderações obtidas. A normalização resultou em valores variando de 0 a 1, com o EIN, que originalmente receberia peso igual a zero, assumindo 20% do menor valor subsequente (Velocidade máxima), ou seja 20% de 0.31.

Após a obtenção dos pesos, por meio do método SAPEVO-PC, chega-se à análise das alternativas mediante o método TOPSIS para estabelecer o ranking final das impressoras 3D. Esse método considera as pontuações cardinais dos critérios para cada alternativa e fornece uma ordenação baseada na proximidade com os critérios ideais. A Tabela 8 apresenta a matriz de decisão para aplicação do método TOPSIS.

Tabela 8: Matriz de decisão para aplicação do TOPSIS.

Pesos	**20,5%**	**12,3%**	**16,4%**	**14,3%**	**1,6%**	**8,2%**	**26,6%**
Tipo	**MAX**	**MAX**	**MAX**	**MAX**	**MAX**	**MAX**	**MIN**
Alternativas	**Volume útil**	**Mesa**	**Extrusor**	**Nivelamento**	**Temperatura máxima**	**Velocidade máxima**	**Custo**
ENDER 3	12,1	7	4	3	260	120	1199
ENDER 3 V2 NEO	12,1	6	4	9	260	120	1999
ENDER 3 S1	13.068	6	9	9	260	150	2729
ENDER 3 S1 PRO	13.068	10	10	9	300	150	3499
ENDER 3 S1 PLUS	27	6	9	10	260	150	3899
ENDER 5 PLUS	49	8	4	4	260	150	5299

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

ENDER 6	25	8	4	3	260	180	5189
ENDER 7	18,75	7	4	3	260	180	5199
CR 5 PRO H	256,5	8	4	9	300	150	8999
CR 10 SMART	36	6	4	9	260	150	3399
CR 10 SMART PRO	36	10	10	9	300	150	5858
CR 30	150	4	4	6	240	100	5999
CR 5060 PRO	150	8	4	6	300	150	54900

Ressalta-se que o Critério Custo foi considerado de minimização, tendo em vista que se busca o menor valor possível para esse critério de avaliação. Os desempenhos das alternativas à luz de cada critério foram detalhados na seção anterior, enquanto os pesos foram calculados passo a passo pelo método SAPEVO-PC.

A Tabela 9 abaixo apresenta a matriz normalizada ponderada, obtida para o emprego do método TOPSIS, bem como as soluções ideais positivas (PIS) e negativas (NIS) para cada critério.

Tabela 9: Valores normalizados e soluções ideais positivas e negativas.

PIS	0,1449	0,0460	0,0729	0,0542	0,0050	0,0277	0,0056
NIS	0,0001	0,0184	0,0292	0,0163	0,0040	0,0154	0,2546
Alternativas	**Volume útil**	**Mesa**	**Extrusor**	**Nivelamento**	**Temperatura máxima**	**Velocidade máxima**	**Custo**
ENDER 3	0,0001	0,0322	0,0292	0,0163	0,0044	0,0185	0,0056
ENDER 3 V2 NEO	0,0001	0,0276	0,0292	0,0488	0,0044	0,0185	0,0093
ENDER 3 S1	0,1449	0,0276	0,0656	0,0488	0,0044	0,0231	0,0127
ENDER 3 S1 PRO	0,1449	0,0460	0,0729	0,0488	0,0050	0,0231	0,0162
ENDER 3 S1 PLUS	0,0003	0,0276	0,0656	0,0542	0,0044	0,0231	0,0181
ENDER 5 PLUS	0,0005	0,0368	0,0292	0,0217	0,0044	0,0231	0,0246
ENDER 6	0,0003	0,0368	0,0292	0,0163	0,0044	0,0277	0,0241
ENDER 7	0,0002	0,0322	0,0292	0,0163	0,0044	0,0277	0,0241
CR 5 PRO H	0,0028	0,0368	0,0292	0,0488	0,0050	0,0231	0,0417
CR 10 SMART	0,0004	0,0276	0,0292	0,0488	0,0044	0,0231	0,0158
CR 10 SMART PRO	0,0004	0,0460	0,0729	0,0488	0,0050	0,0231	0,0272
CR 30	0,0017	0,0184	0,0292	0,0325	0,0040	0,0154	0,0278
CR 5060 PRO	0,0017	0,0368	0,0292	0,0325	0,0050	0,0231	0,2546

Com isso, pode-se obter a similaridade de cada alternativa à solução ideal e consequente obtenção do ranking, conforme Tabela 10.

Tabela 10: Ranking final obtido.

Alternativas	Similaridade	Ranking
ENDER 3 S1 PRO	0,957027828	1
ENDER 3 S1	0,928027888	2
ENDER 3 S1 PLUS	0,623444535	3
ENDER 3 V2 NEO	0,618554146	4
CR 10 SMART PRO	0,617025248	5
ENDER 3	0,614088544	6
CR 10 SMART	0,612686155	7
ENDER 5 PLUS	0,597204647	8
ENDER 6	0,595819626	9
ENDER 7	0,594817055	10
CR 30	0,593267814	11
CR 5 PRO H	0,585074649	12
CR 5060 PRO	0,081278872	13

A análise do resultado de priorização das impressoras 3D, obtido pelo método TOPSIS, revela uma ordenação das alternativas com base em sua similaridade com a Solução Ideal Positiva (PIS) e distante da Solução Ideal Negativa (NIS). A ENDER 3 S1 PRO obteve a maior similaridade com a PIS, com um valor de 0,9570. Isso indica que, de

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

acordo com os critérios de avaliação e pesos estabelecidos pelo método SAPEVO-PC, essa alternativa é a mais próxima da solução ideal e, portanto, a mais indicada a ser adquirida para emprego no CASNAV.

O custo, por ser o critério com maior peso após aplicação do SAPEVO-PC, é um fator crucial na priorização. A alternativa CR 5060 PRO é a opção mais cara, e isso reflete em sua baixa posição no ranking. Por outro lado, as impressoras ENDER 3 e ENDER 3 V2 NEO têm classificações melhores, pois têm custos mais baixos em relação ao restante.

Avaliando a primeira colocada no ranking, a ENDER 3 S1 PRO, verifica-se classificações sólidas em vários critérios, incluindo extrusor, nivelamento e temperatura máxima. Além disso, tem um custo relativamente razoável, o que justifica sua escolha como a melhor alternativa.

Em resumo, a análise proposta neste artigo, por meio dos métodos SAPEVO-PC e TOPSIS, indica que a ENDER 3 S1 PRO é a alternativa mais adequada, seguida pela ENDER 3 S1. A ordenação das impressoras 3D reflete um resultado que se baseia em avaliações par a par dos critérios e no cálculo de pesos ponderados, levando em conta a opinião de especialistas na área. A metodologia permitiu uma análise mais precisa, levando em consideração as preferências e importâncias atribuídas a cada critério.

5. Considerações finais

A impressão 3D tem se mostrado uma tecnologia revolucionária, com aplicações em diversas áreas, e a área da saúde não é exceção. Este estudo se propôs a abordar a complexidade de selecionar a impressora 3D adequada para aplicações em ciência e tecnologia, levando em consideração uma variedade de critérios. Para atingir esse objetivo, foi desenvolvida e aplicada uma metodologia híbrida, composta pelos métodos SAPEVO-PC e TOPSIS, permitindo a priorização de alternativas de impressoras 3D com base em critérios múltiplos.

Os resultados da análise mostraram que a ENDER 3 S1 PRO é a impressora 3D mais recomendada para aplicações no CASNAV, considerando as opiniões especialistas consultados neste estudo, devido ao seu desempenho sólido em vários critérios, como extrusor, nivelamento e temperatura máxima, juntamente com um custo razoável.

À medida que a tecnologia de impressão 3D continua a evoluir e novos modelos de impressoras são lançados, essa metodologia pode ser uma ferramenta valiosa para atualizar a seleção de impressoras 3D no âmbito de uma ICT. Além disso, a incorporação de dados adicionais, como a durabilidade dos materiais impressos ou a confiabilidade da máquina em ambientes navais, pode enriquecer a análise.

Em suma, a pesquisa apresentada neste artigo fornece uma base sólida para a tomada de decisões na seleção de impressoras 3D, contribuindo para o avanço da tecnologia e sua adoção eficaz na construção e manutenção de simuladores. A customização de seus componentes e o desenvolvimento de soluções personalizadas continuarão a se beneficiar dessa evolução tecnológica, melhorando a eficiência na inovação proporcionada pelo CASNAV.

Referências

Algunaid, K. M. A., e Liu, J. (2022). Decision support system to select a 3D printing process/machine and material from a large-scale options pool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *121*(11–12), 7643–7659. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09362-2

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

Barad, S., Adapa, S. K., e Yanda, S. (2023). Experimental Optimization of Green FDM Process Parameters: An Integrated MCDM Approach. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 233–242. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4208-2_17

Belton, V., e Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science e Business Media.

Bertrand, J. W. M., e Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations e Production Management*, *22*(2), 241–264.

CASNAV. (2024). *Centro de Análises de Sistemas Navais*. Casrta de Serviços Do CASNAV. https://www.marinha.mil.br/casnav/

Costa, I. P. de A., Sanseverino, A. M., Barcelos, M. R. dos S., Belderrain, M. C. N., Gomes, C. F. S., e Santos, M. dos. (2021). Choosing flying hospitals in the fight against the COVID-19 pandemic: structuring and modeling a complex problem using the VFT and ELECTRE-MOr methods. *IEEE Latin America Transactions*, *19*(6), 1099–1106. https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9451257

Dohale, V., Akarte, M., Gupta, S., e Verma, V. (2021). Additive Manufacturing Process Selection Using MCDM. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 601–609). https://doi.org/10.1007/978-981-15-3639-7_72

Drumond, P., Basílio, M. P., Costa, I. P. de A., Pereira, D. A. de M., Gomes, C. F. S., e dos Santos, M. (2021). Multicriteria Analysis in Additive Manufacturing: An ELECTRE-MOr Based Approach. In *Modern Management based on Big Data II and Machine Learning and Intelligent Systems III* (pp. 126–132). IOS Press.

Gomes, C. F. S., Santos, M. dos, Teixeira, L. F. H. de S. de B., Sanseverino, A. M., e Barcelos, M. R. dos S. (2020). SAPEVO-M: a group multicriteria ordinal ranking method. *Pesquisa Operacional*, *40*. https://doi.org/10.1590/0101-7438.2020.040.00226524

Gomes, L. F. A. M., Mury, A. R., e Gomes, C. F. S. (1997). Multicriteria ranking with ordinal data. *Systems Analysis Modelling Simulation*, *27*(2–3), 139–145.

Greco, S., Figueira, J., e Ehrgott, M. (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of art surveys* (Vol. 37). Springer.

Hwang, C., e Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and application* (1st ed.). Springer.

Maêda, S. M. do N., Basílio, M. P., Costa, I. P. de A., Moreira, M. Â. L., dos Santos, M., e Gomes, C. F. S. (2021). The SAPEVO-M-NC Method. *Modern Management Based on Big Data II and Machine Learning and Intelligent Systems III*, 89–95. https://doi.org/10.3233/FAIA210235

Maity, M., Mondal, J. K., e Das, S. (2023). ANP–MOORA-Based Approach for Selection of FDM 3D Printer Filament. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 29–42. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7612-4_3

Malaga, A. K., Agrawal, R., e Wankhede, V. A. (2022). Material selection for metal additive manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, *66*, 1744–1749. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.272

Moreira, M. Â. L., Costa, I. P. de A., Pereira, M. T., dos Santos, M., Gomes, C. F. S., e Muradas, F. M. (2021). PROMETHEE-SAPEVO-M1 a Hybrid Approach Based on Ordinal and Cardinal Inputs: Multi-Criteria Evaluation of Helicopters to Support Brazilian Navy Operations. *Algorithms*, *14*(5), 140. https://doi.org/10.3390/a14050140

Moreira, M. Â. L., Gomes, C. F. S., Pereira, M. T., e dos Santos, M. (2023). SAPEVO-H2 a Multi-criteria Approach Based on Hierarchical Network: Analysis of Aircraft Systems for Brazilian Navy. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 61–74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09360-9_6

Moreira, M. Â. L., Junior, M. A. P. de C., Costa, I. P. de A., Gomes, C. F. S., dos Santos, M., Basilio, M. P., e Pereira, D. A. de M. (2022). Consistency Analysis Algorithm for the Multi-criteria Methods of SAPEVO Family. *Procedia Computer Science*, *214*, 133–140. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.158

Qin, Y., Qi, Q., Scott, P. J., e Jiang, X. (2020). An additive manufacturing process selection approach based on fuzzy Archimedean weighted power Bonferroni aggregation operators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *64*. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101926

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br

Ransikarbum, K., e Khamhong, P. (2021). Integrated Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution for Additive Manufacturing Printer Selection. *Journal of Materials Engineering and Performance*. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05816-y

Subramani, R., Kaliappan, S., Kumar, P. V. A., Sekar, S., Poures, M. V. D., Patil, P. P., e Raj, E. S. E. (2022). A Recent Trend on Additive Manufacturing Sustainability with Supply Chain Management Concept, Multicriteria Decision Making Techniques. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2022*. https://doi.org/10.1155/2022/9151839.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193769
https://proceedings.science/p/193769?lang=pt-br