

UMA ABORDAGEM DE APOIO À DECISÃO PARA PRIORIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA DE ENERGIA

Richard Alex da Cunha¹

Instituto Tecnológico de Aeronáutica/Universidade Federal de São Paulo
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos/SP, Brasil
richard.cunha@ga.ita.br

Mischel Carmen Neyra Belderrain²

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos/SP, Brasil
mischel.carmen@gp.ita.br

Jonatas Araujo de Almeida³

Universidade Federal de Pernambuco
Avenida Marielle Franco, Nova Caruaru, Caruaru/PE, Brasil
jonatasaa@yahoo.com.br

RESUMO

Este artigo propõe uma abordagem metodológica de apoio à decisão para a priorização de tecnologias emergentes na indústria de energia, com ênfase no segmento offshore. Utiliza-se o framework de 12 etapas para a modelagem de problema multicritério, associado ao método PROMETHEE-ROC, que facilita a elicitação de pesos com base na ordenação dos critérios. A metodologia foi aplicada a um estudo de caso em plataforma de petróleo e gás, envolvendo a avaliação de quatro soluções robóticas. A ordenação das alternativas foi realizada por meio do software PROMROCnRatio, considerando critérios não compensatórios definidos pelos decisores. A robustez dos resultados foi validada por meio de análise de sensibilidade com simulações de Monte Carlo e teste de hipótese de Kendall. Os resultados indicam superioridade da tecnologia ROV sem fio e demonstram que a abordagem proposta é eficaz para apoiar decisões tecnológicas complexas, contribuindo para a transformação digital e a inovação sustentável no setor-energético.

PALAVRAS CHAVE. Apoio à Decisão, Inovação Tecnológica, Indústria de Energia.

Tópicos (Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA), Inovação Tecnológica, Transformação Digital na Indústria de Energia)

ABSTRACT

This article proposes a methodological decision-support approach for prioritizing emerging technologies in the energy industry, with an emphasis on the offshore segment. It employs the 12-step framework for multicriteria problem modeling, combined with the PROMETHEE-ROC method, which facilitates weight elicitation based on the ranking of criteria. The methodology was applied to a case study on an oil and gas platform, involving the evaluation of four robotic solutions. The alternatives were ranked using the PROMROCnRatio software, considering non-compensatory criteria defined by decision-makers. The robustness of the results was validated through sensitivity analysis using Monte Carlo simulations and Kendall's hypothesis test. The findings indicate the superiority of the wireless ROV technology and demonstrate that the proposed approach is effective in supporting complex technological decisions, contributing to digital transformation and sustainable innovation in the energy sector.

KEYWORDS. Decision Support. Technological Innovation. Energy Industry.

Paper topics (Multicriteria Decision Aid (MCDA), Technological Innovation, Digital Transformation in the Energy Industry)

1. Introdução

A digitalização e os princípios da Indústria 4.0 têm sido os principais caminhos trilhados pelas grandes empresas da Indústria de Óleo e Gás (IOG) [Elijah et al. 2021]. Com o objetivo de acelerar sua jornada de inovação, as principais empresas do setor vêm adotando diferentes estratégias, tanto colaborativas quanto individuais [Dahlander and Gann, 2010]. Entre elas, destacam-se o early adopters program (EAP), no qual representantes compartilham ideias e garantem acesso antecipado a novas tecnologias [Anybotics 2022]; o Joint Industry Project (JIP), que promove cooperação entre parceiros para compartilhar riscos, custos e benefícios [Taurob 2022]; e o consórcio DeepStar, voltado ao desenvolvimento de tecnologias offshore com base nas necessidades conjuntas dos seus membros [Deepstar 2022; Deepstar 2023].

Apesar desses avanços, ainda persiste uma problemática crítica nas equipes de inovação da IOG: Como apoiar, de forma metodologicamente estruturada, o processo de tomada de decisão para a priorização de tecnologias com potencial de solucionar desafios operacionais críticos e, ao mesmo tempo, gerar valor tangível para a organização, considerando múltiplos objetivos e evitando trade-offs indesejados entre critérios de avaliação?

Este estudo concentra-se no setor upstream ou exploração e produção (E&P), especificamente em navios-plataforma do tipo FPSO (Floating Production, Storage and Offloading), onde se evidencia, na prática, a necessidade de implementação de soluções tecnológicas centradas nos trabalhadores, capazes de promover maior eficiência operacional, segurança, saúde ocupacional e redução de emissões de carbono, contribuindo, em última instância, para a adoção de práticas mais sustentáveis [Wanasinghe et al. 2021]. A vasta gama de tecnologias emergentes, aliada à complexidade dos ambientes offshore e às restrições técnicas e regulatórias, torna esse processo ainda mais desafiador [Prestidge, 2022]. Frequentemente, as iniciativas de inovação não alcançam os resultados esperados devido à escolha inadequada de tecnologias, ao desalinhamento com as reais necessidades operacionais ou à ausência de critérios robustos de priorização e avaliação de valor.

Diante desse cenário, este artigo tem como propósito contribuir para o aprimoramento do processo decisório relacionado à priorização tecnológica na IOG, especialmente no contexto de FPSOs. Ao abordar os desafios associados à multiplicidade de objetivos, à complexidade operacional e à necessidade de gerar valor tangível, a pesquisa busca preencher uma lacuna prática e teórica ainda pouco explorada na literatura: o desenvolvimento de abordagens sistematizadas e metodologicamente estruturadas para apoiar a ordenação de tecnologias emergentes alinhadas às necessidades reais dessa operação. Com isso, pretende-se fortalecer a efetividade das iniciativas de inovação tecnológica em ambientes offshore e promover avanços concretos na Transformação Digital (TD) do setor.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão da literatura sobre suporte à tomada de decisão no contexto organizacional, Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) e o método PROMETHEE-ROC. A Seção 3 descreve os métodos aplicados. A Seção 4 detalha o estudo de caso. A Seção 5 apresenta os resultados obtidos e a discussão. Por fim, a Seção 6 traz a conclusão, sintetizando os principais achados e sugerindo direções para pesquisas futuras.

2. Revisão da literatura

2.1 Suporte à tomada de decisão no contexto organizacional

Segundo [Almeida 2013] tomar decisões é uma responsabilidade fundamental das organizações e está entre as funções mais desafiadoras atribuídas aos gestores. Esse desafio está associado à forma como decisões influenciam diretamente os rumos organizacionais, afetando desde o desempenho operacional até a sustentabilidade estratégica da empresa. No contexto organizacional, decisões não ocorrem de forma isolada ou simplista. Frequentemente, envolvem múltiplos critérios que devem ser considerados simultaneamente, o que exige abordagens estruturadas para lidar com a complexidade envolvida. Conforme [Gomes e Gomes 2019] os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) são especialmente adequados para esse propósito, pois reconhecem a centralidade do decisor como agente responsável por expressar suas preferências, estabelecer prioridades e assumir as consequências de suas escolhas. Nesse processo, outros atores também participam, embora não detenham o poder formal sobre a decisão em si. Entre os principais envolvidos, destacam-se os analistas, que atuam como facilitadores e responsáveis pelo suporte

metodológico à decisão; os especialistas, que fornecem informações técnicas sobre o problema; e os clientes ou prepostos, que, em muitos casos, representam o decisor no processo de modelagem. Além disso, stakeholders exercem influência indireta, pressionando a organização com base em seus interesses ou sendo afetados pelas decisões tomadas. De acordo com [Roy 1996] esses atores como elementos que, mesmo sem autoridade formal, contribuem significativamente para o processo decisório ao incorporar dimensões sociais e políticas às escolhas organizacionais. Conforme apontam [Almeida 2013] e [Edwards et al. 2007] a análise da decisão pode ser conduzida sob diferentes perspectivas teóricas. A abordagem descritiva busca entender como os indivíduos realmente decidem, revelando comportamentos muitas vezes incompatíveis com a racionalidade ideal. A abordagem normativa, por outro lado, propõe modelos baseados em lógica e axiomas, como a Teoria da Utilidade Esperada formulada por [Von Neumann e Morgenstern 1944]. Já a abordagem prescritiva busca apoiar a prática decisória a partir de modelos normativos ajustados aos vieses e limitações observados na realidade. Complementar a essas visões, a abordagem construtivista, amplamente discutida na literatura de MCDA e reforçada por [Bouyssou et al. 2006], propõe que as preferências do decisor não estão previamente definidas, mas devem ser construídas ao longo de um processo iterativo com o analista. Nesse contexto, o modelo de decisão deixa de ser apenas uma representação técnica para se tornar um instrumento de aprendizagem e alinhamento com os objetivos do problema real. Essa abordagem é especialmente útil em ambientes organizacionais complexos, nos quais a subjetividade, os múltiplos interesses e a incerteza tornam necessária uma adaptação contínua. Assim, conforme argumenta [Almeida 2013], compreender a estrutura do processo decisório organizacional exige mais do que métodos formais: exige sensibilidade à realidade dos atores envolvidos, atenção às dimensões subjetivas da escolha e uso criterioso de métodos que favoreçam decisões mais informadas, participativas e coerentes com os desafios contemporâneos.

2.2 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA)

Conforme apontam [Gomes; Araya; Carignano 2011], até a metade do século XX, a resolução de problemas decisórios complexos era fortemente baseada na esperança matemática. Contudo, com os desafios impostos após a Segunda Guerra Mundial, especialmente em contextos logístico-militares, surgiram abordagens mais estruturadas, como a Pesquisa Operacional. A partir da década de 1970, diante da limitação dos modelos puramente matemáticos para lidar com múltiplos objetivos, emergem os MCDA, voltados a incorporar julgamentos de valor e preferências conflitantes no processo decisório.

Segundo [Almeida 2013] os MCDA são uma estrutura metodológica genérica, ou até mesmo uma teoria, que permite construir diferentes modelos de decisão para resolver variados tipos de problemas. Esses métodos possuem base axiomática e atendem a diferentes características de decisão, como seleção, ordenação, classificação, etc. De acordo com [El Beggat 2018], esses métodos foram desenvolvidos para atender às expectativas dos tomadores de decisão, ajudando-os a tomar a melhor decisão diante de várias alternativas ou ações avaliadas com base em um conjunto de critérios conflitantes. Além disso, conforme [Douplos e Zopounidis 2011] podem suportar várias etapas da tomada de decisão, incluindo estruturação de problemas, modelagem de preferências, construção de modelos de agregação de critérios e design de procedimentos de solução interativa. À luz de [Gomes; Araya; Carignano 2011], os principais conceitos que compõem o ambiente decisório incluem: I – atores; II – conjunto de escolha ou alternativas; III – Atributos ou critérios; IV – Pesos; V – Tipos de problema de decisão ($P\alpha$, $P\beta$, $P\gamma$, $P\delta$); e VI – Relações de preferência (I, P, Q, R ou NC, $\sim$, $>$, J, K, S).

Conforme [Rangel e Gomes 2009], na literatura muitas classificações são empregadas para designar os métodos MCDA. Dentre elas, e de maior repercussão, está a que subdivide os Métodos de Critério Único de Síntese e os Métodos de Sobreclassificação. Os Métodos de Critério Único de Síntese estão fundamentados na agregação de todas as informações acerca do problema que se pretende resolver por meio de uma grande síntese. Como exemplos podem-se citar os métodos da Teoria de Utilidade Multiatributo e os de análise hierárquica; dentre estes, o método AHP. Os Métodos de Sobreclassificação fundamentam-se na noção de relação de sobreclassificação, possuindo duas vertentes principais: os métodos ELECTRE e os métodos PROMETHEE.

Dessa forma, considerando a problemática abordada neste estudo, que envolve a comparação de um conjunto de alternativas com base em múltiplos critérios, optou-se pela aplicação do método PROMETHEE-ROC. Essa escolha se justifica pela racionalidade do tomador de decisão, que

prefere uma abordagem não compensatória, ou seja, que não admite que um desempenho inferior em um critério seja compensado por um desempenho superior em outro. Além disso, o método é adequado pela dificuldade específica do decisor em atribuir pesos precisos aos critérios, embora consiga ordená-los de acordo com sua relevância. O PROMETHEE-ROC se mostra particularmente apropriado nesse contexto, pois permite a eliciação dos pesos de forma mais intuitiva e robusta, a partir da ordenação dos critérios, sem exigir quantificações exatas ou maior capacidade cognitiva do decisor.

2.3 Método PROMETHEE - ROC

De acordo com [Gomes; Araya; Carignano 2011] o PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) é formado por uma família de métodos que tratam problemas multicritério discretos ou um conjunto de alternativas possíveis e finito. Nessa metodologia as alternativas são analisadas par a par para cada critério, até que a ordem seja definida, [Santos 2019].

A família PROMETHEE compreende diversas variantes, cada uma adaptada a diferentes contextos decisórios.

Segundo [Da Cunha et al. 2022; Gomes; Araya; Carignano 2011] a aplicação do método PROMETHEE pode ser realizada através das seguintes etapas conforme:

Etapas 1: Definir os tomadores de decisão, critérios j , alternativas m e ponderação dos pesos w_j de cada critério.

Etapas 2: Definir a função de preferência relativa para comparação de cada critério j .

Etapas 3: Calcular a função de preferência de cada critério j , para cada alternativa x_i e x_k por meio da equação 1:

$$P_j(x_i, x_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } g_j(x_i) > g_j(x_k) + p_j \\ 0, & \text{se } g_j(x_i) \leq g_j(x_k) + q_j \\ \frac{g_j(x_i) - g_j(x_k) - q_j}{p_j - q_j}, & \text{se } g_j(x_k) + q_j < g_j(x_i) < g_j(x_k) + p_j \end{cases} \quad (1)$$

Onde $P_j(x_i, x_k)$ é o valor da função de preferência da alternativa i sobre a alternativa k no critério j , $g_j(x_i)$ e $g_j(x_k)$ são respectivamente as performances das alternativa i e k na escala do critério j , e q_j e p_j são respectivamente os limiares de indiferença e de preferência para o critério j . A função preferência pode mudar o formato da equação, de maneira que o critério usual não possui limiares, que seriam considerados nulos na equação 1, por exemplo. As funções de nível e gaussiana também apresentam formatos diferentes, conforme pode ser observado em [Brans et al. 1986].

Etapas 4: Calcular o índice de preferência, S_{ik} pela equação 2:

$$S_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j P_j(x_i, x_k)}{\sum_{j=1}^n w_j} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j P_j(\delta_{ik})}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (2)$$

No cálculo do índice de preferência S_{ik} da alternativa x_i comparada à alternativa x_k , busca-se realizar a soma de P_j nas quais x_i é preferível a x_k . Essa soma é ponderada pelos pesos de cada critério, w_j , onde n representa o número total dos critérios.

Etapas 5: Calcula-se os fluxos de superação positivos e negativos de cada alternativa x_i . O fluxo de superação positivo, denotado por, Φ_i^+ se refere a como x_i supera as demais alternativas, desse modo representa a média de todos os graus de sobreclassificação de x_i com respeito a todas as outras alternativas; de modo que quanto maior esse fluxo, melhor será a alternativa. Já o fluxo de superação negativo, Φ_i^- , está associado a como a alternativa x_i é superada pelas demais, logo é representado pela média de todos os graus de sobreclassificação das outras alternativas sobre x_i . Através do fluxo de superação pode-se obter a pré-ordem parcial das alternativas (PROMETHEE I), onde cada relação, para existir, deve respeitar, no mínimo, uma das condições citadas. As relações de fluxo positivo e negativo são descritas das seguintes formas:

x_i estritamente preferível a x_k , se	x_i incomparável a x_k , se	x_i incomparável a x_k , se
$\phi_i^+ > \phi_k^+$ e $\phi_i^- < \phi_k^-$	$\phi_i^+ = \phi_k^+$ e $\phi_i^- = \phi_k^-$	$\phi_i^+ > \phi_k^+$ e $\phi_i^- > \phi_k^-$
$\phi_i^+ > \phi_k^+$ e $\phi_i^- = \phi_k^-$		$\phi_i^+ < \phi_k^+$ e $\phi_i^- < \phi_k^-$
$\phi_i^+ = \phi_k^+$ e $\phi_i^- < \phi_k^-$		

Para o cálculo do fluxo total ou líquido para cada alternativa x_i aplica-se: $\phi_i = \phi_i^+ - \phi_i^-$

Com base no indicador ϕ_i , as alternativas são organizadas em ordem decrescente, estabelecendo uma pré-ordem completa entre as alternativas (PROMETHEE II). Para que o método PROMETHEE II possa gerar a ordenação das alternativas, é necessário definir previamente os pesos atribuídos a cada critério, os quais refletem a importância relativa desses critérios no contexto da decisão. Esses pesos, geralmente fornecidos pelo decisor, desempenham um papel fundamental no cálculo do grau de sobreclassificação entre as alternativas. Entretanto, o processo de atribuição de valores precisos para os pesos pode ser cognitivamente exigente, tornando-se uma tarefa complexa, especialmente em situações com múltiplos critérios e decisões subjetivas. Para reduzir essa carga cognitiva e tornar o processo de elicitação mais acessível, foi proposto o método PROMETHEE-ROC [Clemente 2015; Morais et al. 2015].

O PROMETHEE-ROC resulta da integração entre o método PROMETHEE II e a técnica Rank-Order Centroid (ROC), que utiliza informações ordinais fornecidas pelo decisor para gerar pesos substitutos. Essa abordagem mantém uma lógica de decisão não compensatória, permitindo a priorização das alternativas com base em seu desempenho relativo, sem exigir do decisor a atribuição exata dos pesos aos critérios [Clemente 2015]. A determinação dos pesos substitutos no método ROC é realizada por meio da equação 3, em que n representa o número total de critérios, j indica a posição do critério conforme a ordenação estabelecida pelo decisor, e w_j é o peso substituto atribuído ao critério j :

$$w_j = \frac{1}{n} \sum_{l=j}^n \frac{1}{l} \quad (3)$$

Essa fórmula simplifica o processo de ponderação ao transformar o ranqueamento ordinal dos critérios em pesos numéricos proporcionais, sem a necessidade de julgamento quantitativo direto por parte do decisor. Na seção a seguir, descreve-se em detalhe a metodologia adotada e sua aplicação ao contexto investigado.

3. Métodos

Sob a ótica [Almeida 2013], através de um modelo de decisão busca-se representar sistemas reais de forma estruturada, permitindo análises que ajudem a compreender o funcionamento e desempenho desses sistemas. Um modelo simples pode distorcer a realidade e levar a decisões erradas. Entretanto, um modelo complexo pode ser tornar intratável, ou difícil de entender, aplicar ou utilizar na prática. O que nos remete a necessidade de se encontrar um meio-termo, onde um modelo deva ser suficientemente realista para ser útil, mas simples o bastante para ser compreendido e operacionalizado. Além disso, esse modelo deve representar de forma simplificada o problema de decisão, os múltiplos objetivos, estrutura de preferências do decisor e desenvolvido com base em algum método de apoio a decisão. Segundo [Gomes; Araya; Carignano 2011], um MCDA corresponde a uma abordagem metodológica ou a um arcabouço teórico, fundamentado em uma base lógica bem definida, que possibilita a construção de um modelo de decisão voltado à resolução de um problema decisório específico. Esses métodos apresentam uma característica mais genérica e se aplicam a uma classe mais ampla de problemas de decisão do que os modelos de decisão que são mais específicos e incorporam as preferências do decisor.

Para esta pesquisa, foi desenvolvido um modelo de decisão e adotado um MCDA associado. O modelo desenvolvido baseou-se no framework de 12 etapas para a modelagem de problemas de decisão multicritério, proposto por [De Almeida et al. 2021], que o traduziu em um Sistema de Informação (SI). Esse SI dá suporte à definição do problema, identificação de alternativas, critérios e consequências, bem como à identificação da racionalidade do decisor.

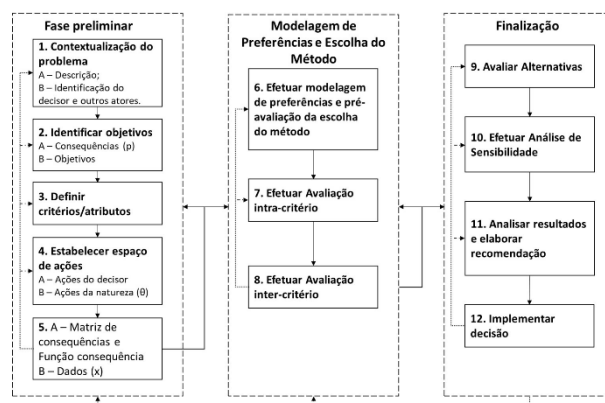


Figura 1 – Framework de 12 etapas. Fonte: [De Almeida et al. 2021]

O método MCDA adotado foi o PROMETHEE-ROC, cuja aplicação foi realizada por meio do software PROMROCnRatio. Trata-se de um sistema de informação desenvolvido para apoiar problemas de ordenação, baseado na integração do método PROMETHEE II com o ROC e a abordagem por ratio, com o objetivo de reduzir o esforço necessário na elicitação dos pesos em problemas de decisão [Moraes et al. 2015]. Para o levantamento da situação-problema, identificação dos atores envolvidos, múltiplos objetivos e estrutura de preferências do decisor, foram conduzidas entrevistas focalizadas. Esse tipo de entrevista centra-se em um tema específico, permitindo que o entrevistado se expresse livremente, mas com a intervenção do entrevistador quando há desvios em relação ao tema central [Gil 2008].

4. Estudo de caso

O modelo de apoio à decisão foi estruturado com base nas 12 etapas do framework proposto por [De Almeida et al. 2021], adotado como referência metodológica para garantir a consistência e a rastreabilidade das decisões. Em razão da extensão do conteúdo detalhado, todas as etapas não são detalhadas neste artigo. No entanto, é apresentado as principais fases do processo, com o objetivo de facilitar a compreensão do leitor.

O problema analisado foi identificado em uma empresa de grande porte da IOG, cujo nome é mantido em sigilo por questões de confidencialidade. A companhia busca acelerar seu processo de TD no segmento E&P, por meio da colaboração com empresas tecnológicas consolidadas. Para isso, foi lançado um edital com o objetivo de identificar e testar soluções tecnológicas maduras voltadas à resolução de desafios operacionais críticos em suas unidades do tipo FPSO. Em resposta ao edital, diversas propostas foram apresentadas, das quais quatro soluções robóticas se destacaram ao obter resultados positivos em testes de campo. A partir desse ponto, tornou-se necessário estabelecer uma ordenação dessas soluções com base em seu potencial de geração de valor, a fim de orientar a execução da segunda fase do projeto, que envolve a implantação e a ampliação do uso dessas tecnologias em toda a companhia. A configuração do processo decisório envolveu um único decisor formal (gerente de operações), pela ordenação das soluções. Seu processo de tomada de decisão foi influenciado por um grupo de assessores que normalmente o apoiam em etapas de seleção, testes e implementação de soluções. Além disso, o decisor contou com o suporte de consultores especializados em cada uma das tecnologias propostas, que contribuem com análises técnicas específicas. Por fim, um analista atuou como facilitador, interagindo com todos os atores envolvidos, promovendo o entendimento do problema, organizando as informações relevantes e oferecendo suporte metodológico ao processo decisório (Etapa 1)

A definição dos objetivos, critérios (incluindo nome, direção de preferência, natureza das consequências, tipo e escala), alternativas (soluções e respectivas escalas aplicadas), matriz de consequências e função de preferência foi realizada por meio de entrevistas com os assessores, consultores e consolidada junto ao decisor.

Critérios	Tipos	Níveis	Unidade de medida	Direção	Natureza da consequência	Tipos de escala
C1 - Produtividade	Construído	5	N/A	Maximização	Determinístico	Escala numérica
C2 - Tempo de Inatividade	Construído	5	N/A	Minimização	Determinístico	Escala numérica
C3 - Qualidade do Produto ou Serviço	Construído	5	N/A	Maximização	Determinístico	Escala numérica
C4 - Homem Exposto ao Risco	Construído	5	N/A	Minimização	Determinístico	Escala numérica
C5 - Emissão gases poluentes	Construído	5	N/A	Minimização	Determinístico	Escala numérica
C6 - Nível de maturidade tecnológica	Construído	5	N/A	Maximização	Determinístico	Escala numérica

Tabela 1 – Etapa 3. Fonte: autor

Alternativas	Descrição	Modelos
Alternativa 1	Robô quadrúpede para inspeção de equipamentos e instrumentos	
Alternativa 2	Drone aéreo para transporte de pequenas cargas	
Alternativa 3	Drone marítimo para transporte de pequenas cargas	
Alternativa 4	ROV sem fio para inspeção de cascos, tubulações, válvulas e poços	

Tabela 2 – Etapa 4. Fonte: Anybotics, SwissDrones, TideWise e Hydromea (2025)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	3	4	3	3	2	4
A2	5	2	4	3	3	5
A3	4	2	4	3	3	4
A4	5	2	5	1	1	5

Tabela 3 – Etapa 5. Fonte: autor

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam, respectivamente, os critérios utilizados, as alternativas consideradas e a matriz de consequências elaborada com base no julgamento do decisor. Neste problema, optou-se por empregar, para todos os critérios, a função de preferência *V-shape with indifference criterion* (PROMROCnRatio) ou Tipo V: *Criterion with linear preference and indifference area* [Brans et al. 1986, p. 231], (Etapa 7). Essa função representa a forma como o decisor percebe gradualmente a superioridade de uma alternativa sobre outra com base na diferença de desempenho entre elas. Essa função assume que, até um certo limiar q , as diferenças são pequenas demais para justificar qualquer preferência (zona de indiferença). Entre q e outro limiar maior p , a preferência cresce de forma linear, quanto maior a diferença, maior a preferência. Quando a diferença atinge ou supera p , considera-se que há preferência estrita pela alternativa superior. Os limiares de indiferença ($q = 0,5$) e de preferência ($p = 1,5$) adotados nesse estudo foram definidos com base na escala discreta de 1 a 5 utilizada na matriz de consequências. A definição desses valores ocorreu a partir de entrevistas com o decisor, que indicou que diferenças

inferiores a 0,5 ponto são imperceptíveis e não justificam preferência, ao passo que diferenças iguais ou superiores a 1,5 ponto já são claramente significativas. Dessa forma, o intervalo entre q e p representa uma zona de preferência crescente, ajustada à sensibilidade subjetiva do decisor e à granularidade da escala

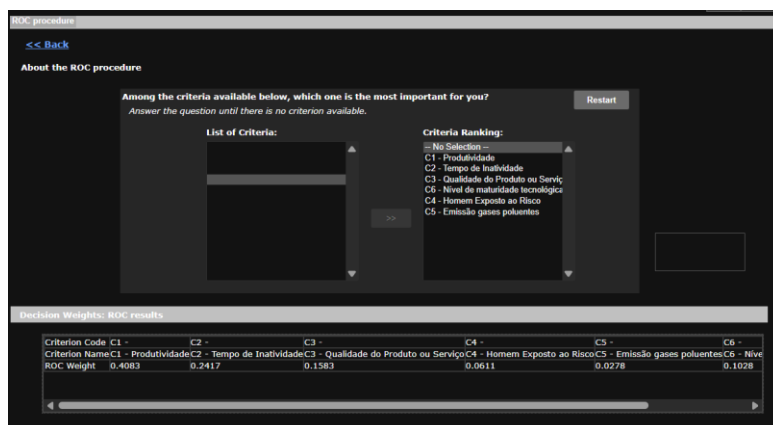


Figura 2 – Etapa 8. Fonte: SI PROMROCNRatio

A Figura 2 apresenta a ordenação de critérios por ordem decrescente de importância (parte superior), conforme julgamento do decisor, e o processo de elicitación automática dos pesos (parte inferior) realizado pelo software PROMROCNRatio.

5. Resultados e discussão

Considerando a problemática envolvida, os critérios (grau de importância, funções de preferência), o número de alternativas e o método aplicado (PROMETHEE-ROC) o sistema PROMROCNRatio apresentou a seguinte ordenação preliminar de alternativas conforme Figura 3 (Etapa 9).

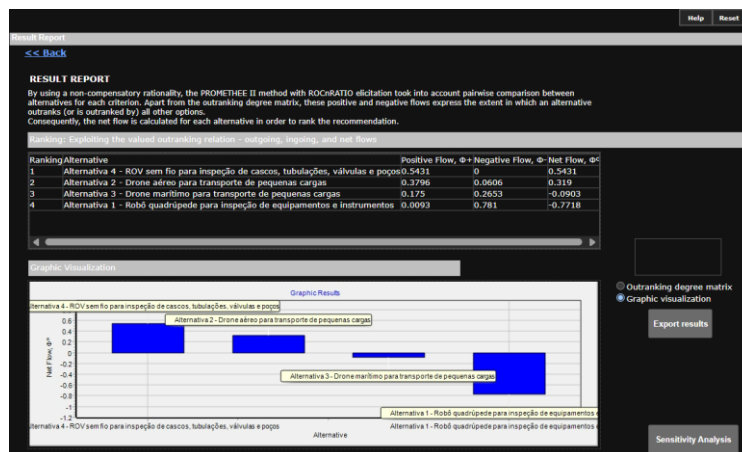


Figura 3 – Etapa 9. Fonte: SI PROMROCNRatio

Após a ordenação preliminar obtida na Figura 3 é recomendável a realização de uma análise de sensibilidade com o objetivo de verificar a robustez dos resultados frente às variações nos dados de entrada e nos parâmetros utilizados no modelo de decisão. Em problemas de ordenação, é essencial avaliar o impacto de possíveis alterações na hierarquia das alternativas [Almeida 2013]. Para isso, foi utilizado o módulo de análise de sensibilidade do PROMROCNRatio, que emprega a técnica de simulação de Monte Carlo. Essa abordagem realiza mil simulações, nas quais as entradas do modelo (matriz de consequências e pesos dos critérios) são ajustadas aleatoriamente dentro de limites previamente definidos pelo decisor. Cada simulação gera um novo ranqueamento, o qual é comparado ao ranqueamento original por meio do teste de hipótese de Kendall. Essa comparação permite identificar a frequência com que cada alternativa mantém sua posição original, bem como aquelas que apresentam maior sensibilidade a pequenas variações, caracterizando menor robustez.

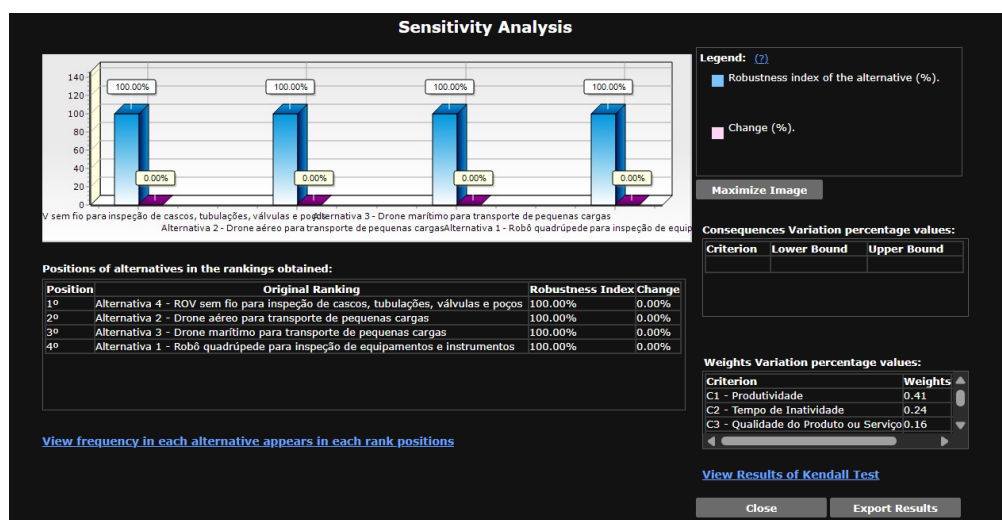


Figura 4 – Etapa 10. Fonte: SI PROMROCNRatio

A Figura 4 apresenta os resultados da análise de sensibilidade do SI PROMROCNRatio. Conforme pode ser observado (canto inferior direito) o peso de todos os critérios foram variados (percentuais acima de 10%) e como resultado verificou-se que todas as alternativas se mantiveram 100% na posição original. Após o resultado da análise de sensibilidade foi aplicado o teste de hipótese de Kendall que apresentou rejeição da hipótese nula (ou seja, confirmou correlação entre os rankings) em todos os níveis de significância acima de 0,01. Apenas no nível mais rigoroso (1%), não foi possível confirmar a associação entre o ranking original e os obtidos na análise de sensibilidade. Isso indica que a ordenação das alternativas é robusta na maioria dos cenários, especialmente considerando níveis de significância convencionais ($\alpha = 0,05, 0,10, 0,15$ etc.). No entanto, a não rejeição da hipótese nula em $\alpha = 0,01$ sugere que, sob uma exigência estatística extremamente rigorosa, a estabilidade da ordenação pode ser sensível a pequenas variações nos pesos dos critérios.

Com base nas necessidades da empresa, nos desafios enfrentados e nas soluções disponíveis pré-selecionadas, a análise indicou que a melhor opção para implantação em unidades FPSO é o equipamento ROV sem fio para inspeção (alternativa 4). Essa indicação apresenta os seguintes pontos de destaque: a tecnologia promove alta produtividade, qualidade dos serviços e apresenta alto nível de maturidade. Além disso, minimiza a exposição de profissionais a risco de operações submarinas (mergulhadores) e oferece baixa emissão de CO₂. Entretanto, das quatro opções analisadas, a que apresentou menor potencial de valor ao negócio foi o robô quadrúpede, voltado à inspeção de equipamentos e instrumentos (alternativa 1). Apesar de ter passado nos testes de campo e ser bem aceito em operações reais, ele ainda traz pouca vantagem nos critérios mais importantes indicados pelos decisores. Assim, recomenda-se focar na implantação do ROV sem fio neste momento. Já o robô quadrúpede pode ser reavaliado em ciclos futuros de inovação, caso apresente avanços nos impactos operacionais (Etapa 11).

A etapa de implementação da decisão (Etapa 12) demanda atenção especial a diversos fatores críticos que influenciam diretamente o sucesso da adoção das soluções selecionadas. É essencial que haja um planejamento operacional estruturado, com definição clara das atividades, prazos, responsáveis e etapas de execução nos ambientes operacionais designados. Devem ser consideradas eventuais adequações técnicas na infraestrutura existente, abrangendo elementos como sistemas de suporte, comunicação, fornecimento de energia e logística.

Outro aspecto fundamental é a capacitação das equipes envolvidas, garantindo que os profissionais estejam devidamente treinados para operar, manter e interagir com a nova tecnologia de forma segura e eficiente. Além disso, a gestão da mudança deve ser conduzida de maneira sistemática, preparando os colaboradores para os novos processos, mitigando resistências e promovendo o engajamento organizacional. Após a implantação, torna-se indispensável o monitoramento do desempenho das soluções, com base em indicadores previamente definidos, como eficiência operacional, mitigação de riscos, produtividade e sustentabilidade. A revisão contínua das soluções também se faz necessária, permitindo ajustes e melhorias conforme o uso e o aprendizado organizacional evoluem. A observância rigorosa desses aspectos fortalece a governança da

inovação, amplia a efetividade da decisão tomada e contribui para o alcance de resultados concretos alinhados à estratégia da organização.

6. Conclusão

Este artigo abordou a necessidade crítica da IOG de aprimorar seus processos de tomada de decisão para a priorização tecnológica, especialmente no contexto de unidades FPSO, frente aos desafios de transformação digital, sustentabilidade e eficiência operacional. A partir da revisão da literatura, evidenciou-se a lacuna na aplicação prática de métodos sistematizados para apoiar a ordenação de tecnologias emergentes, capazes de atender múltiplos objetivos sem comprometer critérios essenciais.

Buscando responder à questão central da pesquisa, foi desenvolvido e aplicado um modelo de decisão baseado no framework de 12 etapas e no método multicritério PROMETHEE-ROC, operacionalizado pelo software PROMROCnRatio. A aplicação prática do modelo ao estudo de caso permitiu uma ordenação robusta das alternativas tecnológicas, evidenciada pela análise de sensibilidade, e resultou na recomendação de implantação imediata da solução robótica ROV sem fio, destacando-se por promover alta produtividade e qualidade dos serviços, apresentar alto nível de maturidade tecnológica e contribuir para a redução de riscos e emissão de CO₂ na atmosfera.

Assim, confirma-se que a abordagem metodológica adotada foi eficaz para estruturar o processo decisório e oferecer suporte consistente à priorização tecnológica, atendendo plenamente à problemática formulada no início do trabalho.

As contribuições desta pesquisa para a prática incluem a demonstração concreta de como modelos de decisão e um MCDA associado podem aumentar a assertividade dos investimentos em inovação tecnológica e alinhar as iniciativas às necessidades operacionais reais. Para a literatura, reforça-se a relevância de abordagens construtivistas e não compensatórias no suporte à decisão em ambientes complexos, oferecendo um exemplo replicável para o setor de energia e demais indústrias intensivas em ativos.

Recomenda-se, ainda, explicitar os limites do modelo adotado, como o uso de dados subjetivos e a aplicação em um único estudo de caso, fatores que podem restringir a generalização dos resultados e que devem ser considerados em futuras investigações para ampliar a robustez e a aplicabilidade da abordagem proposta.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do framework de 12 etapas e do método PROMETHEE-ROC em diferentes contextos organizacionais e tecnológicos, ampliando a base de validação empírica. Além disso, investigações futuras poderiam explorar a integração com abordagens dinâmicas, como análise de cenários e sistemas adaptativos, visando tornar os modelos mais responsivos às mudanças rápidas do ambiente de inovação. Também se sugere a realização de estudos longitudinais para avaliar os impactos de longo prazo das decisões tomadas sobre o desempenho operacional, ambiental e econômico das organizações.

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

Referências

Almeida, A. T. (2013). Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério. Editora Universitária da UFPE, Recife.

Almeida, A. T.; Costa, A. P. C. S.; Almeida Filho, A. T. (2012). Decisão em grupo: métodos e aplicações. Editora Universitária da UFPE, Recife.

Anybotics. (2022). Early access to robotic inspection in Ex-rated zones. Disponível em: <https://www.anybotics.com/robotic-progress-eap-anymal-x-zurich>. Acessado: 18 abr. 2025.

Anybotics. (2025). Disponível em: <https://www.anybotics.com>. Acessado: 18 abr. 2025.

Brans, J. P.; Vincke, Ph.; Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), p. 228–238, Elsevier.

- Bouyssou, D.; Marchant, T.; Pirlot, M.; Vansnick, J. C. (2006). *Evaluation and decision models: a critical perspective*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Clemente, L. P. A. (2015). *Metodologia multicritério para avaliação de desempenho ambiental organizacional baseada no PROMETHEE-ROC*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Da Cunha, R. A.; Rangel, L. A. D.; Rudolf, C. A.; Santos, L. dos. (2022). A decision support approach employing the PROMETHEE method and risk factors for critical supply assessment in large-scale projects. In *Operations Research Perspectives*, 9, p. 1–12, Elsevier.
- Dahlander, L.; Gann, D. M. (2010). How open is innovation? *Research Policy*, 39(6), p. 699–709.
- De Almeida, A.T; Roselli, L.R.P; Frej, E.A; Morais, D.C. (2021) A framework for building multicriteria decision models. Working Paper CDSIS. (www.cdsid.org.br)
- Deepstar. (2022). Yokogawa and Mitsubishi Heavy Industries to undertake AI-enabled robot system project for the Nippon Foundation - DeepStar Joint Research & Development Program. Disponível em: <https://www.mhi.com/news/220531.html>. Acessado: 18 abr. 2025.
- Deepstar. (2023). A global offshore technology development consortium. Disponível em: <https://www.thedeepstar.org/program-structure>. Acessado: 18 abr. 2025.
- Doumpos, M.; Zopounidis, C. (2011). Preference disaggregation and statistical learning for multicriteria decision support: a review. *European Journal of Operational Research*, 209(3), p. 203–214.
- Dudley, B. (2017). Digital transformation initiative: oil and gas industry. World Economic Forum & Accenture. Disponível em: <https://report.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/white-paper-2017-dti-oil-gas.pdf>. Acessado: 18 abr. 2025.
- Edwards, W.; Miles, R. F.; Von Winterfeldt, D. (2007). *Advances in decision analysis: from foundations to applications*. Cambridge University Press, New York.
- El Beggar, O. (2018). Multicriteria decision aid for agile methods evaluation using fuzzy PROMETHEE. *Journal of Software: Evolution and Process*, 30(12), p. e2108.
- Elijah, O. et al. (2021). A survey on Industry 4.0 for the oil and gas industry: upstream sector. *IEEE Access*, 9, p. 144438–144468.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Atlas, São Paulo.
- Gomes, L. F. A. M.; Araya, M. C. G.; Carignano, C. A. (2011). *Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão*. Cengage Learning, São Paulo.
- Gomes, L. F. A. M.; Gomes, C. F. S. (2019). *Princípios e métodos para tomada de decisão: enfoque multicritério*. 6. ed. Atlas, São Paulo.
- Guo, L.; Lu, H.; Azimi, M.; Huang, K. (2019). Oil and Gas 4.0 era: a systematic review and outlook. *Computers in Industry*, 111, p. 68–90.
- Hammond, J. S.; Keeney, R. L.; Raiffa, H. (1998). *Smart choices: a practical guide to making better decisions*. Harvard Business School Press, Boston.
- Hydromea. (2025). Disponível em: <https://www.hydromea.com>. Acessado: 18 abr. 2025.

Masood, O.; Tvaronavičienė, M.; Javaria, K. (2019). Impact of oil prices on stock return: evidence from G7 countries. *Insights into Regional Development*, 1, p. 129–137.

Matkovskaya, Y. S. et al. (2021). Problems of innovative development of oil companies: actual state, forecast and directions for overcoming the prolonged innovation pause. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 14, p. 837.

Mckinsey. (2022). Harnessing volatility: technology transformation in oil and gas. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/harnessing-volatility-technology-transformation-in-oil-and-gas>. Acessado: 18 abr. 2025.

Morais, D. C.; Clemente, L. P. A.; Alencar, L. H. (2015). Uma abordagem multicritério para avaliação de desempenho ambiental baseada no PROMETHEE-ROC. *Revista Gestão & Produção*, 22(4), p. 843–856.

Prestidge, K. L. (2022). Digital transformation in the oil and gas industry: challenges and potential solutions. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology.

Rangel, L. A. D. S.; Gomes, L. F. A. M. (2009). Uma aplicação do método TODIM na avaliação multicritério de imóveis residenciais para aluguel. *European Journal of Operational Research*, 193(1), p. 204–211.

Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Santos, L. (2019). Avaliação de fontes de energia renováveis no sudeste brasileiro: uma abordagem F-PROMÉTHÉE GDSS. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

Schärlig, A. (1996). *Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

SwissDrones. (2025). Disponível em: <https://www.swissdrones.com>. Acessado: 18 abr. 2025.

Taurob. (2022). Petrobras S.A. has joined ARGOS JIP... Disponível em: <https://taurob.com/petrobras-joins-jip-consortium>. Acessado: 18 abr. 2025.

TideWise. (2025). Disponível em: <https://www.tidewise.io>. Acessado: 18 abr. 2025.

Unfccc2. (2021). The Glasgow Climate Pact: key outcomes from COP26. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>. Acessado: 18 abr. 2025.

Von Neumann, J.; Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press, Princeton.

Wanasinghe, T. R. et al. (2021). Human centric digital transformation and Operator 4.0 for the oil and gas industry. *IEEE Access*, 9, p. 113270–113291.

Weforum. (2022). Fossil fuels: is the world on track for moving past coal, oil and gas production? Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2022/10/phasing-out-fossil-fuels-progress>. Acessado: 18 abr. 2025.