MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COM ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA PROBLEMÁTICA DE ORDENAÇÃO APLICADA A PRIORIZAÇÃO DE PROJETOS

Hadassa dos Santos Silva
MAPS - Modelling and Alignment of Portfolio and Strategy
Universidade Federal de Pernambuco. Cx Postal: 95, CEP: 55.002-970, Caruaru-PE, Brasil
hadassa.santos.sa@gmail.com

Layra Nayara Damacena de Lima de Almeida
MAPS - Modelling and Alignment of Portfolio and Strategy
Universidade Federal de Pernambuco. Cx Postal: 95, CEP: 55.002-970, Caruaru-PE, Brasil
layra.nayara@gmail.com

Jonatas Araujo de Almeida
MAPS - Modelling and Alignment of Portfolio and Strategy
Universidade Federal de Pernambuco. Cx Postal: 95, CEP: 55.002-970, Caruaru-PE, Brasil
jonatasaa@yahoo.com.br

RESUMO

No ambiente de negócios competitivo atual, faz parte da rotina das empresas a tomada de decisões importantes. Essa é uma etapa complexa e muito relevante para o desenvolvimento da organização. Neste artigo, é abordado o tratamento de incertezas do problema de priorização multicritério de projetos. A tomada de decisão multicritério utiliza parâmetros que contém imprecisão, portanto a análise de sensibilidade auxilia a entender melhor a influência das incertezas sobre a avaliação das alternativas. Desse modo, este artigo objetiva tratar a incerteza proveniente do decisor com a análise de sensibilidade baseado na otimização inversa. O modelo foi aplicado a um problema encontrado da literatura sobre a seleção de projetos utilizando o PROMETHEE. Os resultados obtidos fornecem ao decisor a percepção do impacto da sua incerteza na ordenação das alternativas, proporcionando maior segurança na tomada de decisão.

PALAVRAS CHAVE. Seleção multicritério, Otimização inversa, Análise de sensibilidade.

Tópicos (ADM – Apoio à Decisão Multicritério, OA – Outras aplicações em PO)

ABSTRACT

In the current competitive business environment, it is part of the companies routine to make important decisions, this is a complex and very relevant stage to the development of the organization. This article deals with the uncertainties of the multi-criteria prioritization problem of projects. Multicriteria decision making uses parameters that contain vagueness, hence sensitivity analysis helps to better understand the influence of uncertainty on the evaluation of alternatives. Thus, this article aims to deal with uncertainty coming from the decision maker with sensitivity analysis based on inverse optimization. The model was applied to a problem found in the literature about project selection using PROMETHEE. The results obtained provide the decision maker a perception of uncertainty impact on alternatives ranking, providing more reliable results.

KEYWORDS. Multicriteria selection. Inverse optimization. Sensitivity analysis.

Paper topics (MCDA- Multicriteria Decision Analysis, OA- Others Applications in OR)

1. Introdução

Faz parte do cotidiano de pequenas e grandes empresas a necessidade da tomada de decisões, por vezes mais simples, outras vezes mais complexas. Esse processo tem extrema importância para a sobrevivência e crescimento de qualquer organização. Decisões mais importantes, com grande impacto devem ser feitas com planejamento e prudência. Em muitos problemas, percebe-se que é relevante para a organização também considerar em suas decisões ganhos não financeiros, como impacto ambiental, satisfação dos clientes, produtividade, além dos ganhos financeiros da decisão, alguns exemplos disso são os trabalhos de Nikoloudis et al [2020] e Vavatsikos et al [2019].

Um processo decisório mal direcionado pode levar o gestor a efetuar uma decisão equivocada, o que pode impactar negativamente a empresa, por vezes apenas uma decisão feita erroneamente pode levar ao fracasso total da organização. O procedimento de decisão pode ser complexo, abrangendo várias alternativas e objetivos, sendo necessário usar uma abordagem que auxilie a entender melhor as alternativas e ajude a tomar decisões melhores [CAFISO et al 2002].

A abordagem multicritério é usada para problemas de seleção de uma ou mais alternativas com o intuito satisfazer múltiplos objetivos, que geralmente são concorrentes entre si. Os objetivos são representados pelos critérios e podem possuir unidades de medidas diferentes. As alternativas possuem consequências que são avaliadas através de critérios como: custos, quantidade de produtos, lucros, crescimento ou chance de sucesso para a empresa, entre outros. Outro componente muito importante são os pesos que expressam as preferências do decisor [DE ALMEIDA, 2013]. O procedimento de obtenção das preferências do decisor, ou seja, a elicitação de pesos é envolvida em incertezas. Este processo pode ser difícil, visto que, certas vezes os valores obtidos pelo decisor e a definição dos pesos não são muito precisos, mas é sabido que o uso de pesos permite ter mais informações sobre os aspectos reais de um problema de decisão [MARESCHAL, 1988].

Depois de avaliar as alternativas com a abordagem multicritério é recomendado fazer uma análise para avaliar a robustez em relação aos parâmetros aplicados, já que os dados geralmente não são precisos, isso acontece por que é comum que durante a construção do modelo haja aproximações em relação ao parâmetros e isso pode causar um resultado incorreto [DE ALMEIDA, 2013]. A análise de sensibilidade deve ser realizada quando existe condições de incerteza em um ou mais parâmetros [NIKOLOUDIS et al, 2020]. Hyde et al [2005] afirma que uma das desvantagens nos atuais processos de análise de sensibilidade em multicritério é a variação de um ou mais critérios enquanto outros critérios continuam fixos, como por exemplo o procedimento desenvolvido por Mareschal [1988]. A otimização inversa é um procedimento de análise de sensibilidade que supera essa desvantagem. Ela permite fazer a alteração simultânea dos pesos e fornece informações a partir de uma nova perspectiva em relação à distância do ponto atual até o ponto que representa o resultado desejado para a comparação [DOAN e DE SMET, 2018].

Diante do exposto, foi realizada uma priorização multicritério para ordenar projetos usando o método PROMETHEE II, logo após, é aplicado uma análise de sensibilidade baseada no procedimento de otimização inversa. Os dados foram obtidos através do estudo de De Araújo e De Almeida [2009], devido à atual pandemia do COVID-19 e impossibilidade de obtê-los pessoalmente, o qual apresenta um estudo de caso sobre seleção de investimentos estratégicos em petróleo e gás. No presente trabalho aplica-se a otimização inversa em conjunto com a abordagem multicritério, o uso do multicritério nas organizações é realizado em diversos estudos, mas há uma certa escassez de trabalhos com a junção dessas duas abordagens, como em Doan e De Smet [2018]. Este estudo objetiva auxiliar as organizações, tratando as incertezas relacionadas aos pesos multicritério e fornecendo maior confiança na alocação dos recursos a partir da tomada de decisão multicritério.

O artigo é organizado da seguinte forma: na Seção 2 é realizada uma revisão da literatura sobre análise de sensibilidade, apresentando o conceito e os métodos mais usados para tratar a incerteza dos parâmetros e sobre a otimização inversa usada para analisar a sensibilidade do ranking obtido. Posteriormente, na Seção 3 é apresentado o modelo que foi utilizado para o problema de priorização. Em seguida, na Seção 4 é apresentada a aplicação do modelo. Na Seção 5, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, a Seção 6 apresenta a conclusão do trabalho.

2. Revisão da literatura

2.1 Análise de Sensibilidade

A tomada de decisão envolve vários processos, ao longo dos quais surgem incertezas que precisam ser avaliados com cautela. Para isso, é aplicada a análise de sensibilidade, que vai avaliar o comportamento dos dados de entrada, o quanto eles variam ao longo do processo, e como modificarão o resultado da decisão [DE ALMEIDA, 2013]. Alguns métodos de análise de sensibilidade foram propostos para utilização em modelos MCDA, como o método de Mareschal [1988] e o método Monte Carlo.

Vavatsikos et al [2019] explica que Monte Carlo analisa a estabilidade do resultado final de acordo com mudanças que podem ser realizadas em qualquer parâmetro, e assim estima a possibilidade de cada alternativa permanecer entre as selecionadas. Pham et al [2019] afirma que o método Monte Carlo é muito usado para análise de sensibilidade em diversas áreas. A ideia principal deste método consiste em repetir o procedimento diversas vezes, para que seja contabilizado a quantidade de variação que ocorre nos dados de saída.

Chen et al [2018] utiliza Monte Carlo nos pesos dos critérios em um problema de seleção de localização para instalação de uma empresa. Vavatsikos et al [2019] utilizou Monte Carlo para analisar a sensibilidade de um problema de seleção multicritério, que avalia áreas para instalação de parques eólicos. Pham et al [2019] menciona a utilização de artifícios para a redução do tempo de execução da abordagem Monte Carlo, e otimizar a quantidade de execuções, o que demonstra uma preocupação ativa na literatura sobre o alto esforço computacional e tempo de execução, demonstrando assim as limitações da utilização dessa abordagem. Outros trabalhos, como o de Nikoloudis et al [2020], realizam a análise de sensibilidade baseada em cenários, atribuindo variações fixas pré-definidas para cada um dos critérios a cada vez que o problema é rodado, apresentando também limitações.

2.2 Otimização inversa

Uma abordagem relativamente nova para análise de sensibilidade é a otimização inversa, a qual visa encontrar o mínimo de alteração na função objetivo, de forma que uma das soluções fornecidas que não era ótima inicialmente, se torne ótima [HEUBERGER, 2004]. De acordo com Chan et al [2018] a otimização inversa é utilizada em parâmetros de um problema para que uma dada solução se torne ótima. Orlin e Ahuja [2001] sugerem utilizar a otimização inversa para contribuir na determinação de alguns parâmetros do modelo que muitas vezes são impossíveis de determinar precisamente.

Em Babier et al [2018], a otimização inversa foi utilizada em 217 planos clínicos de tratamento do câncer de cabeça e do pescoço. Roland et al [2016] realiza uma seleção de portfólios de projeto, visando satisfazer um conjunto de restrições e representar um compromisso entre o grupo de especialistas. Na área da saúde, Yao e Billard [2020] desenvolveram um modelo baseado na otimização inversa para explicar a diferença da coordenação motora entre os novatos e os mais experientes, o modelo permitiu avaliar como acontece a variação de membros superiores e como melhoram a proficiência na tarefa. Soltanpour et al [2020] avaliou o problema da localização inversa, que visa alterar os parâmetros do problema inicial ao custo total mínimo, quanto aos limites de modificação, fazendo com que a localização com os novos valores dos parâmetros se torne ótima, esse é um aspecto recente da otimização inversa e muito estudado por pesquisadores.

No trabalho de Doan e De Smet [2018] é aplicada a otimização inversa nos pesos com base na programação linear, após a avaliação multicritério. Os autores utilizaram o PROMETHEE II para obter o ranking das melhores cidades. A otimização inversa foi utilizada para avaliar os pesos dos critérios, permitindo encontrar uma forma de analisar a modificação mínima nos pesos, para assim, tratar as incertezas provenientes do decisor.

O modelo de Doan e De Smet [2018] tem o objetivo de minimizar a variação dos pesos usando a norma L_1. Este modelo busca a mínima variação para que uma determinada alternativa supere todas as outras alternativas e se torne a melhor. Além disso, o modelo também considera a minimização da quantidade de critérios modificados. O modelo de Doan e De Smet [2018] é descrito pelas equações (1) – (14) a seguir.

$$\min z = \sum_{k=1}^{m} |w_k - w'_k| = \sum_{k=1}^{m} \left(d_{k,1} + d_{k,2}\right) \quad (1)$$

s.t

$$\sum_{k=1}^{m} w'_k = 1 \quad (2)$$

$$\delta_k > \frac{w_k - w'_k}{2} + \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (3)$$

$$\delta_k \leq \frac{w_k - w'_k}{2} + 1, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (4)$$

$$w_k - w'_k = d_{k,1} - d_{k,2}, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (5)$$

$$0 \leq d_{k,1} \leq \delta_k, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (6)$$

$$0 \leq d_{k,2} \leq 1 - \delta_k, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (7)$$

$$\gamma k \geq d_{k,1} + d_{k,2}, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (8)$$

$$\gamma k \leq M\left(d_{k,1} + d_{k,2}\right), \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{m} \gamma k \leq N \quad (10)$$

$$\phi'(a_i) = \sum_{k=1}^{m} w'_k\, \phi_k(a_i) \quad (11)$$

$$\phi'(a_i) > \phi'(a_j), \forall j \neq i \quad (12)$$

$$w'_k, d_{k,1}, d_{k,2} \geq 0, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (13)$$

$$\delta_k, \gamma_k \in \{0, 1\}, \forall k = 1,2,\ldots,m \quad (14)$$

A função objetivo (1), minimiza o somatório da diferença dos novos pesos com os pesos iniciais, ou também pode ser entendida como a soma de dois vetores que guardam as diferenças dos pesos. O problema está sujeito à treze restrições que serão explicadas a seguir. A restrição (2) garante que o somatório dos novos pesos esteja normalizado, as restrições (3) e (4) garantem que δ_k esteja em um determinado intervalo que permite que a variável δ_k receba apenas um dos valores que pode assumir, sendo este valor 0 ou 1, 0 caso o peso novo seja maior que o inicial, 1 se o peso inicial for maior que o peso novo ou ainda se os pesos forem iguais. A restrição (5) garante que a diferença entre $d_{k,1}$ *e* $d_{k,2}$ vai ser igual a diferença dos pesos, já que a diferença entre $d_{k,1}$ *e* $d_{k,2}$ expressa a diferença dos pesos. As restrições (6) e (7) garantem que os vetores $d_{k,1}$ *e* $d_{k,2}$ recebam a diferença dos pesos ou zero, o vetor $d_{k,1}$ recebe a diferença quando o peso novo sofre redução em comparação ao inicial, caso contrário $d_{k,2}$ recebe a diferença em módulo. As restrições (8) e (9) garantem que, se a soma dos vetores $d_{k,1}$ e $d_{k,2}$ for maior que zero indicando que houve modificação para o critério k, então γ_k assume o valor 1, caso contrário, γ_k receberá zero representando que não houve modificação no critério. A restrição (10) expressa que o somatório dos critérios modificados tem que ser menor ou igual ao número de critérios alterados permitidos, representado por N. A restrição (11) garante que o fluxo líquido da alternativa seja igual ao somatório dos pesos novos multiplicado pelas consequências das alternativas. A restrição (12) garante que a alternativa i apresente um fluxo líquido maior que as outras alternativas avaliadas no problema. A restrição (13) garante que as variáveis w_k, $d_{k,1}$ *e* $d_{k,2}$ sejam maiores ou iguais a zero e, por fim, a restrição (14) garante que as variáveis δ_k e γ_k sejam binárias, ou seja, recebam apenas 0 ou 1.

3. Modelo

No modelo proposto neste trabalho, foi feita a aplicação do PROMETHEE II [BRANS et al 1986] para obter o ranking, após obter o ranking das alternativas com o intuito de realizar a análise de sensibilidade foi realizado o procedimento da otimização inversa baseado em programação linear. O modelo apresentado a seguir, foi desenvolvido com base no modelo de Doan e De Smet [2018], porém no modelo proposto houve algumas alterações:

$$\min z = \sum_{k=1}^{m} |w_k - w'_k| \quad (15)$$

s.t

$$\sum_{k=1}^{m} w'_k = 1 \quad (16)$$

$$\delta_k > \frac{w_k - w'_k}{2}, \forall k = 1,2,\dots,m \quad (17)$$

$$\delta_k \leq \frac{w_k - w'_k}{2} + 1, \forall k = 1,2,\dots,m \quad (18)$$

$$w_k - w'_k = d_{k,1} - d_{k,2}, \forall k = 1,2,\dots,m \quad (19)$$

$$0 \leq d_{k,1} \leq \delta_k, \forall k = 1,2,\dots,m \quad (20)$$

$$0 \leq d_{k,2} \leq 1 - \delta_k, \forall k = 1,2,\dots,m \quad (21)$$

$$\sum w'_k \phi_k(a_{ik}) \geq \sum w'_k \phi_k(a_{jk}), \forall j \neq i \quad (22)$$

$$\delta_k \in \{0,1\}, \forall k = 1,2,\dots,m \quad (23)$$

A função objetivo (15), minimiza o somatório das variações entre os pesos iniciais e os novos pesos, ou seja, a variação de aumento e redução dos pesos. A restrição (16) garante a normalização dos novos pesos, fazendo com que o somatório dos pesos seja igual a 1. As restrições (17) e (18) estabelecem um limite que faz com que a variável δ_k receba apenas um dos valores que é permitido para esta variável, sendo este valor 0 ou 1, sendo 0 caso o peso novo seja maior que o inicial, e 1 se o peso inicial for maior que o peso novo ou ainda se os pesos forem iguais. A restrição (19) garante que a diferença entre $d_{k,1}$ e $d_{k,2}$ vai ser igual a diferença entre os pesos iniciais e os novos, já que a diferença entre $d_{k,1}$ e $d_{k,2}$ armazena a diferença entre os pesos que se refletem em aumento ou redução nos novos pesos. As restrições (20) e (21) garantem que os vetores $d_{k,1}$ e $d_{k,2}$ recebam a diferença dos pesos ou zero, o vetor $d_{k,1}$ recebe a diferença quando há redução, caso contrário, $d_{k,2}$ recebe a diferença em módulo. A restrição (22) diferente da restrição (12) no modelo de Doan e De Smet [2018], a qual garante que uma alternativa seja maior que todas as outras, já a restrição (22) compara duas alternativas para que uma possa superar a outra. A restrição (23) garante que a variável δ_k receba apenas os valores 0 ou 1.

O modelo desenvolvido neste estudo possui algumas diferenças em relação ao modelo de Doan e De Smet [2018]. Neste modelo não foi utilizada a variável γ_k, assim como não foram usadas as restrições que garantem a minimização da quantidade de critérios modificados. O presente modelo, assim como o de Doan e De Smet [2018] utiliza a norma L1, a qual trabalha com a soma das variações do vetor formado pelos critérios. Sendo assim, essas restrições foram retiradas já que o atual estudo não investiga a influência da quantidade de critérios modificados na decisão. Outra diferença do atual modelo é relacionada à restrição (12) do modelo de Doan e De Smet [2018] que faz apenas com que uma alternativa se torna a melhor através de uma variação mínima nos pesos, já a restrição (22) do modelo proposto neste estudo, permite comparar duas alternativas, quaisquer que sejam, independentemente da posição, dessa forma o decisor poderá escolher qual alternativa irá comparar, conseguindo comparar alternativas adjacentes no topo da ordenação, por exemplo a primeira alternativa com a segunda na ordenação, ou distantes do topo como a quarta e a quinta, ou até mesmo alternativas não adjacentes, por exemplo de comparação entre a quarta alternativa com a décima alternativa na ordenação, pois não há restrições nesse sentido.

4. Aplicação do modelo

Foi realizada uma aplicação do PROMETHEE II para obter o ranking das alternativas, utilizando os dados obtidos através do trabalho de De Araújo e De Almeida [2009], onde é apresentado um problema de seleção de investimentos estratégicos em petróleo e gás. O método PROMETHEE II foi reaplicado com o intuito de confirmar os resultados obtidos e para obter os fluxos intracritério positivos e negativos, que não foram fornecidos no trabalho de De Araújo e De Almeida [2009]. De Araújo e De Almeida [2009] realizaram uma análise de sensibilidade nos pesos, baseada em um intervalo de estabilidade dos pesos, na qual cada critério tinha um limite em que os pesos podiam ser modificados sem alterar o ranking. A análise de sensibilidade, realizada através da otimização inversa, apresentará outras informações importantes para analisar a robustez da solução encontrada. O modelo de priorização multicritério com o PROMETHEE II e análise de sensibilidade foram aplicados através do Microsoft Excel®.

A seguir serão apresentados os dados utilizados para reaplicar o PROMETHEE II e obter os fluxos intracritério necessários para o modelo de otimização inversa.

Os critérios considerados foram:

- (C1) - Produtividade da Região;
- (C2) - Redução dos custos de exploração (%);
- (C3) - Redução das perdas de exploração (%);
- (C4) - Satisfação dos agentes governamentais;
- (C5) - Satisfação dos agentes ambientais ;
- (C6) - Adequação às especificações técnicas;

Todos os critérios possuem função de preferência usual. A Tabela (1) apresenta os pesos normalizados para cada critério e o tipo de otimização de cada critério.

Tabela 1 -Informações sobre os critérios

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Pesos	0,2273	0,1818	0,1364	0,1364	0,1818	0,1364
Máx/ Min	Max	Min	Min	Max	Max	Max

Fonte: De Araújo e De Almeida [2009].

As alternativas do problema que representam as áreas para alocação são:

- (A1) – Guamaré
- (A2) – Gás e Energia
- (A3) – Mar
- (A4) – Exploração
- (A5) – Mossoró
- (A6) – Suporte
- (A7) – Alto do Rodrigues

A tabela (2) apresenta os valores das consequências das alternativas em relação a cada um dos critérios.

Tabela 2- Matriz de avaliação de alternativas em relação aos critérios

Critério/ Alternativas	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**
(A1)	8	12	10	5	7	8
(A2)	7	15	7	6	6	7
(A3)	7	8	5	7	7	8
(A4)	5	5	15	3	4	6
(A5)	5	8	13	5	7	7
(A6)	6	7	8	4	6	6
(A7)	7	12	12	3	7	8

Fonte: De Araújo e De Almeida [2009].

O ranking obtido por De Araújo e De Almeida [2009] é apresentado na tabela (3).

Tabela 3 – Ranking das Alternativas

(A3)	(A1)	(A7)	(A2)	(A6)	(A5)	(A4)
1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º
0,5606	0,3409	0,0076	-0,0379	-0,1591	-0,1591	-0,5530

Fonte: De Araújo e De Almeida [2009].

A tabela (4) apresenta os valores dos fluxos líquidos intracritério das alternativas em cada critério. O fluxo líquido representa a diferença entre o fluxo intracritério positivo, o qual expressa o quanto uma determinada alternativa superou as outras alternativas em um determinado critério, e o fluxo intracritério negativo, expressa o quanto uma determinada alternativa foi superada pelas outras alternativas em um determinado critério.

Tabela 4 – Fluxo intracritério líquido

Critério/ Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	1	-0,5	0	0,1667	0,5	0,6667
A2	0,3333	-1	0,6667	0,6667	-0,5	-0,1667
A3	0,3333	0,1667	1	1	0,5	0,6667
A4	-0,8333	1	-1	-0,8333	1	-0,8333
A5	-0,8333	0,1667	-0,6667	0,1667	0,5	-0,1667
A6	-0,3333	0,6667	0,3333	-0,3333	-0,5	-0,8333
A7	0,3333	-0,5	-0,3333	-0,8333	0,5	0,6667

Fonte: O autor [2020].

Após obter os fluxos intracritério, das alternativas que serão comparadas, foi realizada a análise sensibilidade baseada em otimização inversa. Foram utilizados os fluxos das alternativas A3 e A1, que são a primeira e a segunda posição no ranking original. Essa comparação foi realizada para fornecer a distância entre a primeira e a segunda alternativa. A tabela (5) representa os vetores de variações, onde $d_{k,1}$ guarda as variações de redução e $d_{k,2}$ armazena as variações de aumento que o novo peso vai sofrer.

Tabela 5 – Vetores de variações de aumento e redução

C1	C2	C3	C4	C5	C6
d1,1	***d2,1***	***d3,1***	***d4,1***	***d5,1***	***d6,1***
0	0	0,131818	0	0	0
d1,2	***d2,2***	***d3,2***	***d4,2***	***d5,2***	***d6,2***
0,131818	0	0	0	0	0

Fonte: O autor [2020].

A tabela (6) apresenta os novos pesos, obtidos a partir das variações apresentadas.

Tabela 6 – Novos pesos

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0,3591	0,1818	0,00455	0,1364	0,1818	0,1364

Fonte: O autor [2020].

A função objetivo teve um valor de 0,263636363, ou seja, o L1 que é a soma das variações é igual a 0,263636363. O novo ranking obtido com os pesos novos é apresentado na tabela (7).

Tabela 7 – Novo ranking obtido com os pesos novos

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º
0,47273	0,47273	0,09545	-0,08182	-0,18106	-0,24696	-0,53106

Fonte: O autor [2020].

5. Discussão dos resultados

A solução encontrada ao executar a otimização inversa, fez com que A1(Guamaré) obtenha o valor 0,472727273 e A3(Mar) receba o valor de 0,472727273, ou seja, a mínima variação faz com que as alternativas se igualem, isso é uma condição garantida pelo modelo, já que ele busca que as alternativas se igualem, o que é a condição necessária para a iminência da inversão de ordem. A tabela (6) mostra que o peso do critério Produtividade da Região (C1) teve uma variação de aumento, e o peso do critério de Redução das Perdas de exploração (C3) teve uma variação de redução, o que pode ser explicado pelo fato de que a alternativa A1 possui fluxo líquido intracritério maior que A3 no critério (C1), enquanto o oposto ocorre em (C3). De modo que com os pesos novos C1 contribuiu para o aumento do valor de A1.

Também é possível observar através da tabela (6) que a quantidade que aumentou no critério C1 foi a mesma quantidade que reduziu no critério C3, devido à normalização, pois para que o peso de um critério aumente, é preciso que o peso de outro critério diminua, mantendo assim a soma dos pesos igual a 1.

6. Conclusão

O modelo de análise de sensibilidade através de otimização inversa, fornecido do atual trabalho, serve para responder à pergunta “Qual a variação mínima necessária para que uma alternativa supere outra no ranking?”. Essa análise é uma forma de avaliar a variação necessária para que uma determinada alternativa se torne melhor que todas as alternativas ou ainda se torne melhor que uma alternativa qualquer acima dela na ordenação. Desta forma, o modelo proposto pelo presente trabalho permite diversas comparações, o que fornece informação que se adequa melhor à problemática de ordenação, não se limitando apenas à primeira posição, que se limita à informação da problemática de escolha.

Por fim, o resultado obtido forneceu informações que tratam a incerteza do decisor com relação as preferências expressas na avaliação multicritério, de modo que o decisor pode verificar se a distância entre duas alternativas, justifica considerá-las em diferentes posições no ranking, sendo possível tratá-las como equivalentes de acordo com o quanto de variação o decisor considera aceitável.

Com a informação fornecida pelo modelo é possível verificar, por exemplo, em alternativas em posições suspeitas aos olhos do decisor, focando-se principalmente nelas, buscando uma análise que confirme as suspeitas do decisor ou que as descarte.

Como sugestão para trabalhos futuros indicamos a aplicação do modelo de otimização inversa em problemas de ordenação com outros métodos multicritério.

Agradecimento

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível SuperiorCAPES pelo apoio institucional.

Referências

Ahuja, R.K., Orlin, J.B. Inverse optimization. Operations Research 49(5), pp. 771-783, 2001.

Araújo, A.G de; Almeida, A.T de. Apoio à decisão na seleção de investimentos em petróleo e gás: uma aplicação utilizando o método PROMETHEE. Gestão & Produção, São Carlos, v. 16, p. 534543, 2009.

Babier, A., Boutilier, J.J., Sharpe, M.B., McNiven, A.L., Chan, T.C.Y.Inverse optimization of objective function weights for treatment planning using clinical dose-volume histograms. Physics in Medicine and Biology 63(10),105004, 2018.

J.P. BRANS, Ph. VINCKE and B. MARESCHAL. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European Journal of Operational Research 24, 228-238, 1986.

Cafiso, S; Di graziano, A; Kerali, H; OdokI, J. Multicriteria analysis method for pavement maintenance management. *Transportation Research Record* (1816), pp. 73-84, 2002.

Chan, T.C.Y., Lee, T., Terekhov, D.Inverse optimization: Closed-form solutions, geometry, and goodness of fit. Management Science 65(3), pp. 1115-1135, 2018.

De almeida, A.T. Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério, 1a Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2013.

Doan, N.A.V., De Smet, Y.An alternative weight sensitivity analysis for PROMETHEE II rankings. Omega (United Kingdom) 80, pp. 166-174, 2018.

Hyde, K.M., Maier, H.R., Colby, C.B.A distance-based uncertainty analysis approach to multicriteria decision analysis for water resource decision making. Journal of Environmental Management 77(4), pp. 278-290, 2005.

Heuberger, C.Inverse Combinatorial Optimization: A Survey on Problems, Methods, and Results. Journal of Combinatorial Optimization 8(3), pp. 329-361, 2004.

Chen, J., Wang, J., Baležentis, T., (...), Streimikiene, D., Makuteniene, D. Multicriteria Approach towards the Sustainable Selection of a Teahouse Location with Sensitivity Analysis. Sustainability (Switzerland) 10(8),2926, 2018.

Mareschal, B.Weight stability intervals in multicriteria decision aid. European Journal of Operational Research 33(1), pp. 54-64, 1988.

Nikoloudis, C., Aravossis, K., Strantzali, E., Chrysanthopoulos, N. A novel multicriteria methodology for evaluating urban development proposals. Journal of Cleaner Production 263,120796, 2020.

Pham, B.T., Nguyen, M.D., Dao, D.V., (...), Ho, H.L., Tien Bui, D. Development of artificial intelligence models for the prediction of Compression Coefficient of soil: An application of Monte Carlo sensitivity analysis. Science of the Total Environment 679, pp. 172-184, 2019.

Roland, J., Figueira, J.R., De Smet, Y. Finding compromise solutions in project portfolio selection with multiple experts by inverse optimization. Computers & Operations Research Volume 66, February 2016, Pages 12-19, 2016.

Soltanpour, A., Baroughi, F., Alizadeh, B. The inverse 1-median location problem on uncertain tree networks with tail value at risk criterion. Information Sciences 506, pp. 383-394,2020.

Vavatsikos, A.P., Arvanitidou, A., Petsas, D. Wind farm investments portfolio formation using GIS-based suitability analysis and simulation procedures. Journal of Environmental Management 252,109670, 2019.

Yao, K., Billard, A. An inverse optimization approach to understand human acquisition of kinematic coordination in bimanual fine manipulation tasks. Biological Cybernetics 114(1), pp. 63-82, 2020.