



## **PROMETHEE-S: UM MÉTODO DE SOBRECLASSIFICAÇÃO PARA APOIO MULTICRITÉRIO A DECISÃO EM SITUAÇÃO DE INCERTEZA**

**Yuri Gama Lopes**  
PETROBRAS

Av. Henrique Valadares, 28 – 14º andar Torre B, Centro 202310-030, Rio de Janeiro-RJ, Brasil  
yurigl@petrobras.com.br

**Adiel Teixeira de Almeida**  
UFPE

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária 50740-530, Recife-PE, Brasil  
almeidatd@gmail.com

### **RESUMO**

O Apoio Multicritério a Decisão (AMD) em situação de incerteza têm sido discutido majoritariamente pela Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Utility Theory* – MAUT). Nas últimas décadas, vários trabalhos foram publicados com o objetivo de avaliar relações de preferência em problemas de decisão multicritério de natureza estocástica a partir dos fundamentos dos métodos não compensatórios do AMD. A característica comum desses trabalhos é a definição de relações de preferência entre alternativas com base no comportamento probabilístico de funções preferência ou índices construídos a partir de procedimentos não compensatórios. Diferentemente, o método proposto neste artigo é uma extensão do método PROMETHEE para problemas de ordenação de alternativas em situações de incerteza e procura avaliar como se comporta a relação de preferência entre alternativas em função de seus desempenhos estocásticas. Uma aplicação numérica no contexto de priorização de projetos na indústria do petróleo é conduzida no intuito de demonstrar a aplicabilidade do método.

**PALAVRAS CHAVE.** Decisão multicritério, Incerteza, PROMETHEE.

### **ABSTRACT**

The Multicriteria Decision Aid (MCDA) under uncertainty has been mainly discussed by the Multi-Attribute Utility Theory (MAUT). In recent decades, several studies have been published with the aim of evaluating preference relations in multicriteria decision problems under uncertainty from the fundamentals of non-compensatory methods of the MCDA. The common feature of these works is the definition of preference relations between alternatives based on the probabilistic behavior of preference functions or indexes which were constructed from non-compensatory procedures. Differently, the method proposed in this paper is an extension of the PROMETHEE method for ranking problems in uncertainty situations and it aims to evaluate the preference relation between alternatives and how it behaves according to their stochastic performances. A numerical application within the context of the oil and gas industry is conducted in order to demonstrate the usefulness of the method.

**KEYWORDS.** Multicriteria decision. Uncertainty. PROMETHEE.



## 1. Introdução

No contexto do Apoio Multicritério a Decisão – AMD (do termo inglês *Multicriteria Decision-Aid*), problemas de decisão sob incerteza têm sido majoritariamente discutidos pela Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Utility Theory* – MAUT). Ainda assim, a abordagens não compensatórias ou de sobreclassificação (*Outranking*) podem constituir-se como alternativas apropriadas para análise (Martel & Matarazzo, 2005). Em relação a problemas de decisão multicritério que envolvem modelagem probabilística, a questão do tratamento de incertezas é normalmente inserida dentro da estrutura axiomática da MAUT (Almeida, 2013). No entanto, conforme discutido por Stewart (2005), os requisitos para construção de uma função utilidade podem ser extremamente exigentes tanto para o decisor, ao prover os insumos de julgamento necessários, quanto para o analista, na identificação de distribuições de probabilidade conjuntas e/ou distribuições de probabilidade condicionais.

Nas últimas décadas, vários trabalhos foram publicados com o objetivo de avaliar relações de preferência em problemas de decisão multicritério de natureza estocástica a partir dos fundamentos dos métodos não compensatórios do AMD. Funções de densidade de probabilidade ou números *fuzzy* são comumente utilizadas para modelar o desempenho de alternativas com relação aos critérios adotados. A característica comum desses trabalhos é a definição de relações de preferência entre alternativas com base no comportamento probabilístico de funções de preferência ou índices construídos a partir de procedimentos não compensatórios (Mareschal, 1986; d'Avignon & Vincke, 1988; Goumas & Lygerou, 2000; Hyde *et al*, 2003; Aouam *et al*, 2003). Outros trabalhos tiveram como base o uso de conceitos de dominância estocástica e focaram sua análise no comportamento estocástico das alternativas: esses métodos buscaram construir relações de sobreclassificação, quase sempre utilizando índices de concordância e discordância, baseadas nos resultados provenientes da análise de dominância (Martel & Zara's, 1995; Gravel *et al*, 1992).

Ao contrário da maioria das abordagens encontradas na literatura, o método proposto neste artigo não tem como objetivo principal de análise a consideração do valor e do comportamento das funções ou índices de preferência entre alternativas em função da natureza probabilística dos desempenhos das alternativas. O ponto fundamental é que os desempenhos das alternativas são os elementos de incerteza que devem influenciar na análise de preferências e não o comportamento estocástico de funções de intensidade de preferências construídas a partir de um procedimento de análise não compensatório. Ao contrário das funções valor e utilidade, tais funções não podem receber essa denominação no senso estrito do termo. Dessa forma, a análise do comportamento probabilístico das funções ou índices de preferência não permite que sejam estabelecidos argumentos suficientes para estabelecer alguma relação de preferência entre alternativas. O método proposto neste artigo é uma extensão do método PROMETHEE (seção 2) para problemas de ordenação de alternativas em situações de incerteza. Os principais conceitos dessa proposta são discutidos na seção 3, uma aplicação numérica no contexto de priorização de projetos na indústria do petróleo é conduzida na seção 4 no intuito de demonstrar a aplicabilidade do método, assim como as principais conclusões do trabalho estão inseridas na seção 5.

## 2. O método PROMETHEE

A família de métodos PROMETHEE (*Preference Method for Enrichment Evaluation*) (Brans & Vincke, 1985) procura estabelecer uma relação de sobreclassificação de valores, superação ou prevalência de alternativas em relação às demais. A grande aplicabilidade do método deve-se a sua característica de ser um método simples quando comparado a outros métodos de análise multicritério, buscando envolver conceitos e parâmetros os quais têm alguma interpretação física ou econômica facilmente entendida pelo decisor (Vincke, 1992). Particularmente, este trabalho irá abordar os métodos PROMETHEE I e PROMETHEE II. No PROMETHEE, a preferência do decisor em favor de uma alternativa *a* em detrimento de outra



opção  $b$  aumenta com uma maior diferença  $f_j(a) - f_j(b)$  entre o desempenho determinístico das alternativas para cada critério  $j$ ; sendo  $f_j(a)$  e  $f_j(b)$ , respectivamente, os valores do desempenho das alternativas  $a$  e  $b$  no critério  $j$ . Brans & Vincke (1985) apresentaram seis formas diferentes para determinar tal preferência, que assume valores entre 0 e 1, a partir da definição e escolha de funções preferência  $P_j$ . Para cada par de alternativas, determina-se o grau de sobreclassificação ou prevalência de  $a$  sobre  $b$ :

$$\pi(a, b) = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b)$$

onde

$$W = \sum_{j=1}^n w_j$$

Em seguida, podem ser obtidos os fluxos de entrada ( $\phi^+$ ) e de saída ( $\phi^-$ ), assim como o fluxo líquido  $\phi$ , para cada uma das alternativas pertencentes analisadas:

- $\phi^+(a) = \sum_{b \in A} \frac{\pi(a, b)}{n-1}$  expressa como ou quanto a alternativa  $a$  sobreclassifica as demais alternativas, i.e, a intensidade de preferência de  $a$  sobre todas as alternativas;
- $\phi^-(a) = \sum_{b \in A} \frac{\pi(b, a)}{n-1}$  expressa como ou quanto a alternativa  $a$  é sobreclassificada pelas demais alternativas, i.e, a intensidade de preferência de todas as alternativas sobre a alternativa  $a$ ;
- $\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$  expressa o balanço entre os fluxos de sobreclassificação de entrada e de saída.

O método PROMETHEE I usa os fluxos de entrada e de saída em seu procedimento e, como resultado do método, uma pré-ordem parcial é obtida a partir das três relações de preferência citadas a seguir:

- Preferência – a  $P^I$  b, se:
  - $\phi^+(a) > \phi^+(b)$  e  $\phi^-(a) < \phi^-(b)$ , ou
  - $\phi^+(a) = \phi^+(b)$  e  $\phi^-(a) < \phi^-(b)$ , ou
  - $\phi^+(a) > \phi^+(b)$  e  $\phi^-(a) = \phi^-(b)$
- Indiferença – a  $I^I$  b, se:
  - $\phi^+(a) = \phi^+(b)$  e  $\phi^-(a) = \phi^-(b)$
- Incomparabilidade – a  $R^I$  b, se:
  - $\phi^+(a) > \phi^+(b)$  e  $\phi^-(a) > \phi^-(b)$ , ou
  - $\phi^+(a) < \phi^+(b)$  e  $\phi^-(a) < \phi^-(b)$

Já o método PROMETHEE II não considera a existência de incomparabilidades entre alternativas e seu procedimento apoia o decisão no estabelecimento de uma ordem completa entre as alternativas consideradas, utilizando o conceito de fluxo líquido citado anteriormente para estabelecer as seguintes relações de preferência:

- Preferência – a  $P^{II}$  b, se:
  - $\phi(a) > \phi(b)$
- Indiferença – a  $I^{II}$  b, se:
  - $\phi(a) = \phi(b)$



### 3. PROMETHEE-S

Os métodos PROMETHEE I e PROMETHEE II têm como base de análise a matriz de desempenho das alternativas nos atributos estudados. Em razão do comportamento estocástico das alternativas, pode-se considerar a existência de inúmeras (por vezes, infinitas) possíveis matrizes, que dependem basicamente dos mecanismos probabilísticos dos desempenhos das alternativas. Caso um determinado estado da natureza seja verificado, o desempenho das alternativas assume certo valor, porém, como regra geral, o decisior necessita tomar uma decisão antes da revelação do estado da natureza. Sob o ponto de vista do PROMETHEE I, existem quatro diferentes relações de preferência que podem ser utilizadas pelo decisior para definir uma relação de preferência entre duas alternativas. Por outro lado, utilizando o PROMETHEE II, apenas as três primeiras relações são consideradas:

- $\lambda_1$  – Preferência de  $a$  sobre  $b \rightarrow a \text{ P}^I b$  ou  $a \text{ P}^{II} b$ ;
- $\lambda_2$  – Preferência de  $b$  sobre  $a \rightarrow b \text{ P}^I a$  ou  $a \text{ P}^{II} b$ ;
- $\lambda_3$  – Indiferença entre  $a$  e  $b \rightarrow a \text{ I}^I b \Rightarrow b \text{ I}^I a$  ou  $a \text{ I}^{II} b \Rightarrow b \text{ I}^{II} a$ ;
- $\lambda_4$  – Incomparabilidade –  $a \text{ R}^I b \rightarrow b \text{ R}^I a$ .

Considere que  $\theta_1$  é a probabilidade que a relação de preferência  $\lambda_1$  seja definida para um determinado par de alternativas,  $\theta_2$  é a probabilidade que a relação de preferência  $\lambda_2$  seja definida, e assim por diante. No contexto estocástico, um vetor  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$  de possíveis relações de preferência pode ser definido a partir das relações expostas acima, cujas probabilidades de ocorrência são, respectivamente,  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ . Necessariamente,  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 1$  sob o ponto de vista do PROMETHEE I e  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1$  sob o ponto de vista do PROMETHEE II.

Embora  $P_j(a, b)$  possa ser vista como uma função de intensidade de preferência, ela não pode receber essa denominação no senso estrito do termo. Isso porque a seguinte condição seria requerida:  $P_j(a, b) + P_j(b, c) = P_j(a, c)$ ; o que não ocorre para as funções de preferência do PROMETHEE (Vincke, 1992). Assim, não parece fazer sentido em se estimar um valor esperado de  $P_j(a, b)$  e  $\pi(a, b)$ , de forma semelhante ao que é feito em uma abordagem da MAUT. Funções preferência  $P_j(a, b)$  são determinadas a partir de comparações par-a-par que dependem das performances das alternativas. O valor esperado do grau sobreclassificação de uma alternativa não deve ser considerado como um fator efetivo para a tomada de decisão porque um maior valor de  $\bar{\pi}(a, b)$  pode não indicar que existam argumentos suficientes para definir uma relação de preferência.

O PROMETHEE-S faz uso de um procedimento de simulação para apoiar a definição das relações de preferências entre alternativas, sobretudo baseado no comportamento das relações de preferência estabelecidas no âmbito de aplicação do PROMETHEE I e II sobre as matrizes de desempenho simuladas, levando em conta que cada iteração representa um possível cenário (ou estado da natureza) da matriz de desempenho estocástica que está sendo analisada. Em suma, a abordagem proposta demanda a aplicação sequencial de procedimentos determinísticos do PROMETHEE I e II, com base nos cenários simulados a partir do comportamento estocástico das alternativas. A etapa de simulação é adequada para quantificar o impacto das variáveis de risco associadas de uma forma mais conveniente para o propósito do PROMETHEE-S, uma vez que vários pacotes de softwares de simulação permitem a modelagem de dependências estocásticas, além de relações funcionais entre os atributos, sem a necessidade de se estimar funções densidade de probabilidade conjunta. A Figura 1 mostra o fluxo de etapas do método proposto.

Cabe ressaltar a importância da etapa de estabelecimento de pesos durante a modelagem do problema de acordo com o PROMETHEE I e II. Como se trata de uma metodologia baseada

no conceito de sobreclassificação, os pesos estão diretamente ligados à noção de importância relativa. Com isso, a natureza estocástica dos desempenhos das alternativas nos critérios abordados, a média e variância das performances das alternativas em um critério e as escalas de avaliação adotadas não devem influenciar no estabelecimento de tais pesos. Nesse mesmo sentido, é assumido que os parâmetros definidos para os métodos PROMETHEE I e II permanecem inalterados para todos os cenários simulados, isto é, a escolha de funções preferência e respectivos limiares. Essa premissa é realista, já que métodos PROMETHEE baseiam a análise de preferências nas diferenças de desempenho entre alternativas e, portanto, os parâmetros do modelo não dependem da amplitude da escala de avaliação, mas apenas das unidades de medida dos atributos (para escolha das funções preferência) e dos valores absolutos das diferenças entre performances (para escolha dos limiares). Entretanto, é importante que o decisor esteja consciente sobre a amplitude dos valores de desempenho das alternativas nos critérios utilizados, de forma que possa escolher funções preferência condizentes, assim como os respectivos parâmetros.

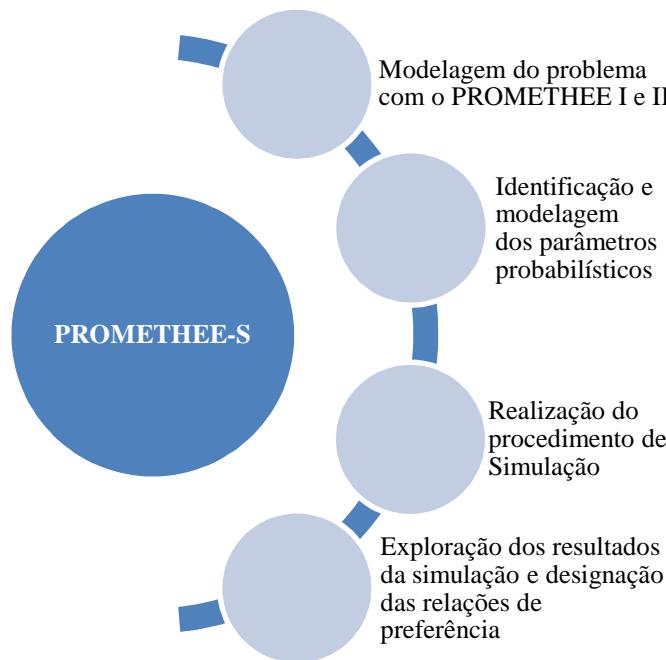


Figura.1 – Etapas do PROMETHEE-S (Fonte: esta pesquisa)

Após a execução do procedimento de simulação, por meio do qual as probabilidades de cada relação de preferências do PROMETHEE são estimadas para cada par de alternativas, uma fase de exploração desses resultados deve ser conduzida no intuito de definir as relações de preferência. É proposto o uso de limiares de probabilidade cujas definições são semelhantes aos limiares utilizados no PROMETHEE clássico. Vincke (1992) afirmou ser irreal a tentativa de especificar um valor preciso acima do qual existe uma preferência estrita e abaixo do qual há uma indiferença entre alternativas, pois aplicações reais mostram que sempre há uma zona intermediária na qual o decisor hesita entre duas respostas diferentes ou fornece respostas contraditórias dependendo da forma com que algumas perguntas são colocadas para ele. Almeida (2013) relata que o termo limiar (no contexto de medição) indica intensidade mínima necessária para se produzir efeito, devem representar valores mínimos no contexto da faixa de valores de consequência considerados e da escala de avaliação utilizada. A definição dos limiares propostos para o PROMETHEE-S segue estes conceitos e envolve o conceito de probabilidade, o que é interessante para decisores envolvidos em processos decisórios que envolvam incerteza e medidas de probabilidade. Enquanto que limiares superiores são similares aos limiares de preferência ( $p$ ), limiares inferiores são tais como os limiares de indiferença ( $q$ ):



- $\psi_P^+$  - limiar superior de Preferência – é a menor probabilidade (proporção) de ocorrência de uma relação de Preferência considerada suficiente e a partir da qual o decisor sente-se confortável em definir a relação de Preferência entre duas alternativas;
- $\psi_P^-$  - limiar inferior de Preferência – é a maior probabilidade (proporção) de ocorrência (proporção) de uma relação de Preferência abaixo da qual o decisor não vê razão mínima suficiente para definir a relação de Preferência entre duas alternativas;
- $\psi_I^+$  - limiar superior de Indiferença – é a menor probabilidade (proporção) de ocorrência de uma relação de Indiferença considerada suficiente e a partir da qual o decisor sente-se confortável em definir a relação de Indiferença entre duas alternativas;
- $\psi_I^-$  - limiar inferior de Indiferença – é a maior probabilidade (proporção) de ocorrência (proporção) de uma relação de Indiferença abaixo da qual o decisor não vê razão mínima suficiente para definir a relação de Indiferença entre duas alternativas;
- $\psi_R^+$  - limiar superior de Incomparabilidade – é a menor probabilidade (proporção) de ocorrência de uma relação de Incomparabilidade considerada suficiente e a partir da qual o decisor sente-se confortável em definir a relação de Incomparabilidade entre duas alternativas;
- $\psi_R^-$  - limiar inferior de Incomparabilidade – é a maior probabilidade (proporção) de ocorrência de uma relação de Incomparabilidade abaixo da qual o decisor não vê razão mínima suficiente para definir a relação de Incomparabilidade entre duas alternativas;

Como resultado da etapa de exploração dos resultados da simulação, tanto o PROMETHEE I-S como o PROMETHEE II-S buscam estabelecer uma pré-ordem parcial com bases nas relações de preferência definidas a seguir:

- PROMETHEE I-S
  - Preferência –  $a \text{ P}^{I-S} b$  (lê-se:  $a$  é preferível a  $b$  de acordo com o PROMETHEE I-S), se:
    - $\theta_1 \geq \psi_P^+ \rightarrow$  preferência estrita; ou
    - $\psi_P^- \leq \theta_1 < \psi_P^+$  e  $\begin{cases} \theta_2 < \psi_P^- \\ \theta_3 < \psi_I^+ \\ \theta_4 < \psi_R^- \end{cases} \rightarrow$  preferência fraca.
  - Preferência –  $b \text{ P}^{I-S} a$  (lê-se:  $b$  é preferível à alternativa  $a$  de acordo com o PROMETHEE I-S), se:
    - $\theta_2 \geq \psi_P^+ \rightarrow$  preferência estrita; ou
    - $\psi_P^- \leq \theta_2 < \psi_P^+$  e  $\begin{cases} \theta_1 < \psi_P^- \\ \theta_3 < \psi_I^+ \\ \theta_4 < \psi_R^- \end{cases} \rightarrow$  preferência fraca.
  - Indiferença –  $a \text{ I}^I b \Rightarrow b \text{ I}^I a$  (lê-se:  $a$  é indiferente a  $b$  de acordo com o PROMETHEE I-S), se:
    - $\theta_3 \geq \psi_I^+$ , ou



- $\psi_I^- \leq \theta_3 < \psi_I^+$  e  $\begin{cases} \theta_1 < \psi_P^- \\ \theta_2 < \psi_P^- \\ \theta_4 < \psi_R^- \end{cases}$

- Incomparabilidade –  $a R^{I-S} b$ , (lê-se:  $a$  é incomparável a  $b$  de acordo com o PROMETHEE I-S), nos demais casos.

- PROMETHEE II-S

- Preferência –  $a P^{II-S} b$  (lê-se:  $a$  é preferível a  $b$  de acordo com o PROMETHEE II-S), se:

- $\theta_1 \geq \psi_P^+ \rightarrow$  preferência estrita; ou
- $\psi_P^- \leq \theta_1 < \psi_P^+$  e  $\begin{cases} \theta_2 < \psi_P^- \\ \theta_3 < \psi_I^+ \end{cases} \rightarrow$  preferência fraca.

- Preferência –  $b P^{II-S} a$  (lê-se:  $b$  é preferível à alternativa  $a$  de acordo com o PROMETHEE II-S), se:

- $\theta_2 \geq \psi_P^+ \rightarrow$  preferência estrita; ou
- $\psi_P^- \leq \theta_2 < \psi_P^+$  e  $\begin{cases} \theta_1 < \psi_P^- \\ \theta_3 < \psi_I^+ \end{cases} \rightarrow$  preferência fraca.

- Indiferença –  $a I^{II-S} b \Rightarrow b I^{II-S} a$  (lê-se:  $a$  é indiferente a  $b$  de acordo com o PROMETHEE II-S), se:

- $\theta_3 \geq \psi_I^+$ ; ou
- $\theta_3 \geq \psi_I^-$  e  $\begin{cases} \theta_1 < \psi_P^- \\ \theta_2 < \psi_P^- \end{cases}$ .

- Incomparabilidade –  $a R^{II-S} b$  (lê-se:  $a$  é incomparável a  $b$  de acordo com o PROMETHEE II-S), nos demais casos.

A presença de incomparabilidades torna claro alguns aspectos do problema que devem ser investigados de modo a permitir a comparabilidade entre as alternativas. Há ainda a possibilidade de enriquecer o processo de análise e construção das relações de preferência a partir da inclusão, em um segundo momento, de informações a respeito do comportamento das funções preferência e dos fluxos de sobreclassificação do PROMETHEE após a condução da simulação. A avaliação do comportamento do grau de sobreclassificação entre pares de alternativas é adequada para a análise de incomparabilidades e para a construção de limiares de voto à designação da relação de preferência estocástica inicialmente estabelecida. Apesar de serem resultado de comparações pareadas, os fluxos  $\phi$ ,  $\phi^+$  e  $\phi^-$  do método PROMETHEE avaliam a intensidade de preferência de uma alternativa em relação a todas as outras. Dessa forma, a fim de complementar a avaliação das razões e argumentos de forma a se estabelecer uma relação de preferência entre um par de alternativas, é importante utilizar as medidas  $\pi(a,b)$  e  $\pi(b,a)$ .

Em circunstâncias nas quais, por exemplo, seja estabelecida a relação  $a P^{I-S} b$ , pois  $\theta_1 \geq \psi_P^+$ , o decisão pode utilizar o conceito de voto para refutar essa relação de preferência entre as alternativas se:

- Considerando todas as interações em que  $b P^I a$ , o valor esperado de  $\pi(b,a)$  é consideravelmente maior que o valor esperado de  $\pi(a,b)$ ; e



- Considerando todas as interações em que  $a \text{ P}^l b$ , o valor esperado de  $\pi(b,a)$  é próximo ao valor esperado de  $\pi(a,b)$ ;

Em outras palavras, embora a alternativa  $a$  seja preferível à alternativa  $b$  na maioria das interações, a análise de intensidade de preferência (ou grau de sobreclassificação) de  $b$  sobre  $a$ , quando  $b \text{ P}^l a$  ou  $a \text{ P}^l b$ , beneficia a alternativa  $b$  de tal forma que a relação de preferência previamente indicada pode ser refutada. O decisão pode definir um limiar de voto  $v^s$  que se refira aos valores esperados de  $\pi(b,a)$  acima do qual a relação  $a \text{ P}^{l-s} b$  não é aceita. Nesse caso, o analista deve alertar o decisão que tal medida pode não ser necessária se existirem valores muito pequenos de  $\theta_2$ . Esse conceito é semelhante ao conceito do limiar de voto dos métodos ELECTRE (Roy, 1991), que é uma medida de discordância para o estabelecimento de relações de sobreclassificação entre alternativas, porém adaptado para o contexto do método aqui proposto: o limiar  $v^s$  é definido no âmbito da avaliação global das alternativas, enquanto que o limiar de voto dos métodos ELECTRE é discutido no nível dos critérios. Assim como os limiares de voto dos métodos ELECTRE procuram apontar razões para que a assertiva  $a \text{ S } b$  ( $a$  sobreclassifica  $b$ ) não seja assinalada, a média de  $\pi(b,a)$  é uma forma de quantificar razões para que não se afirme, *a priori*, que  $a \text{ P}^{l-s} b$  apenas devido à probabilidade ou proporção com que  $a \text{ P}^l b$  nos cenários simulados (iterações).

#### 4. Aplicação Numérica

Explorar e produzir petróleo envolvem decisões sobre investimentos mediante incerteza e várias dessas incertezas são avaliadas por executivos da indústria petrolífera quando são tomadas decisões de investimento em projetos de óleo e gás, incluindo preços futuros do petróleo, o volume das reservas descobertas, os impactos e influências ambientais, os termos fiscais e contratuais, assim como peculiaridades operacionais existentes (Suslick & Furtado, 2001). Ainda, projetos devem ser avaliados de acordo com sua contribuição para que a empresa atinja seus objetivos, os quais devem representar os objetivos estratégicos que a companhia tenha definido previamente: mesmo que os resultados econômico-financeiros tenham importância inegável, nem sempre os benefícios dos projetos se manifestam de forma tão objetiva e tangível. De forma a determinar o valor efetivo do projeto para a organização, a avaliação de projetos na indústria do petróleo deve considerar aspectos econômicos, técnicos, humanos e comerciais. Um critério de avaliação puramente financeiro não consegue capturar outros aspectos que envolvem a seleção de projetos exploratórios que são, a depender da situação, tão importantes quanto às questões financeiras, ou até mais críticos (Lopes & Almeida, 2013). A aplicação conduzida nesta seção toma como base a Tabela 1, que apresenta uma lista de projetos de exploração de óleo e gás que devem ser ordenados à luz das preferências do decisão, considerando cinco critérios estabelecidos:

- O valor presente líquido (VPL) em caso de sucesso do projeto durante a fase exploratória, isto é, considerando as etapas posteriores de desenvolvimento da descoberta e produção de hidrocarbonetos;
- O volume recuperável (VR) de hidrocarbonetos que será produzido durante o ciclo de vida do projeto, considerando as etapas posteriores de desenvolvimento da descoberta e produção de hidrocarbonetos;
- O custo do poço seco (DHC – *dry hole cost*), ou seja, o capital de risco do projeto exploratório;
- O índice de risco político e fiscal relacionado à localização do projeto. São consideradas três opções de situação política: prejudicial (-1), neutra (0) e positiva (1);
- A probabilidade de sucesso da fase exploratória, isto é, o fator de chance geológico dos projetos. É o único critério cujos valores são determinísticos.



Em projetos de óleo e gás, o volume recuperável de um prospecto exploratório é quase sempre modelado como uma variável aleatória lognormal (Newendorp & Schuyler, 2000). Uma avaliação de projetos exploratórios na qual o decisor esteja interessado em maximizar a produção e maximizar o retorno financeiro dos projetos, a variável aleatória que modela o comportamento do volume impacta no resultado de ambos os objetivos: o volume produzido durante o ciclo de vida do projeto é a variável aleatória lognormal, enquanto que esta variável é um dos parâmetros que compõem o cálculo do VPL (Valor Presente Líquido) do projeto. Para esta aplicação, foi construído um modelo com base em planilhas eletrônicas e utilizou o software de simulação *@Risk* (Palisade Corporation), o que permitiu quantificar o impacto das variáveis de risco em cada critério relacionado, além de viabilizar a consideração de eventuais dependências probabilísticas e funcionais entre tais critérios sem a necessidade de estimar funções de densidade de probabilidade conjunta. A aplicação descrita nesta seção foi conduzida em um processador *Intel® Core™ i5-2520M* (memória 4 Gb) e o tempo incorrido durante a simulação foi de aproximadamente trinta segundos.

*Tabela 1 – Matriz de desempenho (Fonte: esta pesquisa)*

Projetos	Localização	VPL (US\$ MM)	VR (MM boe)	DHC (US\$ MM)	Índice Político (-1,0,1)	Prob. de sucesso (%)
P <sub>1</sub>	EUA	Normal (920;220)	Lognorm (285;70)	Triang (90;100;125)	({0,1\0,4\0,5})	20%
P <sub>2</sub>	Angola	Normal (850;280)	Lognorm (328;77)	Triang (40;45;70)	(0,5\0,45\0,05})	30%
P <sub>3</sub>	Angola	Normal (654;236)	Lognorm (105;40)	Triang (47;52;74)	({0,5\0,45\0,05})	20%
P <sub>4</sub>	Nigéria	Normal (1207;238)	Lognorm (318;72)	Triang (110;120;160)	({0,7\0,25\0,05})	18%
P <sub>5</sub>	Venezuela	Normal (421;165)	Lognorm (76;25)	Triang (30;35;50)	({0,45\0,45\0,1})	35%
P <sub>6</sub>	Reino Unido	Normal (833;245)	Lognorm (101;30)	Triang (25;28;36)	({0,3\0,3\0,4})	18%
P <sub>7</sub>	Brasil	Normal (988;179)	Lognorm (301;55)	Triang (140;155;180)	({0,5\0,3\0,2})	23%
P <sub>8</sub>	Brasil	Normal (536;170)	Lognorm (160;40)	Triang (95;119;160)	({0,5\0,3\0,2})	36%

Para aplicação do PROMETHEE II-S faz-se necessário estabelecer os parâmetros do PROMETHEE II que serão utilizados no estabelecimento das relações de preferências durante procedimento de simulação (Tabela 2), assim como os limiares de preferência estocástica propostos na seção 3 (Tabela 3).

*Tabela 2 – Parâmetros do PROMETHEE II (Fonte: esta pesquisa)*

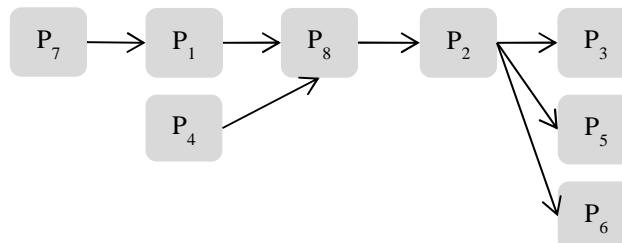
Objetivo	VPL (US\$ MM)	VR (MM boe)	DHC (US\$ MM)	Índice Político (-1,0,1)	Prob. de sucesso (%)
Objetivo	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Maximizar	Maximizar
Peso	0,20	0,20	0,15	0,15	0,30
Função preferência	tipo V	tipo V	tipo II	tipo I	tipo IV
Limiar de indiferença – $q$	50	30	20	-	0,05
Limiar de preferência – $p$	100	50	-	-	0,15



*Tabela 3 – Limiares de preferência estocástica (Fonte: esta pesquisa)*

Limiares	%
$\psi_P^+$	70%
$\psi_P^-$	40%
$\psi_I^+$	70%
$\psi_I^-$	50%

Ao efetuar o processo de simulação (10000 iterações), a etapa seguinte de exploração dos resultados simulados e de designação preliminar das relações de preferência resultou na pré-ordem parcial ilustrada na Figura 2.



*Figura 2 – Pré-ordem parcial gerada pelo PROMETHEE II-S (Fonte: esta pesquisa)*

Após a definição dessas relações de preferência, pode-se avaliar o comportamento de alguns valores de graus de sobreclassificação ( $\pi$ ) em conjunto com as probabilidades indicadas na Tabela 4. O projeto  $P_7$  é preferível a  $P_4$  em uma proporção de 62,9% dos cenários simulados, que é uma proporção mais próxima do valor do limiar superior de Preferência  $\psi_P^+$  definido anteriormente. A Tabela 5 apresenta as estimativas de valores esperados de alguns graus de sobreclassificação de acordo com a relação de preferência definida durante o procedimento de simulação (é, portanto um valor esperado condicional): por exemplo, observe que a estimativa do valor esperado de  $\pi(P_7, P_4)$ , nas iterações nas quais o projeto  $P_7$  foi considerado preferível a  $P_4$ , é 0,323. Caso seja necessário escolher apenas uma alternativa, devem ser avaliados os valores esperados de  $\pi(a, b)$  para os pares de ações que foram consideradas incomparáveis. Nesse sentido, verificou-se que o valor esperado de  $\pi(P_4, P_7)$  e  $\pi(P_7, P_4)$  são bem próximos para qualquer relação de preferência entre as duas alternativas, além de apresentarem variâncias semelhantes. Desse modo, conclui-se que  $P_7$  é preferível à  $P_4$  e, portanto, o projeto  $P_7$  é considerado a alternativa preferível dentre os oito projetos analisados, tendo em vista a agregação de preferências do decisior à luz dos critérios utilizados e sob a ótica de um procedimento de agregação de preferências não compensatório.

*Tabela 4 – Valores estimados de  $\theta_1$  e  $\theta_2$  (Fonte: esta pesquisa)*

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	-	78.4%	99.7%	43.8%	99.8%	99.2%	32.9%	66.0%
P2	21.6%	-	96.6%	15.7%	96.3%	94.7%	10.8%	34.1%
P3	0.4%	3.3%	-	0.1%	39.3%	43.1%	0.0%	0.5%
P4	56.0%	84.2%	99.9%	-	100.0%	99.7%	37.0%	72.1%
P5	0.2%	3.7%	60.5%	0.0%	-	53.0%	0.1%	0.7%
P6	0.8%	5.3%	56.8%	0.3%	46.8%	-	0.1%	1.0%
P7	66.9%	89.2%	100.0%	62.9%	99.9%	99.9%	-	80.1%
P8	34.0%	65.8%	99.5%	27.8%	99.3%	99.0%	19.8%	-



*Tabela 5 – Valores médios estimados de  $\pi(a,b)$  (Fonte: esta pesquisa)*

<i>Relação de preferência</i>	$\pi(P_1, P_4)$	$\pi(P_4, P_1)$	$\pi(P_4, P_7)$	$\pi(P_7, P_4)$
$a \text{ P}^{\text{II-S}} b$	0,268	0,420	0,343	0,323
$b \text{ P}^{\text{II-S}} a$	0,120	0,243	0,175	0,139
$a \text{ I}^{\text{II-S}} b$	0,167	0,376	0,277	0,237
todas as iterações	0,184	0,344	0,239	0,254

## 5. Conclusões

O presente trabalho discutiu e apresentou um método estocástico não compensatório para apoio multicritério a decisão: o PROMETHEE-S. O método proposto é uma extensão do PROMETHEE e utiliza um procedimento de simulação para apoiar a análise das relações de preferência entre alternativas em um ambiente de incerteza relativa ao desempenho das alternativas nos critérios avaliados. Em contraponto a MAUT, o PROMETHEE-S utiliza o paradigma dos métodos de sobreclassificação, de modo a evitar o uso de hipóteses matemáticas mais complexas para o decisor. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a utilização de métodos de sobreclassificação em problemas de decisão mediante incerteza e discutidos os pontos principais deste tipo de enfoque. Nesse sentido, o ponto fundamental do método proposto é que os elementos fundamentais de incerteza são as performances das alternativas e não o comportamento das funções ou índices de preferências. Cabe salientar que esta afirmativa não exclui os potenciais benefícios advindos da análise do comportamento das funções de preferência, uma vez que essas informações podem ser úteis ao se avaliarem relações de incomparabilidade entre alternativas.

Uma aplicação numérica do método foi conduzida em um contexto de priorização de projetos exploratórios de óleo e gás. Com isso, foi possível demonstrar a aplicabilidade do método em problemas de decisão reais. O método dá suporte ao decisor no estabelecimento das relações de preferência entre os projetos com base em parâmetros de fácil interpretação: os limiares de preferência do PROMETHEE e os limiares de preferência estocástica propostos para apoiar a definição das relações de preferência no PROMETHEE-S. Ademais, o uso da simulação permite a modelagem das variáveis estocásticas de maneira mais simples e intuitiva para o decisor, ao passo que evita a necessidade de determinação de probabilidades conjuntas.

A proposição e discussão dos principais elementos teóricos do PROMETHEE-S e a aplicação numérica realizada mostraram como uma abordagem de sobreclassificação pode ser utilizada de forma simples e apropriada na análise de problemas de decisão multicritério em situações de incerteza. É importante verificar que a utilização de métodos de sobreclassificação em problemas de decisão de cunho estocástico ainda é pequena se comparada à quantidade de propostas baseadas na MAUT. Portanto, é uma área com grandes oportunidades de desenvolvimento e construção de soluções dentro da área do AMD.

## Referências

**Almeida, A.T.de, Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério**, Editora Atlas, São Paulo, 2013.

**Aouam, T., Chang, S.I. e Lee, E.S.** (2003), Fuzzy MADM: An outranking method, *European Journal of Operational Research*, 145, 317-328.

**Brans, J.P. e Vincke, P.H.** (1985), A preference ranking organization method: the PROMETHEE method for MCDM, *Management Science*, 31, 647-656.



**D'Avignon, G.R. e Vincke, P.H.** (1988), An outranking method under uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 36, 311-321.

**Goumas, M. e Lygerou, V.** (2000), An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment, *European Journal of Operational Research*, 123, 606-613.

**Gravel, M., Martel, J.M., Nadeau, R., Price, W. e Tremblay, R.** (1992), A multicriterion view of optimal resource allocation in job-shop production, *European Journal of Operational Research*, 61, 230-244.

**Hyde, K., Maier, H.R. e Colby, C.** (2003), Incorporating uncertainty in the PROMETHEE MCDA method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12, 245-259.

**Lopes, Y.G. e Almeida, A.T.de** (2013), A multicriteria decision model for selecting a portfolio of oil and gas exploration projects, *Pesquisa Operacional*, 33, 417-441.

**Mareschal, B.** (1986), Stochastic multicriteria decision making and uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 26, 58-64.

**Martel, J.M. e Matarazzo, B.**, *Other outranking approaches*, em Figueira, J., Greco, S. e Ehrgott, M. (Eds.), *State of the Art of Multiple Criteria Decision Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2005.

**Martel, J.M. e Zaras, K.** (1995), Stochastic dominance in multicriterion analysis under risk. *Theory and Decision*, 39, 31-49.

**Newendorp, P.D. e Schuyler, J.**, *Decision Analysis for Petroleum Exploration*. Planning Press, 2000.

**Roy, B.** (1991), The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, *Theory and Decision*, 31, 49-73.

**Stewart, T. J.**, *Dealing with uncertainties in MCDA*, em Figueira, J., Greco, S. e Ehrgott, M. (Eds.), *State of the Art of Multiple Criteria Decision Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2005.

**Suslick, S.B. e Furtado, R.** (2001), Quantifying the value of technological, environmental and financial gain in decision models for offshore oil exploration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 32, 115-125.

**Vincke, P.**, *Multicriteria decision-aid*, Wiley, Bruxelles, 1992.