

A TOOL FOR SCALING WEIGHTS FOR MULTI-ATTRIBUTE DECISION MODELS FOR OIL EXPLORATION AND PRODUCTION SYSTEMS

Ricardo Furtado (1) Saul B. Suslick (2)

(1) (2) State University of Campinas - UNICAMP

Abstract: *The firms should have an adequate decision tool for evaluating the benefit/cost impacts from technology, finance, and environment. The multi-attributes method for decision analysis (MAUT) provides a logical mean of decision for conflicting objectives. The MAUT is based upon the firm risk preference and combines the objectives in the unique additive or multiplicative model. This paper presents a framework for evaluating the weights of such multi-criteria decision models, using a high dimensional sensitivity analysis. The main advantage of this approach is that it allows a better simultaneous change of the weights and provides indications for a robustness control of the weights. The weights are obtained by a random process and hierarchically adjusted using the analyst preferences. The simulation procedures were applied in a hypothetical study case of a petroleum exploration and production system in an offshore project. The simulation for production alternatives involving six alternatives: FPSO, TLP, and SS using the financial, environmental, and technological attributes. The TLP system is the best option for 88 percent of simulations for the additive model, while the multiplicative model has a higher score of 98 percent. In both simulations a stochastic predominance is observed indicating a good robustness of the alternatives.*

1 - Introdução

O contexto atual de elevada volatilidade de preços, redução de custos e alto nível de competitividade obrigam as empresas de petróleo ao emprego de técnicas de decisão específicas para o tratamento e análise das suas opções de investimento na produção. Devido à intensidade de capital e a complexidade das etapas para a execução de um projeto de desenvolvimento e produção no setor petrolífero, as decisões e as escolhas em um projeto estão deixando de ser intuitivas.

De uma maneira geral, no processo decisório, o investidor se defronta com dois objetivos: maximizar o retorno esperado e minimizar o risco. A intuição do analista é importante, mas insuficiente, pois não possibilita uma revisão e uma análise da qualidade das decisões passadas, quando os objetivos acima mencionados estão envolvidos de forma nem sempre harmônica.

O método de análise de decisão com múltiplos objetivos (MAUT) proporciona um significado lógico e tratável quando estão envolvidos no processo decisório objetivos contraditórios (*trade-off*). A relação de "*trade-off*" entre duas variáveis pode ser entendida como a atribuição de um peso mais significativo de um variável em detrimento de outra. Nem sempre essa forma de compensação conduz a recompor a somatória anterior, pois algumas variáveis apresentam uma relação não-linear.

O MAUT é formulado de acordo com as preferências em relação ao risco do gerente ou de um grupo de pessoas que definem quanto, como e onde será investido o capital da empresa. Uma das maiores dificuldades para formulação do MAUT é a atribuição de pesos aos atributos, principalmente quando o número de atributos é maior que dois. Na maioria dos casos as empresas já possuem um prévio conhecimento da importância de cada variável, mas não conseguem, com exatidão, definir estes pesos. Em outros casos os tomadores de decisão não tem noção da hierarquização dos atributos, tornando ainda mais complexo a definição de um modelo que represente adequadamente o comportamento e a capacidade da empresa em relação ao risco.

Dentro dessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é introduzir uma metodologia que permita avaliar os pesos dos atributos no modelo de decisão com múltiplos critérios através da análise de sensibilidade de dimensão elevada. Segundo Butler *et al.* (1996), uma das vantagens da análise de

sensibilidade de dimensão elevada em relação aos métodos tradicionais, é a possibilidade de hierarquizar os pesos, bem como a inclusão de um teste de robustez. A análise de sensibilidade tradicional somente é funcional quando aplicada em até duas variáveis. Na atualidade, as empresas do setor de exploração e produção de petróleo almejam mais que dois objetivos, como por exemplo: elevado retorno financeiro, baixo impacto ambiental, alto ganho tecnológico e segurança nas suas operações. O uso da análise de sensibilidade unidimensional não fornece uma avaliação mais extensiva do modelo de decisão, pois elimina uma análise simultânea e interativa dos pesos. Por sua vez, a análise de sensibilidade de dimensão elevada avalia o modelo de decisão com “n” atributos, para n maior que um. Esta abordagem foi aplicada por Butler *et al.* (op.cit) em um modelo de escolha do melhor local para a instalação de uma usina termelétrica envolvendo treze opções locais.

No nosso trabalho, a análise de sensibilidade com dimensão elevada será utilizada na exploração e produção de petróleo *offshore*. No primeiro caso, o decisor tem que escolher qual o melhor prospecto para investir seu capital, dentro de três opções. Este cenário foi primeiramente desenvolvido por Nepomuceno *et al.* (1999) utilizando dois atributos: risco financeiro e tecnológico. Os atributos foram considerados mutuamente independentes, permitindo assim a utilização do modelo de utilidade aditivo. Para a aplicação da análise de sensibilidade com dimensão elevada, uma terceira variável é incorporada no modelo: risco de mercado; passando assim a decisão ser baseada em três atributos. Quanto mais atributos são incorporados, mais complexa torna-se a decisão, obrigando a aplicação de métodos mais sistemáticos para a estimação do modelo e avaliação dos resultados. Com a análise de sensibilidade de dimensão elevada, o tomador de decisão pode definir qual atributo tem mais importância para a empresa e qual importância relativa de cada um, além de verificar a coerência das preferências do decisor com o modelo obtido.

Uma aplicação da análise de decisão com múltiplos objetivos na área de produção de petróleo offshore foi feita por Castro & Furtado (1998) e reformulado por Castro *et al.* (2000) utilizando três atributos: risco financeiro, tecnológico e ambiental. A decisão consiste em escolher qual plataforma marítima opera de forma mais eficiente em uma bacia predeterminada e por qual meio (oleoduto ou navio) será transportado o óleo. Neste trabalho, os pesos foram definidos de acordo com levantamentos bibliográficos e através de pesquisas junto aos gerentes responsáveis pelas decisões. Os atributos foram considerados mutuamente independentes, permitindo assim a aplicação do modelo de utilidade aditivo. A análise de sensibilidade com dimensão elevada permite verificar a interação entre os pesos e a qualidade da estimação, além de testar a robustez do modelo. O método é aplicado nos dois modelos de utilidade (aditivo e multiplicativo) para tomadas de decisão. Através da análise de sensibilidade de dimensão elevada é possível fazer um comparativo entre os dois modelos de utilidade, verificando a robustez e a coerência do modelo ajustado.

2 – Metodologia

Uma forma conveniente de expressar a preferência em relação ao risco é através da função utilidade (Von Neumann & Morgenstern, 1953 e Pratt, 1964). A função utilidade é construída atribuindo-se um valor numérico maior para o melhor resultado possível e um valor menor para um evento menos preferível. A obtenção de valores numéricos intermediários permite construir a curva da função utilidade que é única para cada tomador de decisão.

A teoria de utilidade com múltiplos atributos, por definição, envolve uma tomada de decisão que escolhe uma entre um número de alternativas baseadas em dois ou mais objetivos. Os dois métodos predominantes de associação das alternativas para o MAUT são as formas aditiva e multiplicativa (Keeney & Raiffa, 1976). Quando os atributos do modelo são puramente independentes, utiliza-se a forma aditiva. Se a independência não é satisfeita, a forma multiplicativa deve ser utilizada para agregar as funções utilidades de cada atributo. A forma geral do modelo aditivo é:

$$u(X) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \quad (1)$$

onde x_i é o valor do atributo i ; $u_i(.)$ é o valor da utilidade do atributo i ; $0 \leq k_i \leq 1$ são as constantes escalares (pesos) para os n atributos tal que $\sum_{i=1}^n k_i = 1$.

Caso a independência entre os atributos não seja satisfeita o modelo multiplicativo que é dado por:

$$1 + ku(X) = \prod_{i=1}^n [1 + k k_i u_i(x_i)] \quad (2)$$

onde x_i e $u_i(.)$ são definidos como no caso aditivo; $0 \leq k_i \leq 1$ são as constantes escalares (pesos) para os n atributos tal que $\sum_{i=1}^n k_i \neq 1$; e k , conhecida como constante comum, é uma

constante escalar adicional definida como $1 + k = \prod_{i=1}^n [1 + k k_i]$ (veja Keeney & Raiffa, 1976). O

modelo aditivo é um caso especial da forma multiplicativa com $\sum_{i=1}^n k_i = 1$.

Uma das primeiras tarefas na construção do MAUT é atribuir pesos para os objetivos da empresa, e como estes devem ser agregados no modelo. Os pesos do modelo com múltiplos objetivos medem a importância de pior para melhor entre os atributos. Portanto, por se tratar do comportamento do modelo, esta atribuição de pesos tem que ser cuidadosa e deve representar de forma fiel as preferências da empresa em relação aos seus principais objetivos.

2.1 – Análise de Sensibilidade

Além de sua aplicação tradicional, a análise de sensibilidade também pode ser aplicada aos pesos dos atributos. Os pesos são ajustados para investigar o impacto de mudanças na importância dos objetivos estratégicos da empresa. O decisor pode observar os efeitos destas variações nas mudanças dos portfólios mesclados. Este processo de análise de sensibilidade é muito útil para o tomador de decisão entender os impactos dos objetivos e os valores de *tradeoffs* entre os atributos na avaliação da estratégia de investimento mais apropriada. A análise de sensibilidade nas funções de preferências individuais permite ao decisor examinar as implicações de diferentes julgamentos de valores de pessoa para pessoa dentro da empresa. Este processo proporciona uma idéia sobre possíveis resultados diferentes entre as tomadas de decisões individuais na companhia.

Após concluída a análise de sensibilidade, o analista tem condição de avaliar se existem consideráveis diferenças entre os resultados. Caso estas diferenças existam, deve-se avaliar e investigar as razões das mesmas. Em caso de inconsistência do modelo com as preferências do decisor, é necessário reformular o modelo até que os resultados tornem-se coerentes.

Existem algumas formas de análise de sensibilidade e a mais difundida e aplicada é o método unidimensional onde uma variável é alterada, mantendo as restantes constantes, em casos multivariados. Este método não é extremamente eficiente, pois ele não considera a interação entre as variáveis. Uma segunda metodologia que foi aplicada por Butler *et al.* (1997) em problema de decisão, consistindo na variação de duas variáveis simultaneamente (análise de sensibilidade bidimensional), o que de certa forma soluciona uma parte do problema unidimensional. Este método apresenta uma solução satisfatória em modelos com até três variáveis, conseguindo capturar as interações entre as variáveis.

Sabemos que atualmente os problemas de decisão estão cada vez mais complexos e com um número cada vez maior de considerações que devem ser incorporadas. As empresas tem que se preocupar com variáveis do tipo ganho financeiro, mudanças tecnológicas, variação de preços, legislação ambiental, distância do mercado consumidor, imagem corporativa e outras, e os métodos de análise de sensibilidade (uni e bidimensional) não funcionam perfeitamente segundo os interesses do analista nestas condições. Outra preocupação do analista seria quantificar a importância e analisar a interação entre estas variáveis, onde os métodos tradicionais de avaliação não apresentam um desempenho adequado e eficiente.

Em seu trabalho, Butler *et al.* (1996), discute três classes de simulações: geração dos pesos aleatoriamente, pesos aleatórios preservando a importância entre os atributos e pesos aleatórios em função de uma distribuição hipotética.

2.1.1 – Pesos Aleatórios

Neste caso, os pesos para os atributos são gerados totalmente aleatórios. Este processo de simulação implica que o tomador de decisão não sabe qual a importância relativa dos objetivos, ou seja, o decisor desconhece a classificação dos atributos por ordem de importância. Em muitos cenários com múltiplos critérios, a classificação das alternativas limita de forma significativa o potencial de ordenação. É simples achar as alternativas dominantes e dominadas por inspeção; entretanto, relações sutis que determinam a dominância estrutural geralmente são mais complicadas de identificar. Usando a simulação de geração de pesos aleatórios pode ser possível descobrir estas relações de ordenação entre as alternativas.

O processo de obtenção destes pesos é bem simples, bastando simular aleatoriamente estes pesos e atribuí-los para cada atributo, independente da importância de cada objetivo. A Figura 1 apresenta fluxograma de simulação dos pesos.

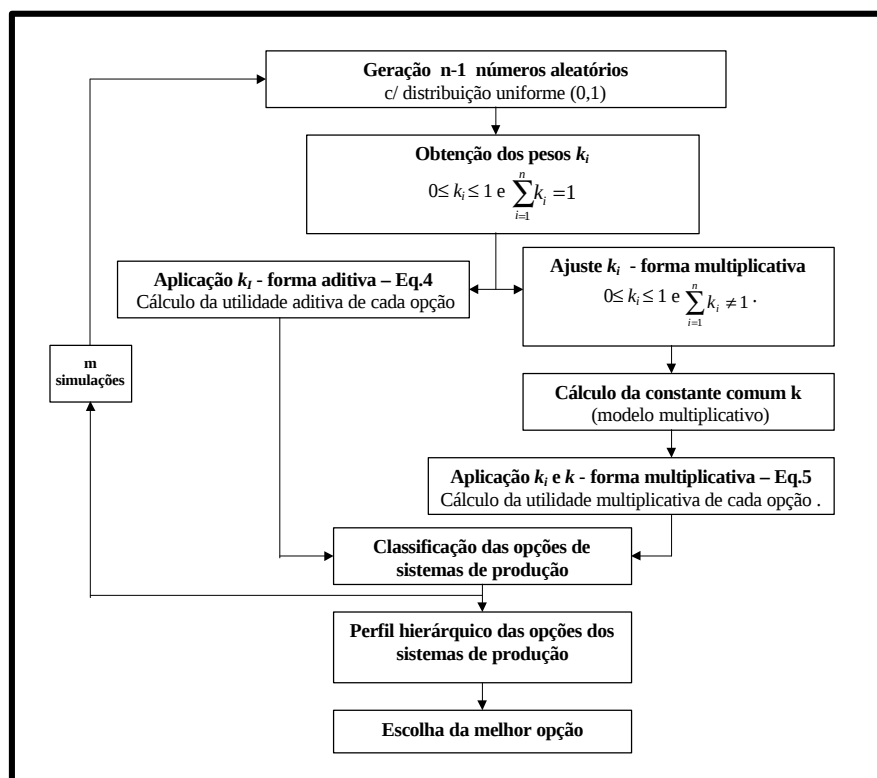


Figura 1 – Fluxograma das etapas utilizadas na simulação dos pesos na análise de sensibilidade de dimensão elevada

2.1.2 – Pesos Ordenados

O uso da simulação de pesos totalmente aleatórios ignora o julgamento em relação aos *tradeoffs* entre as medidas, a qual pode ser aplicada em situações onde alguns atributos são mais importantes que os outros. Por outro lado, a estimação exata dos pesos pode ser legitimamente contestável. Os números vinculados a estes pesos podem implicar uma exatidão que não é apropriada para a análise.

Enquanto a atribuição de um valor exato para os pesos pode ser questionada, uma ordem de importância relativa dos atributos pode ser bem menos controversa. A ordem de importância refere-se a ordenação dos atributos, onde o objetivo mais preferido pelo decisor é considerado como o melhor e o objetivo de menor importância o pior. Para obter esta ordenação o processo é bem simples e possui um erro menor que a estimação numérica dos pesos.

O processo de simulação é semelhante ao aplicado ao método de pesos totalmente aleatórios, bastando apenas atribuir os pesos aos objetivos de acordo com a ordenação dos atributos, conforme as preferências do decisor.

2.1.3 – Pesos com Distribuição

Este terceiro tipo de análise de sensibilidade através de simulação considera que o processo de estimação dos pesos está sujeito a variação segundo uma distribuição estatística. Para um simples tomador de decisão, esta variação pode ser em função dos erros associados com a estimação dos pesos. Em relação a um grupo de pessoas, diferentes opiniões e preferências dos decisores são responsáveis por esta variação. A idéia da análise de sensibilidade de dimensão elevada, é considerar a estimação dos pesos como resposta de uma possível distribuição.

Para explorar as implicações da variação de resposta, as estimações dos pesos são tratadas como médias de uma distribuição de probabilidade, e os pesos são gerados em função destas distribuições. Embora esta aproximação resulta na escolha dos pesos que são relativamente próximos (dependendo das suposições consideradas para definir a distribuição) dos atuais, ela permite a violação da ordenação dos pesos estimados na sua seleção.

3 – Aplicação da Metodologia

A análise de sensibilidade de dimensão elevada foi aplicada em um estudo de exploração e outro de produção de petróleo apresentado por Furtado (2000). No primeiro caso, tem-se que decidir qual o prospecto exploratório melhor se ajusta aos objetivos da empresa. No segundo estudo, o decisor tem que escolher qual plataforma marítima deve ser usada para a produção de uma bacia conhecida.

3.1 – Escolha do Melhor Propecto de Exploração de Petróleo

O primeiro estudo de caso será baseado no trabalho desenvolvido por Nepomuceno *et al.* (1999), apresentando uma ferramenta que incrementa a qualidade da decisão para a exploração de petróleo, incluindo os objetivos financeiro e tecnológico da empresa. Neste estudo, o MAUT é utilizado para combinar o ganho das mudanças tecnológicas dentro do investimento de capital das empresas nos processos de exploração e produção de petróleo (E&P). Os autores definem qual deve ser a participação das empresas em projetos de exploração *offshore* em três bacias brasileiras.

As mudanças nas tendências que vem ocorrendo no setor de exploração e produção de petróleo nas últimas décadas, tem criado novas oportunidades através do corte de custos e da revitalização da indústria. Significativos avanços tem ocorrido na tecnologia *upstream*, particularmente nos testes e nas análises dos campos, com os métodos de sísmica 3D e a melhor visualização do comportamento dos reservatórios. A taxa de sucesso dos furos experimentais dos

poços tiveram um aumento radical, incluindo novas técnicas de perfuração, as quais aumentaram as taxas de descobertas. As tecnologias de produção flutuante reduziram o tempo de desenvolvimento dos campos. Todos estes ganhos tecnológicos tem se refletido no descobrimento de novos campos e na redução de seu custo nesta década (Nepomuceno *et al.*, 1999).

Segundo estes autores, este cenário cria novos determinantes na alocação de capital entre um grupo de projetos caracterizados pelo alto grau de tecnologia contido, pelo risco e pela incerteza. Apesar de sua importância na adição de reservas, no aumento da produção de hidrocarbonatos e na redução de custos, os valores tecnológicos frequentemente não são medidos e incorporados no processo de análise de risco. Algumas empresas analisam a tecnologia como um custo e não como um investimento que gerará um bom retorno.

No modelo proposto por Nepomuceno *et al.* (1999), os objetivos da empresa são divididos em dois: maximização do capital, medido pelo Valor Presente Líquido (VPL) e maximização do ganho tecnológico em E&P de petróleo. Com os objetivos definidos, a empresa tem que decidir em qual projeto deve alocar seu capital de acordo com a taxa de partição em cada um.

Neste caso, foram utilizado dois atributos (financeiro e tecnológico) para definir qual prospecto de exploração de petróleo fornece o melhor retorno financeiro de acordo com o montante capital que a empresa dispõe para investimento. O modelo decisão utilizado foi o aditivo (Eq. 1) e os pesos dos atributos foram definidos empiricamente. Neste novo estudo, será aplicada a análise de sensibilidade de bidimensional e de dimensão elevada, tanto para o modelo aditivo como para o multiplicativo (Eq. 2), além disso, um terceiro atributo será incorporado no modelo, o risco de mercado que será definido mais adiante.

Primeiramente é feita análise financeira de cada um dos prospectos. Na Tabela 1 é apresentado o resumo da avaliação econômica.

Tabela 1 – Resumo da avaliação econômica dos prospectos de exploração de petróleo.

Prospecto	Capital de Risco MMUS\$	VPL MMUS\$	Reserva MMBBL	Probabilidade de Sucesso (%)
A	60,08	153,80	300	33
B	232,46	448,30	300	50
C	95,16	363,20	300	25

Baseando-se no comportamento das empresas, a função utilidade mais usada na exploração de petróleo para representar o risco financeiro é uma função exponencial do tipo:

$$u(x) = e^{-cx} \quad (3)$$

onde ,

$u(x)$ = utilidade do atributo no ponto x ,

x = valor da variável considerada (valor monetário - VPL),

c = índice de aversão ao risco.

Para construir a curva de utilidade do risco financeiro basta atribuir 1 para o maior valor de VPL (neste caso igual a 500 MMUS\$) e zero para o pior (-300 MMUS\$). Os valores intermediários são obtidos por interpolação. Na Figura 2 tem-se o ajuste da curva de utilidade para dois valores de tolerância ao risco.

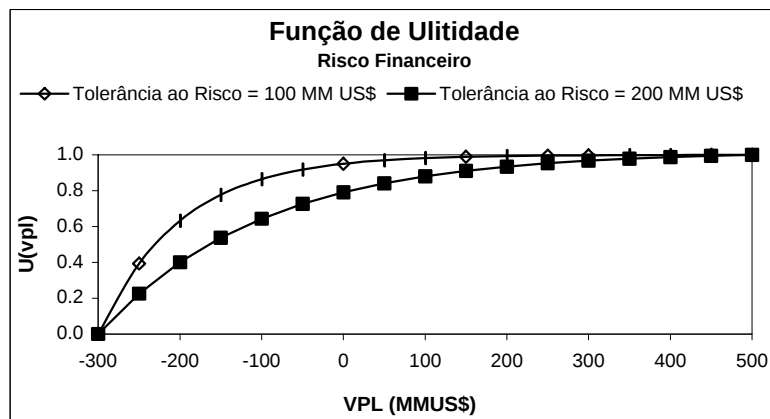


Figura 2 – Curva de utilidade do atributo financeiro (exploração)

Por ser tratar de prospectos *offshore*, o atributo ganho tecnológico foi medido através da lâmina d’água e da profundidade do reservatório, ou seja, quanto maior a lâmina d’água e a profundidade do reservatório, maior será o ganho tecnológico da empresa. Esta situação possui um *tradeoff*, pois quanto maior a lâmina d’água, menor a profundidade do reservatório.

Na Tabela 2 é apresentado o resumo do ganho tecnológico dos três prospectos.

Tabela 2 – Resumo das características do reservatório dos prospectos de exploração de petróleo

Prospecto	Lâmina D’água metros	Reservatório metros	Probabilidade de Ocorrência (%)
A	1200	5500	100
B	1600	3500	100
C	1000	4300	100

Para o atributo *risco tecnológico* é possível encontrar alguns estudos onde foram adotados como função utilidade o modelo logístico, que é dado por:

$$u(x) = \frac{1}{a - be^{-cx}} \quad (4)$$

onde:

a e b = constantes do modelo,

c = coeficiente de aversão ao risco,

u(x)= utilidade do atributo no ponto x,

x = variável de interesse (ganho tecnológico).

Segundo Lanford (1972), esta função apresenta uma curva do tipo S, com uma sucessão de diferentes tecnologias, que aparecem em um certo período com intuito de atender uma determinada demanda. Oligney & Economides (1998) usam a curva logística para ajustar uma curva tecnológica para a produção de petróleo.

O primeiro passo para ajustar as curvas de utilidade do atributo tecnológico foi definir qual o ponto aonde a utilidade é igual a 1, e aonde é igual a 0. Para a fator tecnológico lâmina d’água, 6500 metros é valor onde a utilidade é igual a 1, e 200 metros igual a zero. Já para o fator profundidade do reservatório, 6500 metros tem utilidade 1, e 500 metros utilidade zero. Com a definição do par de utilidades 0 e 1, o próximo passo é ajustar os dois modelos utilizando a Eq. 2 como modelo para a obtenção dos valores intermediários. Para o fator lâmina d’água temos a seguinte equação:

$$u(x) = 1 - \frac{1}{1 + 0,01306e^{-0,005(x)}} \quad (5)$$

onde x é a lâmina d'água em metros. Para o fator profundidade do reservatório temos:

$$u(y) = \frac{1}{1 + 600e^{-0,002y}} \quad (6)$$

onde y é a profundidade do reservatório em metros.

Assim tem-se um par de utilidades cuja soma é a utilidade do atributo tecnológico, ou seja, $U(X,Y) = U(X) + U(Y)$, onde $U(X,Y)$ é a utilidade do ganho tecnológico, X é a medida da lâmina d'água e Y a medida da profundidade do reservatório.

Para a aplicação da análise de sensibilidade bidimensional e de dimensão elevada foi acrescentado aos objetivos da empresa um terceiro atributo: *risco de mercado*. O atributo risco de mercado pode ser definido como sendo a facilidade que a empresa tem em transformar o óleo bruto em produtos derivados do petróleo, ou seja, a facilidade de acesso à estrutura de transformação da matéria prima proveniente da produção de petróleo. No nosso caso, o prospecto B é o que está mais próximo da estrutura de transformação, sendo atribuído utilidade de 0,95, ao prospecto C foi atribuído uma utilidade de 0,20, por possuir a menor facilidade em relação a estrutura de transformação. O prospecto A tem uma estrutura intermediária, ou seja, inferior à do prospecto B e superior à do prospecto C, assim foi atribuído 0,85 como valor de utilidade.

Com a definição das utilidades dos atributos, o passo seguinte é aplicar estas utilidades no modelo de decisão múltiplos atributos. Na Tabela 3 tem-se os pesos definidos para cada atributo e na Tabela 4 tem-se os valores de utilidade de cada atributo, onde na última coluna é calculada a utilidade final de cada prospecto através do modelo aditivo (Eq. 1).

Tabela 3 – Pesos dos atributos para o modelo de exploração de petróleo

Atributos	Pesos
VPL	0,70
Lâmina d'água	0,05
Profundidade do reservatório	0,05
Mercado	0,20

Tabela 4 – Utilidades de cada atributo e utilidade final

Prospecto	Utilidade dos Atributos				Total ^(*)
	VPL	L. D'água	P. Reservatório	Mercado	
A	0,9133	0,8405	0,9005	0,8500	0,8964
B	0,9945	0,9750	0,1684	0,9500	0,9433
C	0,9817	0,6597	0,6464	0,2000	0,7925

(*) $Total_A = 0,9133 \times 0,70 + 0,8405 \times 0,05 + 0,9005 \times 0,05 + 0,8500 \times 0,20 = 0,8964$

Com a aplicação da utilidade de cada atributo no modelo aditivo de decisão, temos que o prospecto B é o que mais interage com os objetivos da empresa, sendo então o preferido. A vantagem do prospecto B sobre os demais é muito pequena, não atingindo 7%, dessa forma uma análise de sensibilidade auxiliará a avaliação do modelo. A proposta é aplicar primeiramente uma análise de sensibilidade bidimensional para avaliar o comportamento do modelo aditivo com todas as combinações possíveis de pesos. A segunda etapa é fazer a análise de sensibilidade de dimensão elevada utilizando o método dos pesos ordenados para os modelos aditivo e multiplicativo, avaliar o cenário geral da decisão e verificar se corresponde com as preferências da empresa.

A análise de sensibilidade bidimensional é eficiente no caso de três atributos, mas somente para o modelo aditivo. A Figura 3 representa a análise de sensibilidade bidimensional do modelo de

decisão para a escolha do melhor prospecto de exploração de petróleo.

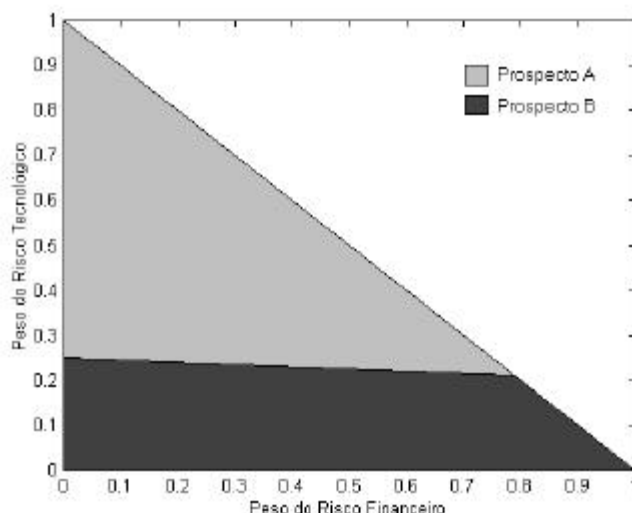


Figura 3 – Alternativas de prospecto de exploração de maior preferência entre todas as combinações de pesos

Conforme a combinação dos pesos, somente as alternativas A e B tem a possibilidade de serem preferidas pelo decisor (Figura 3). Suponha que a combinação de pesos seja 0,70, 0,10 e 0,20 para os atributos financeiro, tecnológico e mercado respectivamente (configuração proposta na Tabela 3), o prospecto B é a melhor alternativa para a empresa. A análise de sensibilidade bidimensional é obtida através da simulação de todas as configurações dos pesos, não levando em conta a hierarquização dos atributos. Apesar de existir uma predominância do prospecto A sobre o B (área de A maior que a área de B na Figura 3), quando os atributos são ordenados, a área do prospecto B torna-se maior que a de A e o prospecto C não é o preferido em nenhuma combinação de pesos. Este fato será melhor observado na análise de sensibilidade de dimensão elevada, próxima etapa deste trabalho.

A análise de sensibilidade bidimensional não verifica a interação dos pesos do modelo aditivo para n maior que 3 e para n maior que 2 no modelo multiplicativo, onde n é o número de atributos. Para avaliar e testar a robustez do modelo de decisão, é aplicada no estudo da escolha do melhor prospecto de exploração de petróleo a análise de sensibilidade de dimensão elevada.

A análise de sensibilidade de dimensão elevada é baseada em um processo estocástico, exigindo a aplicação de um software com capacidade de cálculo matricial. Neste estudo foi utilizado o software MATLAB 5.2 (1999) e adotou-se como referência o nível de 10.000 simulações para a construção do modelo aditivo e multiplicativo. O método utilizado foi o dos pesos ordenados, pois conforme visto na Tabela 3, o decisor tem uma clara preferência em relação aos atributos.

Após a simulação dos pesos e a obtenção das utilidades de cada uma das opções para as 10.000 simulações, é calculada a frequência relativa da classificação das opções conforme o valor da utilidade (Tabela 5 e Tabela 6).

Tabela 5 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo aditivo (exploração)

Frequência Relativa (Modelo Aditivo)			
Classificação	Bacia		
	A	B	C
1	9,97%	90,03%	0,00%
2	86,24%	9,97%	3,79%
3	3,79%	0,00%	96,21%

O prospecto B teve a maior utilidade em 90,03% das simulações e 9,97% das simulações a sua utilidade foi menor que a do prospecto A. Em nenhuma simulação o prospecto C foi selecionado como melhor, mas 3,78% das vezes este prospecto teve a segunda melhor utilidade. O prospecto A é o único que, nas simulações, foi classificado nas três posições possíveis, mas houve uma predominância da segunda classificação com 86,24% das simulações. Para verificar o comportamento das alternativas, traçamos o perfil hierárquico, que é a frequência acumulada de cada opção em relação a sua classificação (Figura 4).

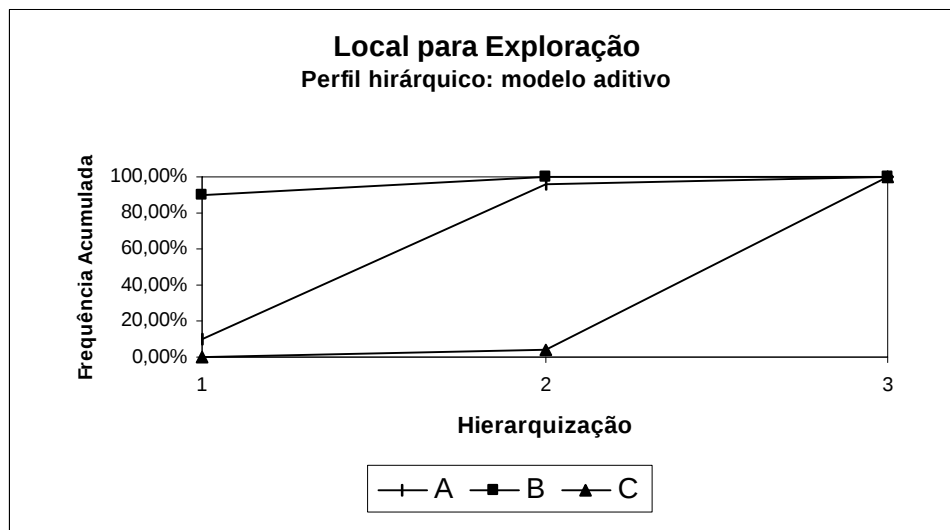


Figura 4 – Perfil Hierárquico: forma aditiva (exploração)

O prospecto B domina estocasticamente as demais alternativas (Figura 4) e a alternativa C é dominada pelas demais. Através do Figura 4 é possível verificar e avaliar o comportamento do modelo, tendo uma visão mais ampla do ambiente em que será tomada a decisão.

Quando aplicamos a análise de sensibilidade de dimensão elevada no modelo multiplicativo, a dominância do prospecto B sobre o A diminui, ou seja, a frequência de B ser o melhor prospecto cai para 69,37% (Tabela 6). Já a frequência do prospecto C na segunda posição também diminui para 1%, sendo ainda mais dominado pelas demais alternativas.

Tabela 6 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo multiplicativo (exploração)

Frequência Relativa (Modelo Multiplicativo)			
Classificação	Bacia		
	A	B	C
1	30,63%	69,37%	0,00%
2	68,37%	30,63%	1,00%
3	1,00%	0,00%	99,00%

Seguindo as mesmas etapas do modelo aditivo, a Figura 5 apresenta o gráfico de frequência acumulada de cada uma das opções em relação a classificação obtida.

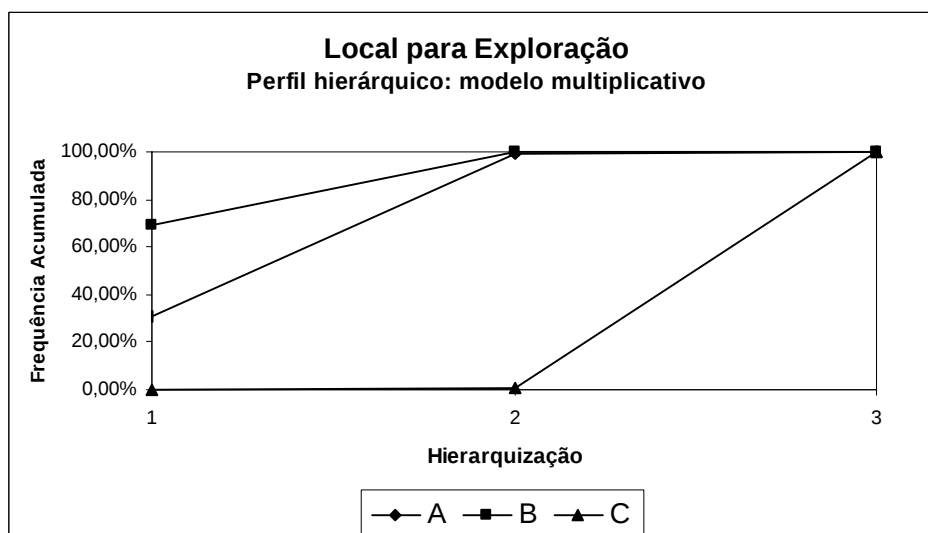


Figura 5 – Perfil Hierárquico: forma multiplicativa (exploração)

Novamente o prospecto B domina estocasticamente as demais alternativas, apesar deste domínio ser menos acentuado. O prospecto B é o que mais interage com os objetivos da empresa, mas é importante ressaltar que o prospecto A pode ser uma boa alternativa, caso ocorra alguma mudança cultural na empresa, ou até mesmo se o prospecto B apresentar algum aspecto não previsto anteriormente.

A vantagem desta análise é proporcionar ao tomador de decisão um cenário onde a decisão está sendo tomada, além de permitir avaliar a coerência do modelo com as preferências do decisor. Caso o modelo de decisão não se ajuste às necessidades da empresa, deve-se reformulá-lo até que o decisor sinta-se confortável com a alternativa proposta.

3.2 – Escolha do Melhor Sistema de Produção de Petróleo

Como segundo exemplo prático nesta dissertação, vamos considerar uma companhia de petróleo que tenha os seguintes objetivos estratégicos: maior lucratividade, preservação do meio ambiente, segurança e liderança tecnológica.

Para testar a metodologia proposta foi escolhido um cenário de produção proposto por Castro & Furtado (1998) e reformulado por Castro *et al.* (2000). A situação hipotética é um exemplo de decisão pela qual muitas corporações devem estar passando nestes últimos anos, após a descoberta de um novo campo de petróleo em uma bacia já madura, em lâmina d'água de cerca de 800 metros e com potencial de produção de 100.000 barris/dia, considerando-se o risco financeiro, tecnológico e ambiental, é necessário definir o melhor sistema de produção dentre as seguintes alternativas:

- 1^a) Uma plataforma Semi Submersível (SS), escoando a produção de óleo via um navio “*Floating, Storage and Offloading*” (FSO) com *Turret*.
- 2^a) Uma plataforma SS, escoando a produção de óleo via oleoduto.
- 3^a) Um “*Floating, Production, Storage, and Offloading*” (FPSO) com *Turret*, escoando a produção de óleo via operações de “*Offloading*”.
- 4^a) Um FPSO com *Turret*, escoando a produção de óleo via oleoduto.
- 5^a) Uma “*Tension Leg Platform*” (TLP), escoando a produção de óleo via um navio FSO com *Turret*.
- 6^a) Uma TLP, escoando a produção de óleo via oleoduto.

Com o cenário traçado, temos três atributos no modelo que nos fornecerá o sistema de produção mais adequado entre as seis opções apresentadas. O método de análise de sensibilidade de dimensão elevada é baseado na simulação aleatória dos pesos e necessita de um software que tenha

a capacidade de cálculo matricial. Nesse estudo foi utilizado o software MATLAB 5.0 (1996) e adotou-se como referência, o nível de 10.000 interações para a construção do modelo de múltiplos atributos aditivo e multiplicativo (Furtado & Suslick, 1999).

Neste caso, as funções utilidade utilizadas para os atributos financeiro e tecnológico são as mesmas do estudo de caso 1, ou seja, para o atributo financeiro a função utilidade é exponencial (Eq. 3) e para o atributo tecnológico a função é logística (Eq. 4).

Primeiramente é montada uma planilha onde são calculados os fluxos de caixa de cada opção. Como pressupostos para todos os casos temos o preço do barril produzido a US\$15,00, uma taxa de atratividade de 8% ao ano, um imposto sobre o lucro líquido de 60% e a produção efetiva iniciando após o final do segundo ano do projeto. Na Tabela 7 é apresentado o resumo financeiro de cada uma das alternativas.

Tabela 7 – Resumo da avaliação econômica das alternativas para a produção de petróleo

Plataforma	VPL (MMUS\$)	
	FSO	Oleoduto
SS	461,32	374,50
FPSO	583,10	313,83
TLP	618,59	519,89

Conforme a Eq. 3, a função utilidade é do tipo exponencial com a seguinte característica:

$$u(x) = 1 - e^{-cx} \quad (7)$$

onde ,

$u(x)$ = utilidade do atributo no ponto x ,

x = valor da variável considerada (VPL),

c = índice de aversão ao risco.

Para calcular a utilidade do atributo financeiro basta substituir x pelo valor do VPL da alternativa desejada. O valor c é o índice de aversão ao risco, sendo inversamente proporcional à tolerância ao risco. Na Figura 6 temos a curva das utilidades com duas tolerâncias ao risco (200MMUS\$ e 500MMUS\$).

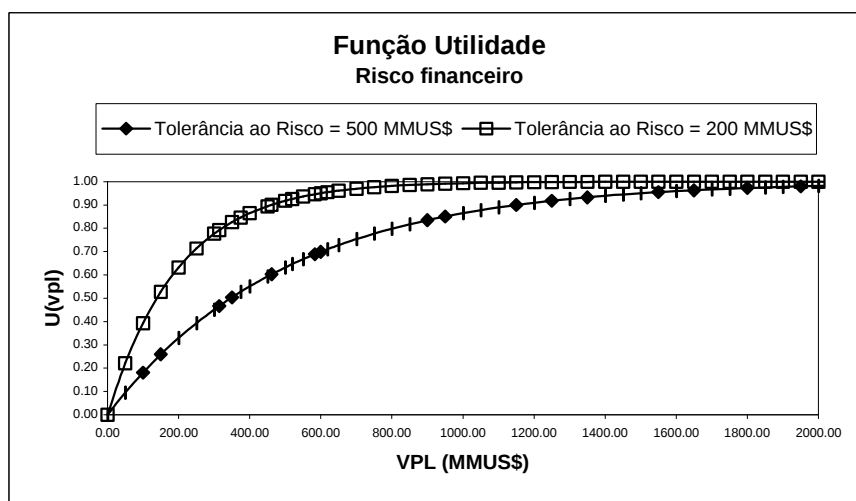


Figura 6 – Curva de utilidade para o atributo financeiro (produção)

A componente tecnológica foi medida através do número de plataformas que estão produzindo, obtido através de um levantamento da evolução de plataformas que entraram em operação ano a ano. Estes dados foram baseados nos estudos de Beherenbruch (1995), Lovie (1997) e Lovie (1998) e estão dispostos na Figura 7.

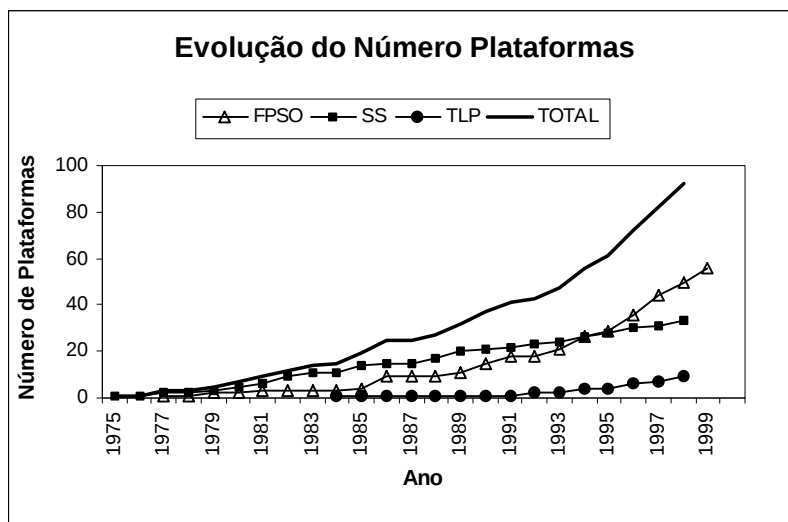


Figura 7 – Evolução do número acumulado de plataformas ano a ano

Conforme apresentado no caso da exploração, a componente tecnológica tem um comportamento logístico, ou seja, tem como função a Eq. 4. O ajuste da quantidade total acumulada de plataformas através da equação logística é dada por:

$$u(x) = \frac{1}{0.75 + 70e^{-0.06x}} \quad (8)$$

onde a aversão ao risco ($c=0,06$) é obtida empiricamente.

Para soma total de plataformas operando foi atribuído utilidade 1 e para a nulidade de plataformas a utilidade 0. As utilidades de cada uma das alternativas foi calculada pela Eq. 8, onde x é a quantidade de plataformas (Tabela 8) que estão produzindo óleo em 1999 (Figura 8).

Tabela 8 – Quantidade de plataformas instaladas e produzindo

Plataformas	Quantidade
SS	33
FPSO	50
TLP	9
<i>Total</i>	<i>92</i>

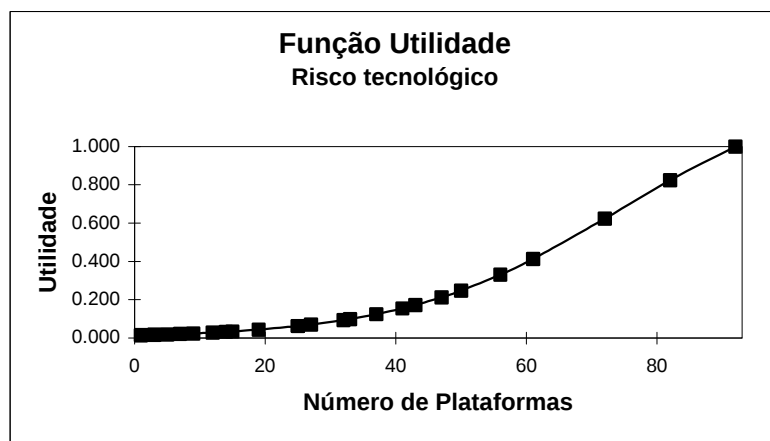


Figura 8 – Curva de utilidade do atributo risco tecnológico

A modelagem do risco ambiental na área de petróleo é mais complexa, pois a disponibilidade de informações para unidades de produção de petróleo flutuantes é bastante limitada. Após o levantamento das informações, somente foi possível identificar os sistemas de produção SS que apresentam um índice de vazamentos de 0,0005% vazamentos / unidade por ano (Statistical Report, 1992).

Tendo em vista que as informações não incluem dados recentes, não foi possível diferenciar, através de dados de campo, o risco ambiental entre as seis opções de desenvolvimento propostas. Foi feita então uma pesquisa com técnicos da área de análise de risco ambiental e gerentes tomadores de decisão, onde foram detectadas as seguintes preferências e justificativas:

- A TLP, por utilizar Árvores de Natal Secas e *Risers* rígidos, é o sistema que apresenta o menor risco ambiental, logo a sua utilidade é máxima neste aspecto, e considerada como 1.
- A SS apresenta dois pontos desfavoráveis com relação a TLP, o primeiro é a maior complexidade do sistema de lastro, e o segundo é que utiliza poços satélites com Árvore de Natal Molhada, *Risers* e linhas flexíveis. Como estes equipamentos ficam expostos no fundo do mar, estão sujeitos a acidentes com outros tipos de equipamentos, como âncoras de rebocadores, etc..., logo o seu potencial risco ambiental é maior e sua utilidade avaliada como 0,85.
- O FPSO é o sistema de maior risco ambiental, pois além de ter todas as desvantagens da SS, armazena petróleo nos seus tanques internos (na realidade é um navio petroleiro com uma planta de processo de petróleo), aumentando muito o seu potencial de risco, logo a sua utilidade foi avaliada em 0,6.
- Tanto a TLP quanto a SS, quando considera-se a opção de projeto escoando óleo por um FSO, incluem na sua concepção uma monoboia e a utilização de petroleiros para transporte do petróleo, isto significa a inclusão de dois pontos de risco ambiental, logo as suas utilidades devem ser multiplicadas por 0,6.
- No caso do FPSO sem oleoduto não é necessário a instalação de monoboia, logo a sua utilidade original deve ser multiplicada apenas por 0,8.

Uma vez definidas as utilidades dos atributos, o próximo passo é definir a importância relativa dos objetivos e aplicar estes pesos no modelo de decisão. A Tabela 9 apresenta os pesos dos atributos estipulados pelo decisor e na Tabela 10 temos estes pesos multiplicados pelas utilidades de cada atributo. A última coluna da Tabela 10 é a utilidade final de cada uma das alternativas.

Tabela 9 - Pesos dos atributos para a escolha do sistema de produção

Atributo	Importância Relativa
Financeiro	0,75
Tecnológico	0,05
Ambiental	0,20

Tabela 10 – Utilidade de cada opção de plataforma de petróleo

Sistema de Produção	Financeiro	Tecnológico	Ambiental	Utilidade Total
TLP + oleoduto	0,485	0,00227	0,194	0,68149
TLP + FSO	0,532	0,00227	0,123	0,65767
FPSO	0,516	0,01296	0,095	0,62445
SS + oleoduto	0,395	0,00576	0,168	0,56963
SS + FSO	0,452	0,00576	0,101	0,55841
FPSO + oleoduto	0,350	0,01296	0,123	0,48563

A plataforma TLP escoando a produção de óleo via oleoduto é a melhor opção para a decisão com utilidade igual a 0,68149, sendo a segunda opção o sistema TLP escoando óleo via navio com utilidade igual a 0,65767 (Tabela 10). Outra observação importante reside no fato que as três primeiras opções tem utilidades muito próximas, o que faz-se necessário uma análise mais detalhada.

A forma mais adequada de avaliar o modelo é através da análise de sensibilidade, sendo este o objetivo principal deste trabalho. Análise de sensibilidade unidimensional não capta a interação entre os atributos, então o processo de avaliação do modelo de decisão será através da análise de sensibilidade bidimensional.

O modelo de decisão aditivo foi aplicado para a escolha do sistema de produção mais eficiente para produzir uma bacia. Para avaliar o comportamento dos pesos dos atributos, foi aplicada a análise de sensibilidade bidimensional (Figura 9).

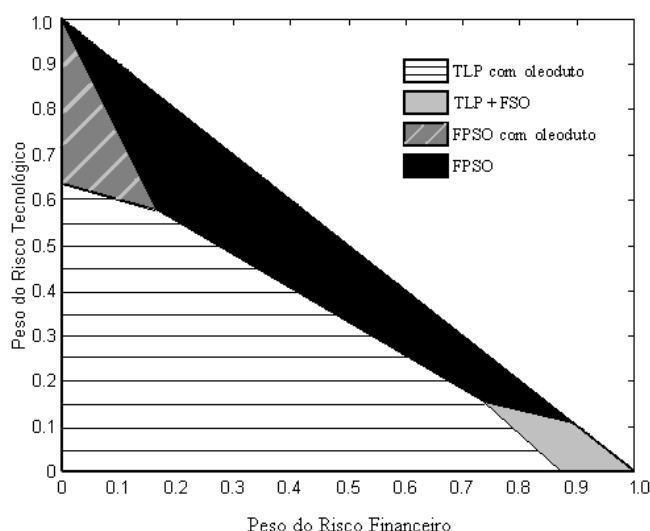


Figura 9 – Alternativas com maior preferência entre todas as combinações de pesos

O sistema TLP escoando óleo através de um oleoduto é a opção que ocupa a maior região do gráfico, mas algumas combinações de pesos podem fornecer ao decisor uma visão diferente do problema, ou seja, existem combinações de pesos que definem a FPSO como a melhor opção para produzir o campo. Por exemplo, suponha que o risco financeiro e tecnológico tenha um peso de 0,30 e 0,55 respectivamente. O peso do risco ambiental será 0,15, pois $k_a = 1 - k_f - k_t = 1 - 0,30 - 0,55 = 0,15$. Nestas circunstâncias, a melhor opção de plataforma para a produção da bacia é FPSO escoando óleo por um navio.

Como ressaltado no estudo de caso 1, a análise de sensibilidade bidimensional não leva em conta a ordenação dos atributos, ou seja, os pesos assumem valores de 0 a 1 não importando a ordem dos objetivos. Caso uma ordenação dos atributos seja feita, a nova figura será apenas uma parte da Figura 9. Esta análise de sensibilidade permite ao decisor uma visão geral do ambiente em que será tomada a decisão e por isso deve ser considerada.

Um inconveniente desta análise é o fato de aparecer alguns sistemas de produção onde nenhuma combinação de pesos satisfaça as preferências do analista. Por exemplo, no estudo a SS com e sem oleoduto. Este fato não significa que estas opções devam ser descartadas. É necessário fazer uma análise mais detalhada do sistema de produção, pois ele pode aparecer como uma segunda opção e ser mais viável para a empresa.

Para avaliar as interações entre os pesos, aplicamos a análise de sensibilidade de dimensão elevada. O método utilizado foi o dos pesos ordenados, pois conforme visto em Castro & Furtado(1998), Castro *et al.* (2000) e em Furtado & Suslick(1999), o decisor tem preferência em relação aos atributos.

A primeira etapa é a simulação e aplicação dos pesos nos modelos de decisão, obtendo 10.000 valores de utilidade para cada alternativa. O primeiro resultado é a frequência relativa da classificação de cada opção em relação a utilidade calculada (Tabela 11 e Tabela 12).

Tabela 11 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo aditivo (Produção)

Classificação	Frequência Relativa (Modelo Aditivo)					
	Total					
	SS + FSO	SS + oleoduto	FPSO	FPSO + oleoduto	TLP + FSO	TLP + oleoduto
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	12,10%	87,90%
2	0,00%	25,60%	9,40%	0,00%	57,90%	7,10%
3	0,00%	21,40%	48,60%	0,00%	25,00%	5,00%
4	15,90%	37,10%	42,00%	0,00%	5,00%	0,00%
5	65,90%	15,90%	0,00%	18,20%	0,00%	0,00%
6	18,20%	0,00%	0,00%	81,80%	0,00%	0,00%

O sistema de produção TLP escoando por oleoduto classificou-se como melhor opção 87,90% das simulações, mas também foi classificado como segunda e terceira opção. A TLP escoando óleo através de um petroleiro também foi classificada como a melhor opção em 12,10% das simulações, mas foi classificada como segunda opção em cerca de 58% das configurações aleatórias dos pesos. O sistema FPSO escoando óleo por oleoduto foi classificado na maior parte das simulações (81,80%) como a pior alternativa para a produção do campo em questão (Tabela 11). As demais alternativas se posicionam em uma classificação intermediária.

Através da Tabela 11 torna-se bastante ardua a avaliação da dominância estocástica de uma alternativa sobre a outra. Na Figura 10 é traçado o perfil hierárquico de cada opção, ou seja, a frequência da classificação de cada opção é acumulada e postada em um gráfico.

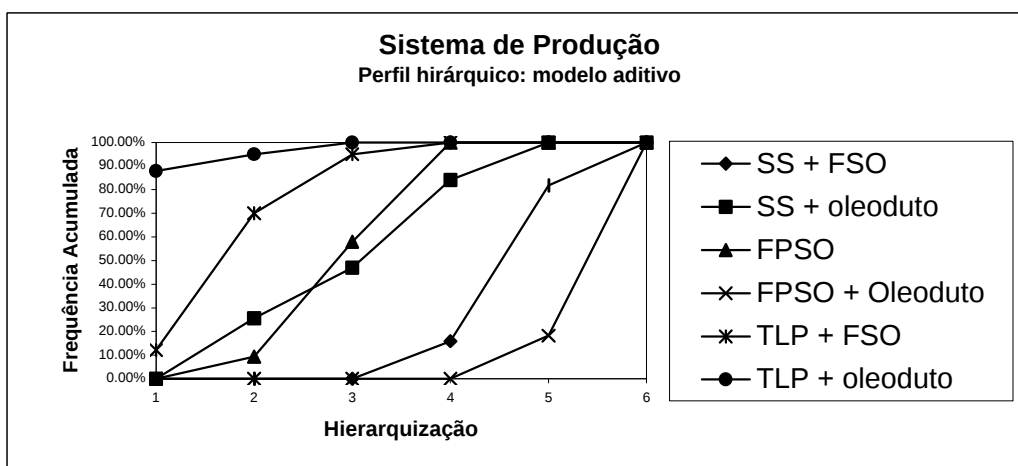


Figura 10 - Perfil Hierárquico: forma aditiva (produção)

A TLP escoando óleo através de oleoduto domina estocasticamente as demais opções (Figura 10), apesar de ser classificada algumas vezes como a segunda melhor opção (Tabela 11). A segunda melhor opção neste estudo é a TLP escoando óleo por um navio petroleiro, que também domina estocasticamente as demais alternativas. Conforme verificado na Tabela 11, a plataforma FPSO escoando por oleoduto é dominada pelas demais opções, ou seja, é a alternativa que menos interage com os principais objetivos da empresa.

As duas análises de sensibilidade (Figura 9, Tabela 11 e Figura 10) aplicadas no modelo de decisão não levaram em conta a interação entre os atributos, assumindo-os mutuamente independentes, o que nem sempre é verdade. Para avaliar esta interação, os pesos simulados são aplicados no modelo multiplicativo (Eq. 2) e para então ser quantificada a frequência de cada opção em relação a classificação (Tabela 12).

Tabela 12 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo multiplicativo (Produção)

Classificação	Frequência Relativa (Modelo Multiplicativo)					
	Total					
	SS + FSO	SS + oleoduto	FPSO	FPSO + oleoduto	TLP + FSO	TLP + oleoduto
1	0,00%	0,00%	1,80%	0,00%	1,10%	97,10%
2	0,00%	76,80%	4,70%	1,20%	15,90%	1,40%
3	0,00%	9,80%	22,40%	0,00%	67,10%	0,70%
4	1,20%	12,20%	71,10%	4,80%	9,90%	0,80%
5	28,00%	1,20%	0,00%	65,50%	5,30%	0,00%
6	70,80%	0,00%	0,00%	28,50%	0,70%	0,00%

A dominância da plataforma TLP com oleoduto aumentou (em 97,10% das simulações foi classificado como o sistema que mais interage com os objetivos da empresa), mas neste caso a FPSO e a TLP escoando óleo por oleoduto também se apresentam como melhores opções em 1,80% e 1,10% das simulações. Dois fatos importantes devem ser ressaltados. Primeiro, a SS escoando óleo por navio domina as outras opções como a pior alternativa (no modelo aditivo esta dominância era feita FPSO com oleoduto) e segundo, a SS com oleoduto domina as demais como uma segunda melhor opção, ou seja, quando os atributos não são considerados mutuamente independentes ocorre uma mudança no cenário da decisão.

Uma forma de visualizar o cenário obtido com o modelo multiplicativo é através do gráfico de hierarquização das opções (Figura 11). Como na Figura 9, a TLP com oleoduto domina estocasticamente as demais alternativas. As principais mudanças decorrem de que a pior opção passa a ser a SS escoando óleo por navio e de que a SS escoando óleo por oleoduto se apresente como a segunda melhor opção. Esta variação de cenário provém da consideração da mútua independência entre os atributos (pressuposição do modelo aditivo) e é de fundamental importância, pois em casos onde as utilidades das alternativas tem valores com pequenas variações, o decisor tem condições de avaliar de forma mais clara o modelo, e até se necessário, alterá-lo.

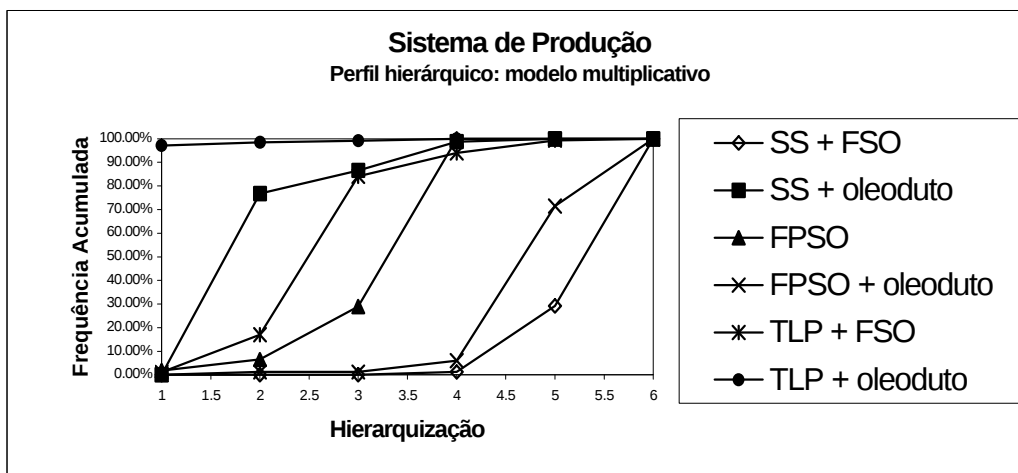


Figura 11- Perfil Hierárquico: forma multiplicativa (produção)

Resumidamente, conforme visto anteriormente na Figura 9, observa-se uma predominância do sistema TLP com oleoduto. Por sua vez, o modelo aditivo da Figura 10 reproduz com maior intensidade as preferências pelo TLP com oleoduto, onde em 88% das simulações este sistema de produção foi classificado como o mais eficiente. No modelo multiplicativo (Figura 11), a preponderância do TLP com oleoduto é ainda maior, atingindo 98% das preferências como primeira opção.

No modelo multiplicativo, quando existe a interação dos atributos financeiro, tecnológico e ambiental, o sistema de produção SS com oleoduto ocupa a segunda opção. Já no modelo aditivo, sem interação entre os atributos, o sistema SS com oleoduto situa-se abaixo das preferências dos sistemas de produção TLP com oleoduto, TLP + FSO e FPSO.

Quando o analista define a ordem de prioridade de seus atributos, por exemplo, prioridade para o atributo financeiro, seguido do ambiental e tecnológico, os sistemas FPSO com e sem oleoduto, situam-se em uma escala inferior de preferência entre as opções. Por outro lado, quando os atributos não são hierarquizados, estes dois sistemas são classificados na primeira ordem das preferências, conforme a combinação dos pesos, principalmente quando o atributo tecnologia possui uma maior magnitude. Deste modo, fica patente o grau de importância da componente ambiental nesses sistemas de produção.

4 – Considerações Finais

No atual cenário econômico, as empresas de petróleo buscam a máxima formalização das etapas do processo decisório em decorrência dos elevados riscos e do montante de capital envolvido. Deste modo, torna-se importante a criação de ferramentas para auxiliar os analistas em ambientes onde predominam múltiplos atributos que afetam a decisão e a escolha das alternativas que mais interagem com os objetivos da empresa.

A proposta deste trabalho foi interpretar e aplicar a análise de sensibilidade de dimensão elevada na estimação dos pesos do modelo de decisão com múltiplos atributos em projetos de exploração e produção de petróleo. O objetivo principal foi fornecer uma ferramenta sistemática que avalie os pesos, bem como teste a consistência do modelo de decisão.

Dentre as três possibilidades de análise de sensibilidade de dimensão elevada, optamos pela técnica que ordena os pesos conforme a importância para o decisor de cada atributo. A razão por usar esta técnica foi devido a facilidade de classificar os objetivos por ordem de importância, pois enquanto a atribuição de um valor exato para os pesos pode ser questionada, uma ordem de importância relativa dos atributos pode ser bem menos controversa. Uma outra razão decorre do fato que é uma técnica simples de ser aplicada, pois basta gerar aleatoriamente os pesos e classificá-

los de acordo com as preferências do decisor. Não podemos deixar de mencionar que nos dois estudos apresentados, o decisor estava apto a classificar com exatidão a ordem de importância de cada objetivo.

Os resultados obtidos com a análise de sensibilidade de dimensão elevada foram bastante auspiciosos, superando as restrições naturais da análise bidimensional que não incorpora a dinâmica da interação dos atributos no processo decisório. No primeiro estudo de caso, o decisor teve a exata visão que o prospecto B de exploração de petróleo é o mais eficiente, pois esta opção domina estocasticamente as demais alternativas tanto no caso aditivo (onde os atributos são mutuamente independentes), quanto no caso multiplicativo. A simulação do modelo de dimensão elevada para o segundo estudo de caso mostra claramente a vantagem do sistema de produção TLP com oleoduto (forma aditiva e multiplicativa), pois este sistema situa-se como primeira opção na ordem das preferências do analista e manteve uma certa consistência nas simulações.

A técnica de análise de sensibilidade proposta não procura somente sugerir uma opção que melhor se ajuste às preferências da empresa, e sim traçar um cenário onde o decisor possa analisar o comportamento de todas as alternativas simultaneamente. Esta é uma técnica que visa reduzir o risco da decisão, mas não eliminá-lo totalmente, fornecendo um meio de avaliar o modelo proposto, onde é possível optar pela tomada da decisão ou então por um refinamento do modelo. Resumidamente, a análise de sensibilidade de dimensão elevada é uma ferramenta que deve ser incorporada ao processo decisório como um meio de avaliar e analisar o modelo e não como uma técnica que vai fornecer ao tomador de decisão uma alternativa definitiva.

A análise de sensibilidade de dimensão elevada também permite um tratamento estatístico mais detalhado, gerando os perfis hierárquicos que se ajustam de maneira mais adequada às preferências das empresas, além de proporcionar condições mais favoráveis e reais na tomada de decisão.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e ao PADCT/CNPq pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Behrenbruch, P. Floating production facilities key to lower deepwater development. **Offshore**, Oct. 1995, p.41-45.
- Butler, J., Jia, J., Dyer, J. Simulation techniques for sensitive analysis of multi-criteria decision models. **European Journal of Operational Research**, vol. 103, nº 3, Dec. 1997, p.531-545.
- Castro, G.T., Furtado, R. **Um processo de decisão que leva em conta os riscos tecnológicos, ambientais e financeiros**. Campinas: UNICAMP/IG/DARM, 1998. 30p. (Trabalho apresentado no curso de Avaliação Econômica de Projetos de Mineração e de Petróleo, Departamento de Recursos Minerais).
- Castro, G.T., Morooka, C.K., Suslick, S.B., Furtado, R. Um processo decisório que leva em conta os riscos tecnológicos, ambientais e financeiros. **Congreso Produccion 2000**. Argentina, Maio, 2000. (no prelo).
- Furtado, R. **Uso da análise de sensibilidade em modelos de decisão multiatributos para sistemas de exploração e produção de petróleo**. Dissertação de Mestrado. Campinas, 2000. 89p. (Dissertação de Mestrado em Administração e Política de Recursos Minerais (Instituto de Geociências, Departamento de Administração e Política de Recursos Minerais), Universidade Estadual de Campinas).
- Furtado, R., Suslick, S.B. Análise de sensibilidade em modelos de decisão multiatributos em sistemas de produção de petróleo. **XV Congresso de Engenharia Mecânica (COBEM)**. Águas de Lindóia, SP. Nov. 1999. 10p.

- Howard, R. Decision analysis: practice and promise. **Management Science**, v. 34, nº 6, 1988, p. 679-695.
- Keeney, R.L. Decision analysis: an overview. **Operations Research**. nº 30; 1982, p.803-808.
- Keeney, R. L., Raiffa, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 569p.
- Lanford, H.W. Technological forecasting methodologies. **Analytical Techniques: Advanced trend Analysis**. American Management Association, 1972, p.59-91.
- Lovie, P.M. Today's world of FPSOs changes quickly. **Word Oil**. Apr. 1997, p.79-84 and 91.
- _____. Developing smaller offshore fields with FPSOs. **Word Oil**, Jul. 1998, p. 61-68.
- Nepomuceno, F. **Tomada de decisão em projetos de riscos na exploração de petróleo**. Tese de Doutorado. Campinas, 1997. 243p. (Tese de Doutorado em Administração e Política de Recursos Minerais (Instituto de Geociências, Departamento de Administração e Política de Recursos Minerais), Universidade Estadual de Campinas).
- Nepomuceno, F., Suslick, S.B. Uso da teoria da preferência em projetos de exploração de petróleo. **XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia**, vol 7, Salvador, set/1996, p.136-140.
- _____. Alocação de recursos financeiros em projetos de risco na exploração de petróleo, **Revista de Administração de Empresas**. Fundação Getúlio Vargas (FGV), São Paulo, SP, v. 40, n. 1, 2000, p. 63-75.
- Nepomuceno, F., Suslick, S.B., Walls, M.R, Investment and technology decision model in offshore oil exploration in Brazil: a decision analysis using multi-attribute utility theory. **Natural Resources Research**, vol. 8, nº 3, 1999, p. 193-203.
- Oligney, R.E., Economides, M.J. Technology as an asset. **Hart's Petroleum Engineer International**. Sep. 1998, p. 27-38.
- Olson, D.L. Use of centroid approach for selection sensitivity analysis. **Working paper, Texas A&M University, College Station Texas**. 1996.
- Pratt, J.W. Risk aversion in the small and large. **Econometrica**, vol. 32, 1964, p.22-136.
- Von Neumann, J., Morgenstern, O. **Theory of games and economic behavior**. 3^a ed. Princeton: Princeton University Press, 1953.
- Walls, M.R. Corporate risk tolerance and capital allocation: a practical approach to setting and implementing an exploration risk policy. In: **Managing Risk and Strategic Decisions in Petroleum Exploration Seminar**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS. 1994. 17p.
- _____. Integrating business strategy and capital allocation: an application of multi-objective decision making. **The Engineering Economist**, vol. 40, nº 3, 1995, p.247-266.
- Walls, M.R., Dyer, J.S., Risk propensity and firm performance: a study of the petroleum exploration industry. **Management Science**, vol. 42, nº 7, Jul. 1996, p.1004-1021.
- World Offshore Accident Data bank (WOAD), **Statistical Report 1992**, Technica.