

MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM CADEIA DE MARKOV E MÉTODO
DE ARREPENDIMENTO APLICADO EM DESCOMISSIONAMENTO DE ÓLEO E
GÁS

Fernanda de Freitas Moraes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro

Janeiro de 2021

MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM CADEIA DE MARKOV E MÉTODO
DE ARREPENDIMENTO APLICADO EM DESCOMISSIONAMENTO DE ÓLEO E
GÁS

Fernanda de Freitas Moraes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Aprovada por: Prof. Edilson Fernandes de Arruda

Prof. Carlos Eduardo Durange de Carvalho Infante

Prof. Luiz Flavio Autran Monteiro Gomes

Prof. Helder Gomes Costa

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2021

Moraes, Fernanda de Freitas

Modelo Multicritério baseado em cadeia de Markov e método de arrependimento aplicado em descomissionamento de óleo e gás/Fernanda de Freitas Moraes – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XI, 84. p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda
Virgílio José Martins Ferreira
Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/
Programa de Engenharia de Produção, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 60-69.

1. Cadeia de Markov. 2. Análise de decisão 3. Descomissionamento. I. Arruda, Edilson Fernandes de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelas oportunidades e bênçãos recebidas.

A minha família, em especial aos meus pais, minha irmã e meu marido por todo incentivo, amor e apoio incondicional.

Aos amigos, que fazem a caminhada ser mais leve.

Aos meus orientadores Edilson e Virgílio pelas oportunidades, dedicação, paciência e ensinamentos nesses anos.

Ao Eduardo Infante por toda ajuda e apoio neste período da dissertação e no projeto.

Aos professores Autran e Helder pela atenção e disponibilidade.

Aos professores do Programa de Engenharia de Produção – PEP/COPPE pelo conhecimento proporcionado.

A todos do SAGE pelo acolhimento e incentivo.

A todos do projeto de Descomissionamento pela oportunidade e por me agregar tanto conhecimento.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM CADEIA DE MARKOV E MÉTODO DE ARREPENDIMENTO APLICADO EM DESCOMISSIONAMENTO DE ÓLEO E GÁS

Fernanda de Freitas Moraes

Janeiro/2021

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Quando os campos de petróleo e gás tornam-se maduros e finalizam as atividades, suas instalações precisam ser desmontadas e desativadas de maneira responsável, a fim de regenerar as condições naturais do local com o menor impacto possível. O descomissionamento de sistemas submarinos de petróleo e gás ainda é uma atividade relativamente nova. A escolha da melhor opção para o descomissionamento de uma determinada instalação não é simples, pois para cada caso aspectos de ordem social, ambiental, técnicos, de segurança e econômicos devem ser levados em consideração e muitas vezes são conflitantes. Portanto, a análise multicritério tem sido utilizada para auxiliar na seleção dessa alternativa. Neste trabalho, cadeias de Markov são utilizadas como ferramenta para ajudar na escolha de uma alternativa de descomissionamento, em conjunto com um método de arrependimento. A metodologia foi validada por meio da aplicação em três experimentos numéricos nos campos de Brent no Mar do Norte e de Caçoeira no Brasil.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MULTICRITERIA MODEL BASED ON MARKOV CHAIN AND REGRET
METHOD APPLIED IN OIL AND GAS DECOMMISSIONING

Fernanda de Freitas Moraes

January/2021

Advisors: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Industrial Engineering

When oil and gas fields mature and cease their, the installed facilities need to be dismantled and deactivated in a responsible manner, with a view to recuperate the original natural conditions of local with minimum impact. The decommissioning of the subsea oil and gas system is still a relatively new field and the choice of an adequate option for the decommissioning of a given installation is not simple. It must consider social, environmental, technical, safety and economic aspects, which are often conflicting. Therefore, multicriteria analysis has been used to support the selection of a decommissioning alternative. In this paper, Markov chains are used as a tool to help select an adequate decommissioning alternative in conjunction with a regret function. The methodology was applied in three numerical experiments in the Brent fields in the North Sea and Cação fields in Brazil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do Trabalho	4
2. MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO.....	6
2.1 Análise de incertezas	7
2.2 Abordagens probabilísticas do MCDA	9
3. DESCOMISSIONAMENTO	13
3.1 Processo de Descomissionamento na área de óleo e gás	13
3.2 Aplicações de MCDA em descomissionamento de óleo e gás	17
4. CADEIA DE MARKOV E MÉTODO DE ARREPENDIMENTO (CM&R)	21
4.1 Procedimento metodológico.....	21
4.2 Formulação Matemática	22
5. APLICAÇÃO DE MÉTODOS MCDA AO PROBLEMA DE DESCOMISSIONAMENTO	26
5.1 Aplicação do Método MC&R.....	26
5.1.1 Experimento Campo de Brent.....	26
5.1.1.1 PL 002/N0201	28
5.1.1.2 PL 047/N0404.....	33
5.1.2 Experimento Campo de Cação.....	38
5.2 Análise de Sensibilidade	44
5.2.1 Campo de Brent - PL 002/N0201	44
5.2.2 Campo de Brent -PL 047/N0404	48
5.2.3 Campo de Cação	49
5.3. Outros métodos MCDA aplicados ao Campo de Brent.....	51
5.3.1 AHP.....	52
5.3.2 PROMETHEE.....	54
6. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE I– MATRIZES DE TRANSIÇÃO – CAMPO DE BRENT PL002/N0201.....	70
APÊNDICE II – MATRIZES DE TRANSIÇÃO – CAMPO DE BRENT PL047/N0404....	75
APÊNDICE III – MATRIZES DE TRANSIÇÃO – CAMPO DE CAÇÃO	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais etapas da indústria de óleo e gás de acordo com o custo.	14
Figura 2: Etapas da metodologia aplicada.	22
Figura 3: Arranjo Geral do Campo de Brent.	26
Figura 4: Plataforma de Cação.	39
Figura 5: Análise dos pesos de acordo com a alternativa.	45
Figura 6: Comparação dos pesos nos cenários 7 e 8.	46
Figura 7: Cenários com a escolha de alternativa a_3	46
Figura 8: Cenários com a escolha da alternativa a_5	47
Figura 9: Cenários com a escolha da alternativa a_6	47
Figura 10: Análise dos pesos de acordo com a alternativa.	48
Figura 11: Cenários com a escolha da alternativa a_6	49
Figura 12: Análise dos pesos comparando os cenários.	50
Figura 13: Software VISUAL PROMETHEE com dados do campo de Brent.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Síntese dos artigos.	12
Tabela 2: Síntese dos artigos e relatórios.	20
Tabela 3: Critérios e subcritérios utilizados no experimento de Brent.....	27
Tabela 4: Alternativas de descomissionamento.....	28
Tabela 5: Alternativas de descomissionamento do duto escolhido.	28
Tabela 6: Dados brutos para cada subcritério.....	29
Tabela 7: Desempenho das alternativas após maximização.....	29
Tabela 8: Matriz de taxas de transição do subcritério 1.	30
Tabela 9: Distribuição de probabilidade.....	31
Tabela 10: Matriz de Arrependimentos.	31
Tabela 11: Alternativas de descomissionamento do duto escolhido.	33
Tabela 12: Dados brutos para cada subcritério.....	33
Tabela 13: Desempenho das alternativas após maximização.....	34
Tabela 14: Matriz de taxas de transição do subcritério 1.	34
Tabela 15: Distribuição de probabilidade.....	35
Tabela 16: Matriz de Arrependimentos.	35
Tabela 17: Critérios e subcritérios utilizados para a escolha da alternativa.....	39
Tabela 18: Alternativas de descomissionamento de dutos.	40
Tabela 19: Dados brutos para cada subcritério.....	41
Tabela 20: Desempenho das alternativas para cada subcritério	41
Tabela 21: Distribuição de probabilidade.....	42
Tabela 22: Matriz de arrependimentos.	43
Tabela 23: Resultados referentes aos pesos dos critérios.	44
Tabela 24: Resultados referentes aos pesos dos critérios.	48
Tabela 25: Resultados referentes aos pesos dos critérios.	50
Tabela 26: Resultado parcial do AHP.	52
Tabela 27: Resultado do método AHP com mesmo peso entre os critérios.....	53
Tabela 28: Resultado do AHP e método de arrependimento.	53
Tabela 29: Resultado do PROMETHEE para pesos iguais entre os critérios.	55
Tabela 30: Resultado do PROMETHEE para pesos iguais entre os subcritérios.....	55
Tabela 31: Resumo dos métodos comparativos.	56
Tabela 32: Matriz de taxas de transição para o subcritério 1.	70

Tabela 33: Matriz de taxas de transição para o subcritério 2.	70
Tabela 34: Matriz de taxas de transição para o subcritério 3.	71
Tabela 35: Matriz de taxas de transição para o subcritério 4.	71
Tabela 36: Matriz de taxas de transição para o subcritério 5.	71
Tabela 37: Matriz de taxas de transição para o subcritério 6.	72
Tabela 38: Matriz de taxas de transição para o subcritério 7.	72
Tabela 39: Matriz de taxas de transição para o subcritério 8.	72
Tabela 40: Matriz de taxas de transição para o subcritério 9.	73
Tabela 41: Matriz de taxas de transição para o subcritério 10.	73
Tabela 42: Matriz de taxas de transição para o subcritério 11.	73
Tabela 43: Matriz de taxas de transição para o subcritério 12.	74
Tabela 44: Matriz de taxas de transição para o subcritério 1.	75
Tabela 45: Matriz de taxas de transição para o subcritério 2.	75
Tabela 46: Matriz de taxas de transição para o subcritério 3.	75
Tabela 47: Matriz de taxas de transição para o subcritério 4.	76
Tabela 48: Matriz de taxas de transição para o subcritério 5.	76
Tabela 49: Matriz de taxas de transição para o subcritério 6.	76
Tabela 50: Matriz de taxas de transição para o subcritério 7.	77
Tabela 51: Matriz de taxas de transição para o subcritério 8.	77
Tabela 52: Matriz de taxas de transição para o subcritério 9.	77
Tabela 53: Matriz de taxas de transição para o subcritério 10.	78
Tabela 54: Matriz de taxas de transição para o subcritério 11.	78
Tabela 55: Matriz de taxas de transição para o subcritério 12.	78
Tabela 56: Matriz de taxas de transição para o subcritério 1.	80
Tabela 57: Matriz de taxas de transição para o subcritério 2.	80
Tabela 58: Matriz de taxas de transição para o subcritério 3.	80
Tabela 59: Matriz de taxas de transição para o subcritério 4.	81
Tabela 60: Matriz de taxas de transição para o subcritério 5.	81
Tabela 61: Matriz de taxas de transição para o subcritério 6.	81
Tabela 62: Matriz de taxas de transição para o subcritério 7.	82
Tabela 63: Matriz de taxas de transição para o subcritério 8.	82
Tabela 64: Matriz de taxas de transição para o subcritério 9.	82
Tabela 65: Matriz de taxas de transição para o subcritério 10.	82
Tabela 66: Matriz de taxas de transição para o subcritério 11.	83

Tabela 67: Matriz de taxas de transição para o subcritério 12.	83
Tabela 68: Matriz de taxas de transição para o subcritério 13.	83
Tabela 69: Matriz de taxas de transição para o subcritério 14.	84
Tabela 70: Matriz de taxas de transição para o subcritério 15.	84
Tabela 71: Matriz de taxas de transição para o subcritério 16.	84

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

As atividades de petróleo e gás chegam à fase de abandono devido às condições técnicas, ao esgotamento do recurso ou pela inviabilidade econômica. O abandono refere-se à etapa final da vida útil das instalações de produção de petróleo e gás em que ocorre a desativação das instalações, tamponamento dos poços produtores, desmantelamento e a remoção dos equipamentos; essa etapa também é denominada descomissionamento.

No Brasil, a maior parte da produção de petróleo e de gás natural ocorre em campos marítimos (*offshore*). As estruturas *offshore* têm um tempo de vida útil de aproximadamente 20 a 30 anos e de acordo com a ANP (2020a), 41% das instalações marítimas no país tem mais de 25 anos de produção. Este é um cenário expressivo para o descomissionamento a curto prazo.

As operações de descomissionamento de sistemas submarinos na indústria de óleo e gás são de natureza relativamente inovadora, principalmente no Brasil, pois só agora a indústria nacional está começando a lidar com o final da vida produtiva de alguns campos. Com isso, há maior necessidade de estudar o descomissionamento e a melhor maneira de se fazê-lo, analisando as dificuldades referentes ao país pelo cenário diferenciado, sobretudo para os sistemas submarinos.

Apesar do maior custo do descomissionamento não ser dos sistemas submarinos, estes se apresentam em configurações únicas no Brasil, daí a necessidade de estudo aprofundado. Diferentemente do que ocorre em outros locais, no Brasil a maior parte dos dutos utilizados são flexíveis e os dutos geralmente não são enterrados. A atividade pesqueira tem um menor impacto se comparada por exemplo ao cenário do Mar do Norte. As lâminas d'água são mais profundas. Os cenários ambientais são variados dentro do país e há baixa disponibilidade de embarcações especializadas na operação de descomissionamento. Por esses motivos, a expertise de outros países não é suficiente para embasar o processo de desativação das estruturas submarinas no país.

A escolha da melhor opção para o descomissionamento de uma dada instalação não é simples, pois para cada caso considerações sociais, ambientais, fatores técnicos, de segurança e aspectos econômicos devem ser levados em consideração. Isso torna-se ainda mais complicado dada a diferença de interesses entre os grupos envolvidos no descomissionamento. Ressalta-se ainda que o processo normalmente envolve muitas

decisões tomadas separadamente e um grande número de critérios e sub-critérios (MARTINS *et al.*, 2020b), além de considerável incerteza com relação aos dados. Assim, robustez não é necessariamente um atributo do processo.

Neste cenário, normalmente utiliza-se a análise de decisão por múltiplos critérios (MCDA- do inglês *multi criteria decision analysis*) para apoiar a tomada de decisão na presença de vários critérios distintos (CHAKHAR E MOUSSEAU, 2008).

Ao considerar medidas de desempenho para vários critérios, os métodos MCDA geralmente indicam o uso de pesos para agregar essas medidas e, assim, produzir uma ordenação das alternativas disponíveis (COSTA, 1986). A atribuição de pesos, no entanto, não é uma tarefa fácil. Embora carregue uma noção intuitiva da importância relativa de cada critério, essa importância pode ser muito difícil de quantificar e altamente subjetiva. De fato, muitas vezes as opiniões e preferências dos tomadores de decisão com relação aos critérios são bastante divergentes e a média delas pode produzir pesos que não capturam a variedade de opiniões (EUM *et al.*, 2001; CHOO *et al.*, 1999; MARESCHAL, 1988). Outra questão importante é o tempo necessário para formar um consenso entre as partes interessadas com relação aos pesos. Esse tempo pode ser excessivo, dependendo da duração do processo de tomada de decisão (MACHARIS E BERNARDINI, 2015) e do número de opções a serem consideradas. Além disso, diferentes conjuntos de pesos podem gerar resultados bastante distintos. Portanto, o processo pode ser bastante sensível a parâmetros amplamente arbitrários, cuja avaliação pode mudar ao longo do tempo ou dependendo das partes interessadas selecionadas para executá-lo.

A reprodutibilidade e a confiabilidade da análise de múltiplos critérios também podem ser comprometidas pelo excesso de parâmetros específicos do método. Por um lado, esses parâmetros são geralmente introduzidos para modelar as preferências pessoais do tomador de decisão, no que diz respeito à comparação de desempenhos semelhantes em relação a um determinado objetivo; um exemplo é a escolha de uma função de preferência no PROMETHEE. Por outro lado, comprometem a reprodutibilidade e introduzem ruído no processo, prejudicando a análise e a interpretabilidade dos resultados (JAVID *et al.*, 2020; MARTINS *et al.*, 2020a).

Além disso, a necessidade de ajustar muitos parâmetros caso a caso se torna complicada quando o processo envolve um conjunto possivelmente grande de decisões a serem tomadas em uma janela de tempo reduzida. A literatura reconhece a necessidade de ferramentas para ajudar a avaliar o efeito estocástico das preferências dos tomadores

de decisão e melhorar a transparência (MOSADEGHI *et al.*, 2013). No entanto, até agora, essas ferramentas são geralmente limitadas a auxílios à visualização e rotinas de análise de sensibilidade em relação à variação de peso (CHEN *et al.*, 2009; MADANI E LUND, 2011; LYU *et al.*, 2020). Por exemplo, TERVONEN E LAHDELMA (2007) e TÁVORA (2019) realizaram análise de sensibilidade por meio de simulação Monte Carlo. Porém, o método MCDA aplicado foi desenvolvido para analisar problemas determinísticos, mostrando então não ser o melhor curso de ação, já que sua utilidade é limitada e não proporciona um tratamento eficaz das incertezas.

Para tanto, esta dissertação modela o processo de tomada de decisão por meio de uma cadeia de Markov em tempo contínuo. Em contraste com os métodos MCDA determinísticos, que fazem uso de parâmetros definidos pelo usuário para simular algum nível de variação, o estudo proposto modela uma dinâmica estocástica. Assim, as incertezas são naturalmente consideradas sem a necessidade de parâmetros ou de calibração adicional, trazendo robustez ao resultado.

Na ausência de uma única solução que otimize todos os critérios, o tomador de decisões certamente experimentará algum nível de arrependimento, independentemente de sua escolha final. Portanto, uma análise antecipada dos arrependimentos relativos a cada alternativa possível pode ajudar na busca por uma solução mais equilibrada em relação a todos os critérios.

O presente trabalho propõe uma abordagem mini-max que seleciona a alternativa que minimiza o arrependimento máximo dentro do conjunto de critérios. Essa abordagem tem a vantagem de não exigir pesos para conciliar diferentes critérios e, por conseguinte, evita as deficiências e vieses discutidos anteriormente. Além disso, vale ressaltar que o método proposto é estocástico e, portanto, fornece uma ferramenta robusta para lidar com a incerteza dos dados, além de ser aplicável a configurações determinísticas.

Três experimentos numéricos são fornecidos para demonstrar a aplicabilidade da estrutura a problemas do mundo real. Os estudos têm foco em estruturas de sistema submarino de escoamento de óleo e gás natural. Os dois primeiros utilizam como exemplo dutos específicos do relatório de Brent (SHELL, 2017). E o terceiro utiliza dados do campo de Cação, localizado no Brasil (TÁVORA, 2019).

1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é propor um modelo estocástico de tomada de decisão multicritério baseado em cadeia de Markov e método de arrependimento. O intuito é escolher a alternativa que proporciona um menor arrependimento ao tomador de decisão. O estudo é direcionado ao apoio à tomada de decisões no processo de descomissionamento no setor de óleo e gás natural.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Validar o modelo utilizando uma base de dados real;
- Analisar os métodos de tomada de decisão já utilizados em descomissionamento na indústria de óleo e gás;
- Analisar a sensibilidade do uso de pesos;
- Comparar o resultado do modelo aplicado com outras ferramentas de tomada de decisão de múltiplos critérios.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O presente capítulo apresenta e contextualiza o tema a ser estudado, assim como os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os principais métodos multicritérios de tomada de decisão encontrados na literatura. Além disso, discorre sobre a classificação dos problemas de decisão e a aplicação da análise de incerteza e métodos probabilísticos em alguns estudos.

O capítulo 3 é dedicado à discussão sobre o processo de descomissionamento e suas características. Posteriormente se discorre sobre os métodos de análise multicritério mais utilizados para o descomissionamento na área de óleo e gás natural.

O capítulo 4 mostra o procedimento metodológico em quatro etapas e introduz uma formulação matemática para a escolha de uma alternativa em um problema com múltiplos critérios conflitantes. Propõe-se um modelo estocástico baseado em cadeia de Markov e método de arrependimento. O objetivo é minimizar o arrependimento máximo.

O capítulo 5 é composto por experimentos numéricos voltados a validar a abordagem proposta. São descritos três casos, dois no Mar do Norte, no campo de Brent, e o terceiro no Brasil, no campo de Cação. Além disso, o capítulo faz uma análise de sensibilidade em relação aos pesos dos critérios, discute e apresenta os resultados obtidos, assim como uma comparação com outros métodos multicritérios.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, assim como uma síntese de possíveis desdobramentos futuros.

2. MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO

Os métodos multicritérios motivaram uma vasta e diversificada literatura, que compreende muitos métodos e um conjunto de modelos distintos cujo intuito é guiar a tomada de decisão quando não existe uma solução superior em todos os critérios (veja por exemplo, MARDANI *et al.*, 2015; KUMAR *et al.*, 2017; VIEIRA *et al.*, 2019; GARG, 2018; ZHOU *et al.*, 2019).

Alguns dos modelos mais utilizados de MCDA são: Processos de Hierarquia Analítica (AHP) de SAATY (1990), Método de Organização de Classificação de Preferências para Avaliação de Enriquecimento (PROMETHEE) de BRANS E VINCKE (1985), Eliminação e Escolha Expressando a Realidade (ELECTRE) de ROY (1990), Teoria de Utilidade de Atributos Múltiplos (MAUT) de EDWARDS E NEWMAN (1986), Ponderação Aditiva Simples (SAW) de FISHBURN (1967), Agregação Aditiva com Parâmetros Variáveis Interdependentes (VIP analysis) de DIAS E CLÍMACO (2000) e Técnica para Ordem de Preferência por Semelhança com a Solução Ideal (TOPSIS) de HWANG E YOON (1981). Para uma visão abrangente desses métodos e suas características, consulte FIGUEIRA *et al.*, (2005).

Como mencionado anteriormente, o intuito da análise de decisão com múltiplos critérios (MCDA) é auxiliar a tomada de decisão em face de critérios diferentes, possivelmente contraditórios (VINCKE, 1992). A presença de múltiplos critérios gera uma ordenação parcial que em geral não permite que uma única ação seja declarada ideal (EMMERICH E DEUTZ, 2018). Para contornar esse problema, as técnicas de MCDA compreendem duas famílias de abordagens projetadas para modelar a preferência: os métodos aditivos e os métodos de superação (ROY, 1985; TIAN *et al.*, 2019).

Modelos baseados em métodos aditivos dependem da agregação de diferentes pontos de vista em uma única função a ser otimizada posteriormente (ROY, 1985). Normalmente, eles produzem uma pontuação única para cada alternativa, adicionando avaliações ponderadas de critério único. Como o desempenho é agregado, desempenhos ruins em um critério podem ser compensados por boas performances nos critérios restantes. AHP, MAUT, TOPSIS e SAW são exemplos de métodos aditivos.

Os métodos de superação são chamados não compensatórios. Introduzem relações de preferência e indiferença com base em parâmetros arbitrários e baseiam-se em comparações entre pares de alternativas com respeito a cada critério. Tais comparações podem reforçar ou contradizer a evidência de superioridade de uma alternativa em relação

a outra, e geralmente são ponderadas de acordo com o critério em consideração. ELECTRE e PROMETHEE são exemplos clássicos de métodos de superação.

De acordo com ROY E SKALKA (1985) e conforme descrito por GOMES E COSTA (2015), a estrutura de decisão dos métodos também pode ser associada a uma das quatro questões:

Problema P. α : o objetivo é demonstrar a decisão pela escolha de uma alternativa pertencente a um conjunto de alternativas. Portanto, o resultado é uma escolha;

Problema P. β : o objetivo é demonstrar a decisão por uma triagem resultante da alocação de cada alternativa a uma categoria ou classe. O resultado é um procedimento de classificação;

Problema P. γ : o objetivo é demonstrar a decisão por um arranjo obtido pelo reagrupamento de todas ou parte das ações em classes de equivalência. Essas classes são ordenadas de modo completo ou parcial, conforme as preferências dos tomadores de decisão. Portanto, o resultado é um procedimento de ordenação;

Problema P. δ : o objetivo é demonstrar a decisão por uma descrição, em linguagem apropriada, das ações e de suas consequências. O resultado é uma descrição ou um procedimento cognitivo.

De acordo com as descrições, por consequência, o problema abordado nesta dissertação é P. α , pois trata-se de um conjunto restrito de alternativas e somente uma escolha final.

2.1 Análise de incertezas

A análise de múltiplos critérios está sujeita a incertezas nos parâmetros, que tendem a ser subjetivos (HYDE *et al.*, 2005), e na avaliação de cada alternativa em relação a cada critério (BENÍTEZ *et al.*, 2019). Como o número de parâmetros varia de acordo com a abordagem selecionada, o mesmo ocorre com o número de fontes de incerteza (DURBACH E STEWART, 2012).

Em relação aos métodos de MCDA, a incerteza pode resultar de informações imprecisas ou de avaliação inconsistente por parte dos tomadores de decisão (BENÍTEZ *et al.*, 2019). Isso também pode ser causado por consequências não determinísticas e imprevisíveis de certas alternativas disponíveis, ou mesmo por vieses nos parâmetros do modelo (HYDE *et al.*, 2005). Observe que estes últimos se tornam mais significativos à medida que o número de parâmetros aumenta. Recomenda-se a leitura de DURBACH E

STEWART (2012) para uma descrição abrangente do tratamento das fontes de incerteza nos modelos de MCDA.

O método MAUT é baseado em conceitos de modelagem de preferências e admite preferência estrita e indiferença, com base em uma função de utilidade agregada. Normalmente, a incerteza é tratada com a avaliação da recompensa esperada, que às vezes é estimada pelo método de Monte Carlo em razão da explosão combinatória do número de incertezas em potencial. Tal explosão ocorre devido não apenas à resposta estocástica às alternativas, mas também aos parâmetros subjetivos de modelagem (MOSALAM *et al.*, 2018; DURBACH E STEWART, 2012). No entanto, uma avaliação eficaz exige um número significativo de amostras.

TÁVORA (2019) aplicou PROMETHEE junto ao método SIMOS, para elicitación de pesos aos critérios. Em seguida, foi feita uma análise de sensibilidade utilizando o método de Monte Carlo, com as funções objetivo representadas por meio de distribuições triangulares, além de três cenários distintos de pesos. Foram efetuadas 200 simulações para cada cenário.

A Análise Estocástica de Aceitação Multicritério (SMAA) também recorre à Simulação de Monte Carlo para explorar a variação dos parâmetros relativos às técnicas de MCDA. O objetivo, no entanto, é encontrar parâmetros como conjuntos de pesos para os quais cada alternativa seria preferida no respectivo modelo MCDA (LAHDELMA E SALMINEN, 2010). O componente estocástico é uma técnica de amostragem de Monte Carlo aplicada para explorar o espaço de pesos, uma vez que uma exploração completa desse espaço é computacionalmente intratável. Esta técnica foi utilizada para analisar os efeitos das alterações dos parâmetros do ELECTRE (ZHOU *et al.*, 2019), do PROMETHEE (HYDE *et al.*, 2003) e da AHP (BENÍTEZ *et al.*, 2019).

LOPES E ALMEIDA (2014) propuseram uma extensão do método PROMETHEE. Após uma aplicação do procedimento determinístico, sua ferramenta avalia como se comporta a preferência entre as alternativas em função dos desempenhos estocásticos. Os pesos não são modificados com as escalas de avaliação adotadas e continuam vinculados à noção de importância relativa.

HODGETT E SIRAJ (2019) apresentam as Simulações de Intervalo de Incerteza Simulada (SURE) que permitem que os tomadores de decisão prescrevam intervalos para suas preferências em termos de parâmetros do modelo. O método utiliza distribuições triangulares para todos os parâmetros e avaliações incertas. A saída é um gráfico de densidade do núcleo das preferências em relação às alternativas disponíveis.

RAM, MONTIBELLER E MORTON (2010) mostram que a análise multicritério lida bem com objetivos qualitativos e conflitantes ao avaliar estratégias e compará-las, mas carece de um arcabouço para analisar a incerteza. No trabalho em questão, são gerados vários cenários pelo método de planejamento de cenário (SP) e aplica-se a estrutura MCDA para medir o desempenho das opções para cada cenário. Por último, o método de arrependimento min-max é utilizado como uma medida de robustez ao resultado.

LEYVA-LÓPEZ (2007) foca na tomada de decisão sob incertezas no contexto da análise de decisão multicritério, utilizando o método de arrependimento. Este método mostra um poder preditivo em experimentos projetados e bons resultados aplicados junto ao MCDA. BEYNON (2002) usa a teoria de evidências Dempster-Shafer (DS) para abordar as incertezas em relação às avaliações subjetivas de comparações pareadas no AHP. Essas avaliações são consideradas ou desconsideradas com base em outro parâmetro definido pelo usuário, uma medida de plausibilidade arbitrada pelo tomador de decisão. Essa medida é modelada por meio de números nebulosos nos trabalhos de SADIQ E TESHAMARIAM (2009) E DURBACH E STEWART (2012).

Por fim, YANG *et al.* (2013) também recorrem a conjuntos nebulosos para modelar avaliações imprecisas de especialistas. A diferença no seu trabalho é o uso de análise hierárquica do Cloud Delphi (CDHA), em que os julgamentos são feitos em intervalos para lidar com a aleatoriedade e imprecisão dos julgamentos individuais. A análise intervalar e os números nebulosos também foram aplicados para emular um certo nível de incerteza no método TOPSIS (JAHANSHAHLOO *et al.*, 2006a; JAVID *et al.*, 2020). No primeiro trabalho a classificação de cada alternativa e o peso de cada critério são expressos como um conjunto difuso, o segundo modelou esses mesmos parâmetros como intervalos.

A complexidade e a incerteza envolvidas nos problemas de tomada de decisão do mundo real e a natureza subjetiva inerente dos julgamentos humanos representam desafios para especialistas no desenvolvimento de metodologias de tomada de decisão precisas com valores numéricos.

2.2 Abordagens probabilísticas do MCDA

Em HAHN (2003) discutiu-se a necessidade de uma caracterização estocástica para julgamento de comparações em pares pelos especialistas no AHP, pois estas podem

estar sujeitas a erros. Os autores também propuseram uma abordagem de razão de probabilidade para modelar as incertezas. Isso resulta em uma distribuição multinomial de preferências que justifica caracterizações probabilísticas das alternativas por meio de testes de hipóteses. O artigo aplica o método Monte Carlo via cadeia de Markov para obter prioridades para as alternativas, amostrando os pesos da distribuição multinomial resultante.

WADDINGHAM *et al.* (2016) também utilizam simulação Monte Carlo via cadeia de Markov para a análise na relação risco-benefício em uma abordagem de múltiplos critérios para tratamentos clínicos. O método MCDA requer uma função de valor parcial pré-especificada para cada resultado, que mapeia uma medida subjetiva de valor ou utilidade entre 0 e 1. Para esta análise, é necessário um conhecimento detalhado das preferências do tomador de decisão. A abordagem bayesiana é aplicada para gerar a distribuição da pontuação risco-benefício para cada tratamento no estudo de caso, modelando diretamente os resultados observados em ensaios controlados com placebo para vários tratamentos concorrentes para a mesma indicação. Diferentemente do nosso trabalho, foram utilizados pesos para elicitar os cálculos. Dez mil iterações foram executadas para obter a distribuição amostral.

CARNERO E GÓMEZ (2016) e CARNERO E GÓMEZ (2018) utilizam uma abordagem MCDA determinístico e aplicam cadeia de Markov para avaliar políticas de manutenção individuais em organizações de saúde. A análise MCDA é feita por meio do método MACBETH, que compara as alternativas com base em seu desempenho em estado estacionário. O objetivo é facilitar a escolha de combinação da política de manutenção mais adequada usando os julgamentos de um grupo multidisciplinar de decisores. Da mesma forma, HEMAM E HIOUAL (2016) usam uma cadeia de Markov em tempo discreto para avaliar o desempenho médio das alternativas e entender o comportamento dinâmico dos sistemas. Posteriormente, as alternativas são comparadas por meio de uma abordagem TOPSIS determinística, a fim de classificar as alternativas de serviço e selecionar a mais adequada. Neste estudo de caso, os pesos de custo e tempo são dados pelo usuário.

Em contraste, NAWAZ *et al.* (2018) fazem uso das cadeias de Markov para encontrar padrões de preferência do usuário nos serviços em nuvem e empregam técnicas determinísticas de MCDA para classificar os serviços disponíveis. Os padrões identificados são então utilizados para recomendação e seleção dos serviços adequados.

Por fim, cadeias de Markov com eliminação de Gauss-Jordan foram aplicadas como um acessório para acelerar o processo de solução de uma formulação generalista determinística do método ANP (Processo de Rede Analítica) (KIRYTOPOULOS *et al.*, 2011). O método da matriz 'poder', um procedimento necessário para a estabilidade do sistema de decisão, é um dos cálculos críticos na parte matemática do método. Os resultados são semelhantes ao método da matriz de potência, mas obtidos mais rapidamente e com menor custo computacional.

Nesta dissertação, propomos uma nova abordagem puramente estocástica para a tomada de decisão com vários critérios. Em contraste com HAHN (2003), que introduz uma formulação estatística como uma técnica de pós-processamento para uma abordagem determinística do MCDA, modelamos o processo de decisão como um processo estocástico. Portanto, nosso modelo evita as deficiências das abordagens determinísticas do MCDA, o excesso de parâmetros definidos pelo usuário que resultam em incerteza intrínseca e comprometem potencialmente a confiabilidade e a reprodutibilidade. Como exemplos desses parâmetros podemos citar as funções de preferência e as atribuições de pesos aos critérios, que geralmente são quantias muito difíceis de determinar, podendo ainda distorcer as opiniões dos tomadores de decisão. Ao mesmo tempo, a formulação proposta inova fornecendo uma estrutura adequada para o tratamento de funções e pontuações incertas de desempenho em relação a qualquer número de critérios.

Para finalizar, utiliza-se o método de arrependimento com intuito de antever resultados desfavoráveis em determinados aspectos e evitar arrependimentos significativos com respeito a algum(ns) dos critérios. Tal abordagem parte do pressuposto de que, depois de tomar uma decisão sob incerteza pode-se descobrir a posteriori que outra alternativa teria sido preferível e mais balanceada em relação ao conjunto de critérios. A Tabela 1, a seguir, sintetiza os métodos acima analisados.

Tabela 1: Síntese dos artigos.

Artigo	Método	Objetivo	Vantagem	Desvantagem
HAHN (2003)	Monte Carlo via cadeia de Markov	Melhorar possíveis erros de julgamento no método AHP	AHP Estocástico	Uso de pesos
CARNERO E GÓMEZ (2016) e CARNERO E GÓMEZ (2018)	Cadeia de Markov e MACBETH	Aumentar a qualidade do atendimento para políticas de tomada de decisão na gestão da saúde	Integração de diferentes técnicas que facilite a melhor escolha de combinação de políticas de manutenção, tornando-as mais racionais	Julgamento de pesos por um grupo para tomada de decisão
HEMAM E HIOUAL (2016)	Cadeia de Markov e TOPSIS	Avaliar o modelo de seleção levando em consideração o balanceamento de carga entre diferentes nuvens	Escolha da melhor opção ao compreender o comportamento dinâmico do sistema	Pesos dos critérios são arbitrários
NAWAZ <i>et al.</i> (2018)	Cadeia de Markov e melhor pior método	Desenvolver um corretor para a seleção de serviço em nuvem, encontrando um padrão das prioridades nas mudanças de preferências do usuário	Desenvolvimento de um padrão de preferências de serviços, modelando as incertezas e a classificação	Cálculo de pesos ideais para os critérios
KIRYTOPOULOS <i>et al.</i> (2011)	Cadeia de Markov e eliminação de Gauss-Jordan como ferramenta de resolução matricial	Auxiliar os tomadores de decisão na escolha de alternativas possíveis e critérios de priorização	Otimização do tempo e número de cálculos comparado ao método ANP padrão	Comparação par a par e criação de uma matriz limite para derivar os pesos finais para os critérios
WADDINGHAM <i>et al.</i> (2016)	Monte Carlo via cadeia de Markov	Avaliar risco-benefício com transparência ao processo	Trata a incerteza e modela resultados de acordo com ensaios clínicos e faz comparações indiretas nos tratamentos	Definição de preferências do tomador de decisão e grande quantidade de iterações para a amostra
Metodologia proposta	Cadeia de Markov e método de arrependimento	Escolher a alternativa que minimiza o máximo arrependimento dentro de um conjunto de critérios com incertezas	Incerteza é tratada naturalmente; não é necessário julgamento de parâmetros arbitrário e não utiliza pesos	Não é compatível com números nulos e os critérios devem ser maximizados

3. DESCOMISSIONAMENTO

3.1 Processo de Descomissionamento na área de óleo e gás

O processo de descomissionamento geralmente ocorre quando a produção de óleo e gás natural de um campo se torna antieconômica. O processo de descomissionamento de uma instalação é longo e obter a aprovação da autoridade relevante para cada etapa da operação pode ser um grande desafio. No Reino Unido, por exemplo, o processo pode demorar entre 3 e 6 anos; mas em países onde o arcabouço legal e a experiência técnica ainda não estão plenamente desenvolvidos, o processo pode levar muito mais tempo (HAMZAH, 2003).

Entre os anos de 2016 e 2019, foram descomissionadas 303 plataformas no Golfo do México. Em abril de 2019 o número de plataformas em atividade totalizava 1.862 (BSEE, 2020). Dessas plataformas, a maior parte encontrava-se em profundidades inferiores a 122 metros (400 ft). No Mar do Norte, 23 campos foram preparados para o descomissionamento. A expectativa é de um investimento de cerca 800 milhões de libras até 2021. Em 2016, havia 1.357 plataformas operando nessa área, com 157 já descomissionadas. Entre 2017 e 2025, estima-se que mais 205 unidades serão descomissionadas (OIL & GAS UK, 2017). A idade média das instalações remanescentes no Mar do Norte é superior a 20 anos, sendo 26 anos para as plataformas do Reino Unido e 24 anos para as plataformas norueguesas (ALMEIDA *et al.*, 2017).

No Brasil, segundo a ANP (2020a), 41% das unidades de produção marítima (*offshore*) estão em operação há mais de 25 anos e devem ser descomissionadas nos próximos anos e 24% das unidades totalizam entre 15 e 25 anos de operação. A realidade brasileira e mundial demonstra um acúmulo de sistemas que foram projetados inicialmente sem considerar o fim de sua vida útil.

Segundo estimativas recentes, do total das plataformas no país, cerca de 56% são unidades fixas, 30% são do tipo FPSO, aproximadamente 10% são semi-submersíveis e 4% são de outros tipos (ANP, 2020a). No Brasil, o descomissionamento torna-se algo ainda mais desafiador devido às grandes profundidades nas quais os recursos são explorados. A bacia de Campos, por exemplo, concentra 32% das unidades de produção em águas profundas (ANP, 2020a). Por isso, conta-se com uma participação mais relevante de estruturas mais complexas, completação molhada de poços e grande

Em 2010, houve um crescimento do número de plataformas em águas profundas e ultra profundas no Brasil, ocasionado pelas descobertas no pré-sal (SANTO, 2011). Apesar de representar um maior desafio tecnológico, político, estratégico, econômico e legislativo, no decorrer dos anos, com o conhecimento acumulado e com a ajuda da tecnologia, a produção diária de petróleo no pré-sal passou da média de aproximadamente 41 mil barris por dia, em 2010, para o patamar de 1,9 milhão de barris de óleo por dia em março de 2020 (PPSA, 2020).

Além da lâmina d'água, outro fator relevante são as distâncias até a costa, pois estas oneram o transporte das estruturas e dos equipamentos para disposição final ou reciclagem em terra. Os operadores enfrentam enormes desafios ao planejar a remoção dos equipamentos submarinos. O processo de descomissionamento pode levar anos, até que o descarte seja realizado com sucesso. O descomissionamento é uma atividade que não oferece retorno sobre o investimento. Ao contrário, carrega passivos ambientais e regulatórios significativos (IHS MARKIT, 2016).

Segundo ALMEIDA *et al.* (2017), os gastos globais por ano com descomissionamento de instalações marítimas (*offshore*) devem mais que quadruplicar até 2040, e o montante total despendido pode atingir US\$ 210 bilhões nos próximos 25 anos. Esses custos aumentam naturalmente com a profundidade e o tamanho da lamina d'água, variando ainda de acordo com tipo, complexidade e tamanho dos equipamentos. O fluxo de caixa de um projeto de petróleo, mostrado na Figura 1, pode ser apresentado em cinco grandes etapas. São elas: exploração, avaliação, desenvolvimento, produção e, por último, abandono (PEREIRA, 2004).



Figura 1: Principais etapas da indústria de óleo e gás de acordo com o custo. Fonte: PEREIRA (2004)

De acordo com a ilustração, a primeira fase definida é de exploração (E), seguida de avaliação (A), desenvolvimento (D) e produção (P). O eixo vertical acima da origem representa entrada da receita, já valores abaixo da origem indicam custos e investimentos.

Como o descomissionamento acontece só ao final do ciclo de vida do projeto, muitas vezes não recebe atenção suficiente no momento da avaliação do investimento. Existe uma grande dificuldade de estimar de forma criteriosa os custos com o descomissionamento, o que tende a se tornar um fator de incerteza econômica para empresas envolvidas.

Para facilitar a etapa do descomissionamento, as atividades de apoio devem começar a partir do desenvolvimento inicial de um campo, continuar durante a aprovação e na fase de produção do campo, até o encerramento das atividades. A título de análise, de acordo com M'PUSA (2017), no Reino Unido o programa detalhado e revisado de descomissionamento deve ser apresentado pelo operador aproximadamente cinco anos antes do encerramento da produção do poço.

HEFFRON (2018) discute as leis do descomissionamento no setor de energia, e sugere cuidadoso estudo das leis ainda incipientes. MURRAY *et al.* (2018) mostram a importância da indústria marinha e discutem como a coleta de informações do ecossistema marinho pode ajudar no descomissionamento, a fim de garantir melhor gestão ambiental *offshore*. FAM *et al.* (2018) fazem um resumo das regulamentações de países que são considerados mais experientes em descomissionamento. São eles: Reino Unido, Noruega, Estados Unidos e além desses, dois países produtores de petróleo no Sudeste asiático, Malásia e Tailândia.

No Brasil, foi publicada a Resolução nº 817/2020, que trata do descomissionamento de instalações de exploração e produção de petróleo e gás natural e da devolução das áreas desativadas. De modo similar ao que ocorre no Reino Unido, a resolução propõe iniciar um plano de desativação cinco anos antes da desativação marítima (ANP, 2020b).

Os provedores de serviços de descomissionamento são muito fragmentados. Não há um consenso sobre as técnicas que devem ser utilizadas e não há fornecedores dominantes, o que dificulta ainda mais a previsão precisa pelas operadoras *offshore* dos custos e riscos do descomissionamento (ALMEIDA *et al.*, 2017).

Uma flexibilização para o início das atividades da desativação pode, em alguns casos, gerar ganhos importantes de economia e eficiência. O adiamento do

descomissionamento de um projeto pode permitir simultaneidade de ações e racionalizar a demanda de serviços, através do aproveitamento de economias de escala. A contratação de serviços de descomissionamento para um conjunto de plataformas, por exemplo, poderia ser mais competitiva, resultando em custo mais baixos para a operadora.

HAMZAH (2003) divide o processo de descomissionamento em três fases práticas. A primeira fase consiste em tornar a estrutura apropriada, livre de elementos químicos perigosos e hidrocarbonetos, realizar o abandono os poços, a remoção de condutores e elevadores (*risers*), a lavagem e limpeza dos sistemas de processamento e preparar os componentes para as operações de elevação e remoção. A segunda etapa envolve a desmontagem e remoção da instalação e dos componentes associados e a terceira fase envolve a restauração e o monitoramento do local.

As regulações dos países possuem diferentes opções de remoção e de disposição para cada tipo de instalação marinha. A opção mais adequada a ser escolhida dependerá, primeiramente, das legislações pertinentes, e também de fatores como configuração e tipo da estrutura, peso, tamanho, distância até a costa, consistência do solo marinho, condições climáticas, custos, complexidade na execução das operações e tecnologias disponíveis (MARTINS, 2015).

A SHELL (2017) analisa como as estruturas marítimas podem ser reaproveitadas quando um campo se torna maduro e passível de descomissionamento. As possibilidades para o uso das estruturas marinhas, tanto de sistema submarino quanto de plataformas, são: armazenamento de gás, recifes artificiais, parque eólico *offshore*, uso militar, pesquisa, entre outras utilidades. SOMMER *et al.* (2019) revisam os efeitos ambientais do descomissionamento

Embora à primeira vista o impacto ambiental associado à permanência das estruturas no leito marinho seja maior, a remoção dos equipamentos também pode gerar efeitos negativos. Isso pode ocorrer, por exemplo, em função da produção de ruídos marítimos por sonares e bombas ou pelo arrasto de fundo marinho, ocasionando a ressuspensão de sedimentos durante a remoção das estruturas (MONTENEGRO, 2017). ROUSE *et al.* (2018) fazem uma análise da interação do impacto dos oleodutos no Mar do Norte, mostrando que se todos os oleodutos fossem assentados, ocupariam 0,01% de todo o mar do Reino Unido. Ressalta-se ainda que somente 13% desses dutos são assentados na superfície marinha. Diversificando os cenários, o estudo sugere que valeria a pena retirar somente os dutos acima de 30". SOMMER *et al.* (2019) revisam os efeitos ambientais do descomissionamento e argumentam que após décadas no mar, as estruturas

sustentam comunidades biológicas que fornecem funções e serviços ecossistêmicos valiosos. É importante reconhecer que, ao se expandir as opções de descomissionamento disponíveis e os critérios ambientais avaliados, proporciona-se uma avaliação mais robusta e abrangente dos impactos ambientais.

CHANDLER *et al.* (2017) mostram que a opção de deixar *in situ*, com alternativas abandono completo ou parcial, pode trazer benefícios; por exemplo, através da implementação de recifes artificiais. O trabalho também discute que outros benefícios como sociais, ambientais e econômicos decorrentes de uma política de remoção total podem não ser garantidos.

De modo geral, descomissionamento é um processo em que são analisados diversos fatores com intuito de mitigar os impactos sociais, ambientais, técnicos e econômicos, considerando também a regulação governamental (MARTINS, 2015).

3.2 Aplicações de MCDA em descomissionamento de óleo e gás

Diversos métodos de tomada de decisão têm sido aplicados no contexto de descomissionamento de óleo e gás, desde o desenvolvimento metodológico por universidades e centros de pesquisa até relatórios empresariais. Todavia, apesar da variedade de métodos existentes, nota-se uma tendência em utilizar metodologias mais simples nas aplicações reais: soma ponderada das avaliações com respeito aos critérios e pesos atribuídos pelos tomadores de decisão.

O método AHP está entre os métodos mais utilizados para tomada de decisão na área de energia (MARTINS *et al.*, 2020b). NA *et al.* (2017) aplicaram AHP para descomissionamento no setor de óleo e gás, em conjunto com outras ferramentas de auxílio para filtrar a base de dados da plataforma e reduzir os requisitos computacionais. As avaliações dos critérios pelos especialistas foram feitas por meio da escala de Saaty (SAATY, 1990).

O relatório de FAIRFIELD (2017) também utilizou AHP, aplicando cinco critérios de descomissionamento para dutos submarinos. São eles: segurança, meio ambiente, técnico, social e econômico. A todos os critérios foi atribuído o mesmo peso e foram utilizados 15 subcritérios, também ponderados de forma igual dentro de seus respectivos critérios. Os autores utilizam um banco de dados de alto desempenho (XODUS) para análise do critério ambiental.

HENRION *et al.* (2015) utilizaram MAUT para auxiliar no processo de desativação de plataformas de óleo e gás em alto mar. Eles ressaltaram que diversas alternativas de descomissionamento foram estudadas nos últimos anos, porém adicionar todas a um modelo de tomada de decisão pode aumentar demasiadamente a complexidade do problema e o custo computacional do modelo, ressaltando dificuldade na tomada de decisão. Diante disso, realizaram uma triagem das alternativas para verificar quais seriam inviáveis de acordo com alguns critérios técnicos, econômicos e políticos. Alguns atributos também foram excluídos e a escolha foi feita avaliando o julgamento das alternativas muito similares.

O método PROMETHEE foi aplicado para o descomissionamento de um duto rígido no campo de Cação. Foram utilizados 5 critérios e 16 subcritérios. Em conjunto com o PROMETHEE foi utilizado o método SIMOS para atribuir pesos (TÁVORA, 2019).

MARTINS *et al.* (2020a) utilizam em conjunto ao MCDA a técnica de aprendizado de máquina (*machine learning*) para reduzir os números de critérios. O método utilizado para fazer a seleção de uma alternativa de descomissionamento de um duto de óleo e gás foi o ELECTRE.

Análise comparativa é o método mais aplicado em relatórios empresariais de óleo e gás. Esta é considerada uma técnica de fácil implementação e de acordo com o guia de orientação de descomissionamento do OIL & GAS UK (2015) existem três métodos possíveis para avaliar as alternativas. O primeiro é qualitativo e baseado em escala de cores, o segundo e o terceiro permitem mesclar análises quantitativas e qualitativas, sendo que o terceiro inclui a atribuição de pesos.

Para o campo de Brent Spar (SHELL, 2017), utilizou-se a análise comparativa para o auxílio a tomada de decisão, seguindo como base as notas técnicas do DECC (*Department of Energy & Climate Change*) (OIL & GAS UK, 2015), com modificações apropriadas para os dutos. No relatório da SHELL (2017), os critérios utilizados na avaliação foram: segurança, meio ambiente, técnico, social e econômico. Cada critério foi dividido em subcritérios, que tomam em conta as características mais relevantes de acordo com o cenário do Reino Unido. Neste caso foram selecionados 12 subcritérios no total.

Outros relatórios do Reino Unido que se basearam no guia de análise comparativa foram BG GROUP (2016) e CNR INTERNATIONAL (CNRI, 2013). Os estudos do CNRI (2013) foram conduzidos por um grupo de trabalho com especialistas envolvidos

no processo de descomissionamento. A análise comparativa foi realizada para fornecer uma avaliação equilibrada das principais alternativas de remoção da subestrutura dos campos, neste caso remoção total e remoção parcial. Os subcritérios foram avaliados por meio de medidas quantitativas ou qualitativas, e depois pontuados em uma escala de 0 a 1, com 1 representando o melhor desempenho ou resultado. Avaliações qualitativas foram feitas por especialistas experientes e com base nos resultados de estudos de descomissionamento. As estimativas quantitativas para os subcritérios basearam-se nos dados apresentados para apoiar os estudos do descomissionamento. Os valores de cada opção dentro dos subcritérios foram transpostos para a escala 0-1 por meio da normalização proporcional dos dados brutos.

O relatório de BG GROUP (2016) inicialmente propõe avaliação qualitativa baseada em escala de cores para eliminar alternativas infactíveis. Posteriormente, as demais alternativas são avaliadas por meio de critérios quantitativos e qualitativos, através da atribuição de uma nota. Além disso, foram atribuídos pesos para os critérios a partir de comparação par a par, definindo-se conceitos que variam desde “critérios com igual importância” até “importância forte de um critério sob o outro”. Esses pesos foram convertidos para uma escala numérica de um (1) a quatro (4). A pontuação foi então normalizada pela média geométrica e os pesos foram distribuídos igualmente pelos subcritérios. Por fim, para compor a nota final que deu origem à ordenação das alternativas, é proposto um ajuste da escala a partir de uma nota de preferência, que indica a proporção da diferença entre as notas da melhor e da pior opção.

O relatório de Windermere (INEOS, 2018) e o relatório de Thames (PERENCO, 2014) abordaram a escolha de uma alternativa de descomissionamento de dutos por meio de análise comparativa. A avaliação dos vinte subcritérios foi feita por meio de uma matriz de risco, com os mesmos critérios utilizados no campo de Brent, composta pelo nível do impacto e a probabilidade de ocorrência.

O relatório de Jacky (ITHACA ENERGY, 2018) também utiliza a análise comparativa e os mesmos critérios de Windermere. No entanto, a matriz de risco foi formada por notas de impacto de 1 (um) a 5 (cinco), sendo 1 correspondente ao melhor desempenho e 5 ao pior. Além disso, foi utilizada uma matriz de nível de incerteza (1, 1.5 ou 2). O valor final de cada alternativa em ambos os relatórios, para comparação final, foi dado pela soma da média das notas dos subcritérios de cada um dos critérios.

A avaliação comparativa da SPIRIT ENERGY (2017) foi predominantemente qualitativa. No entanto, em alguns casos, como na avaliação de custo, é necessário

examinar as diferenças em maiores detalhes e quantitativamente para proporcionar maior clareza.

Ao se observar os processos de descomissionamento relatados na literatura, verifica-se a propensão à aplicação de métodos mais simples, principalmente em relatórios empresariais, como mostrado na Tabela 2. Além disso, verifica-se uma crescente demanda por ferramentas de auxílio à decisão em problemas de descomissionamento, os quais envolvem não somente atividades complexas, como também um número elevado de decisões, uma vez que se deve decidir sobre o método de remoção ou abandono *in situ* de cada um dos equipamentos presentes no campo. Isso evidencia a necessidade de uma ferramenta de multicritério mais robusta, assertiva e de fácil aplicação para o descomissionamento de equipamentos marítimos, proporcionando maior confiança na escolha.

Cabe ressaltar que, apesar da motivação ter sido descomissionamento de óleo e gás, o método descrito a seguir pode ser aplicado para qualquer problema de decisão sob múltiplos critérios.

Tabela 2: Síntese dos artigos e relatórios.

Artigos/ Relatórios	Método Utilizado
NA <i>et al.</i> (2017)	AHP
FAIRFIELD (2017)	AHP
HENRION <i>et al.</i> (2015)	MAUT
TÁVORA (2019)	PROMETHEE e método SIMOS
MARTINS <i>et al.</i> (2020a)	Machine Learning e ELECTRE
SHELL (2017)	Análise Comparativa
BG GROUP (2016)	Análise Comparativa
CNRI (2013)	Análise Comparativa
INEOS (2018)	Análise Comparativa
PERENCO (2014)	Análise Comparativa
ITHACA ENERGY (2018)	Análise Comparativa
SPIRIT ENERGY (2017)	Análise Comparativa

4. CADEIA DE MARKOV E MÉTODO DE ARREPENDIMENTO (CM&R)

4.1 Procedimento metodológico

Essa seção aborda o procedimento metodológico utilizado para o desenvolvimento do método multicritério cadeia de Markov e método de arrependimento (CM&R).

Inicialmente foi feito um levantamento bibliográfico de métodos multicritérios e suas aplicações no setor de óleo e gás. Foi então realizada uma análise preliminar dos dados disponíveis na literatura, a fim de se selecionar dados reais de campos de petróleo e gás descomissionados ou passíveis de descomissionamento para os experimentos numéricos.

O primeiro campo selecionado foi Brent, operado pela Shell, localizado na Bacia Shetland Oriental do Mar do Norte, 186 km a nordeste de Lerwick, na Escócia, com lâmina d'água de 140 metros. Como neste campo já foi feito o relatório de descomissionamento, os critérios e subcritérios utilizados serão os mesmos que os do relatório da SHELL (2017). Para este campo foram analisados dois dutos.

O segundo campo é o de Cação, operado pela Petrobras, situado no Estado do Espírito Santo, a cerca de 47 km da cidade de São Mateus e 7 km da linha da costa brasileira, em profundidade aproximada de 19 metros (PETROBRAS, 2018). Para esse experimento numérico foram utilizados os critérios e subcritérios propostos pelo relatório da DNV (DNV-GL, 2018) e a base de dados de TÁVORA (2019).

Os dados manipulados são quantitativos. Para os três experimentos, o equipamento escolhido para a análise de descomissionamento é um duto rígido. Com os dados selecionados, é feito um pré-processamento de modo a se definir um problema de maximização em relação a todos os subcritérios.

Ferramentas computacionais são usadas para criar os geradores infinitesimais que modelam a evolução das cadeias de Markov utilizadas e para analisar o método de arrependimento, os quais serão descritos no decorrer do capítulo. Além disso, uma ferramenta auxiliar foi empregada para encontrar a distribuição de probabilidade do regime permanente, também apresentada no decorrer do capítulo.

A Figura 2 mostra a dinâmica de um sistema modelado em quatro etapas.

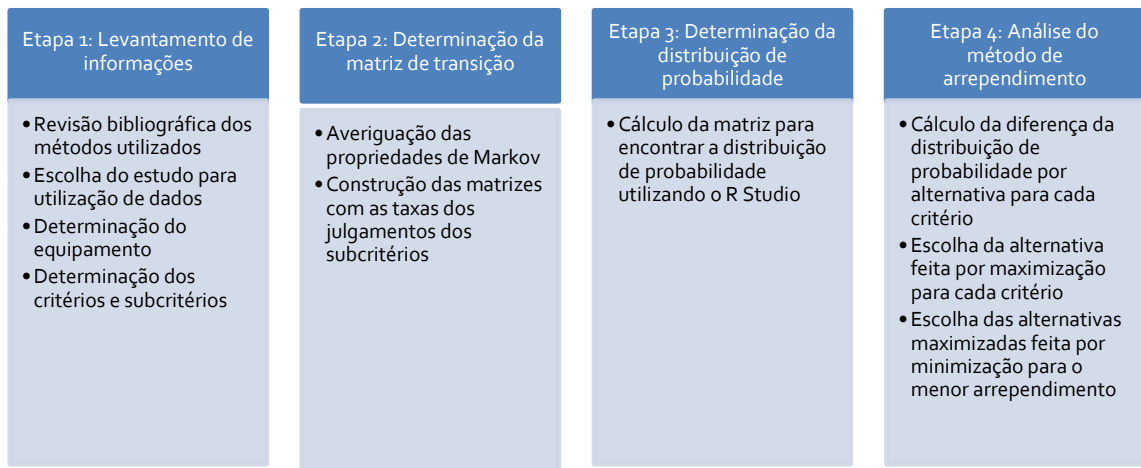


Figura 2: Etapas da metodologia aplicada.

4.2 Formulação Matemática

Considere um problema de decisão em que várias alternativas devem ser avaliadas com relação a um conjunto de critérios previamente definido. Sejam $S = 1, 2, \dots, m$, o conjunto de alternativas a serem consideradas e $C = 1, 2, \dots, n$ o conjunto de critérios. Para cada alternativa, seja $f_j(a)$ o desempenho da alternativa $a \in S$ com relação ao critério $j \in C$. Idealmente, o tomador de decisão procura a solução para o problema abaixo:

$$\text{Maximizar } f_j(a); a \in S; j \in C. \quad (1)$$

No entanto, essa solução raramente existe. Portanto, a tarefa do tomador de decisão é selecionar uma ação cuja avaliação ofereça um equilíbrio adequado entre todos os critérios $j \in C$. Para auxiliar nessa decisão, modelamos o sistema por meio de uma série de cadeias de Markov em tempo contínuo X_t^j , $t \geq 0$, uma para cada critério j . Para uma descrição abrangente sobre cadeias de Markov em tempo contínuo, recomenda-se consultar BRÉMAUD (1999).

Para cada $j \in C$, o processo estocástico X_t^j , $t \geq 0$ assume valores do conjunto S de alternativas disponíveis, evolui em tempo contínuo e representa as mudanças dinâmicas na preferência do tomador de decisão. Observe a escolha é modelada como um sistema dinâmico, no qual a preferência muda de acordo com as taxas de transição, as quais dependem da avaliação de todas as alternativas disponíveis no conjunto S . Se $X_t^j = a$, $a \in$

S , em um dado momento t , isso significa que a é a alternativa preferida em relação ao critério j nesse instante de tempo. A preferência muda de acordo com uma cadeia de Markov em tempo contínuo e a taxa de transição depende do estado atual. A preferência muda da alternativa a para a alternativa b com base no desempenho relativo dessas alternativas em relação ao critério j . A taxa de transição da alternativa a para alternativa b é denotada por $\lambda_j(a, b)$ e definida pela Eq. (2):

$$\lambda_j(a, b) = E\left(\frac{f_i(b)}{f_i(a)}\right), a, b \in S, j \in C. \quad (2)$$

Observe que se a e b têm desempenhos semelhantes em relação ao critério j , então $\lambda_j(a, b) \approx \lambda_j(b, a) \approx 1$, o que indica indiferença. Portanto, a fração do lado direito da Eq. (2) pode ser considerada uma função de preferência natural e objetiva. Ressaltamos que não envolve parâmetros arbitrários nem avaliações subjetivas dos tomadores de decisão. Além disso, como uma função probabilística, foi projetada para lidar com a incerteza.

A Eq. (2) implica um gerador infinitesimal para o processo X_t^j , $t \geq 0$ dado por:

$$\Lambda_j = |\lambda_j(a, b)| = \begin{cases} \lambda_j(a, b), & \text{se } a \neq b; \\ -\sum_{c \neq a} \lambda_j(a, c), & \text{se } a = b. \end{cases} \quad (3)$$

De acordo com as Eq. (2) - (3), X_t^j , $t \geq 0$, passará mais tempo em alternativas com maior desempenho em termos do critério j . No entanto, para calcular a probabilidade exata de que cada alternativa $a \in S$ seja preferida a longo prazo, precisamos avaliar o comportamento em estado estacionário do processo X_t^j , $t \geq 0$. Os resultados clássicos de cadeias de Markov indicam que as probabilidades de estado estacionário satisfazem o seguinte sistema de equações (BRÉMAUD, 1999):

$$\begin{aligned} \pi_j \Lambda_j &= 0 \\ \sum_{a \in S} \pi_j(a) &= 1. \end{aligned} \quad (4)$$

O valor $\pi_j(a)$ na Eq. (4) pode ser interpretado como a probabilidade de o tomador de decisão preferir a alternativa a com respeito ao critério j a longo prazo. Portanto, $\pi_j(a)$ é o grau de preferência da alternativa a sob o critério j . Observe que, na formulação proposta, o grau de preferência é uma interpretação direta do comportamento no estado estacionário. Para ilustrar esse problema, suponha $S = \{a, b\}$ e assuma $f_j(a) = 100$ e $f_j(b) = 95$ para um determinado critério $j \in C$. Isso gera:

$$\Lambda_j = \begin{bmatrix} -\frac{95}{100} & \frac{95}{100} \\ \frac{100}{95} & -\frac{100}{95} \end{bmatrix}$$

E a solução para (4) é $\pi_j = [0,526 \ 0,474]$. Portanto, o grau de preferência da alternativa a é $\pi_j(a) = 0,526$, enquanto o grau de preferência pela alternativa b é $\pi_j(b) = 0,474$, quantidades que podem ser prontamente interpretadas após cálculos objetivos. Por outro lado, uma abordagem clássica não compensatória, como o PROMETHEE, exigiria uma função de preferência arbitrária, bem como limiares arbitrários de indiferença e preferência, para se obter uma quantificação de preferência semelhante que seria válida apenas para esse conjunto específico de parâmetros (veja por exemplo, BRANS E MARESCHAL, 2005).

Para agregar os graus de preferência atribuídos individualmente para cada critério $j \in C$, propomos o uso de uma abordagem minimax que busque a alternativa que minimize o máximo arrependimento. Calculamos o arrependimento em relação ao desempenho da alternativa com o maior grau de preferência para cada critério j , definido como:

$$g_j^* = \max_{a \in S} \pi_j(a), \quad j \in C, \quad (5)$$

sendo π_j a solução de (4) e a alternativa $a_j^* = \arg \max_{a \in S} \pi_j(a)$ pertence ao conjunto de alternativas preferidas sob o critério j .

Seja $R = [r_{ja}]$, $j \in C, a \in S$ uma matriz de arrependimentos tal que:

$$r_{ja} = g_j^* - \pi_j(a), \quad j \in C, a \in S. \quad (6)$$

O arrependimento máximo da alternativa $a \in S$ é definido como

$$r_m(a) = \max_{j \in C} r_{ja}, \quad (7)$$

e determina a maior incompatibilidade entre o grau de preferência da alternativa a e o da alternativa preferencial para cada critério no conjunto C .

O método seleciona a alternativa a^* que minimiza o arrependimento máximo e, portanto, satisfaz:

$$a^* = \operatorname{argmin}_{a \in S} r_m(a). \quad (8)$$

Para entender melhor o método, segue um exemplo simples para ilustrar a abordagem. Considere o exemplo acima, e defina $S = \{a, b\}$. Suponha que $C = \{1, 2, 3\}$ é o conjunto de critérios e que a solução para a Eq. (4) produz $\pi_1 = [0,526 \ 0,474]$, $\pi_2 = [0,643 \ 0,357]$ e $\pi_3 = [0,279 \ 0,721]$.

Então, a Eq. (5) gera $g_j^* = [0,526 \ 0,643 \ 0,721]$ como o vetor contendo os maiores graus de preferência para todos os critérios. Aplicando a Eq. (6) obtemos a matriz de arrependimentos na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de arrependimentos.

Alternativas	r_1	r_2	r_3
a	0	0	0,442
b	0,052	0,286	0

Sendo r_1 , r_2 e r_3 os arrependimentos em relação a cada critério. Portanto, a solução para a Eq. (7) é obtida por inspeção simples da matriz R acima e produz os arrependimentos máximos $r_m(a) = 0,442$ e $r_m(b) = 0,286$. Portanto, a Eq. (8) produz $a^* = b$ e a alternativa b é selecionada porque minimiza o máximo arrependimento.

5. APLICAÇÃO DE MÉTODOS MCDA AO PROBLEMA DE DESCOMISSIONAMENTO

5.1 Aplicação do Método MC&R

De acordo com a formulação matemática apresentada na seção anterior, o presente capítulo mostra as aplicações do método MC&R no campo de Brent, no Mar do Norte e no campo de Cação, situado na bacia do Espírito Santo, no Brasil.

5.1.1 Experimento Campo de Brent

Para uma ilustração mais completa do método proposto, foi selecionado o processo de desativação de uma instalação de produção de petróleo e gás no campo de Brent.

Como mostrado na Figura 3, o campo de Brent compreende 4 plataformas (Alpha, Bravo, Charlie e Delta GBS), 28 tubulações (aproximadamente 103 km) e 4 estruturas submarinas: a válvula de isolamento *Sub-Sea* (SSIV), *PipeLine End Manifold* (PLEM), *Spool-Piecede* montagem da válvula (VASP) e o *splitter box*.

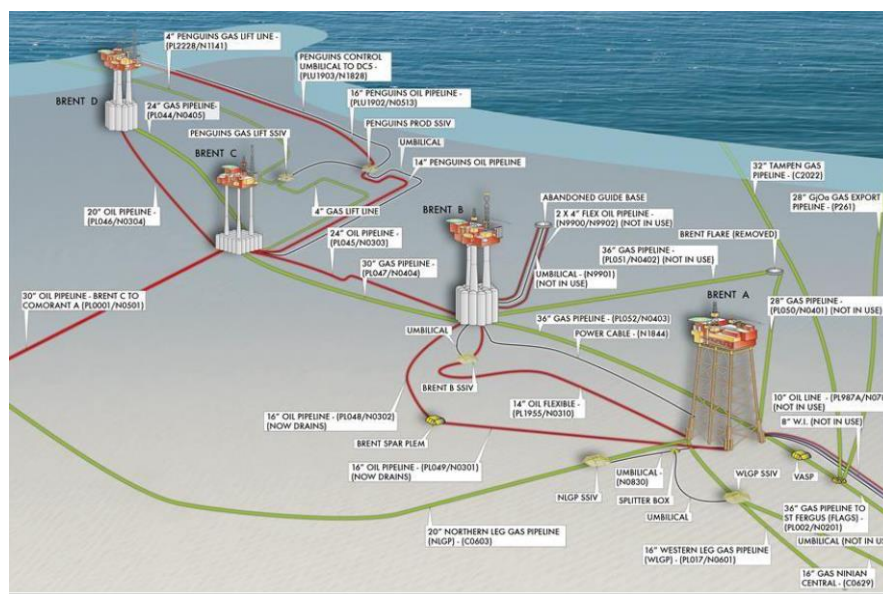


Figura 3: Arranjo Geral do Campo de Brent. Fonte: SHELL (2017)

No relatório da SHELL (2017), os dutos do campo dividem-se em quantitativos e qualitativos. Foram selecionadas as linhas quantitativas, pois entende-se que para o

presente estudo estas linhas terão mais margem para discussões e opções realizáveis para o descomissionamento. Escolhendo entre as alternativas que têm mais opções de descomissionamento, para o primeiro duto do experimento, selecionamos um oleoduto rígido específico chamado PL002/N0201 em SHELL (2017), localizado entre a plataforma Brent Alpha e estrutura VASP, com 1,3 km de comprimento. O VASP foi removido do fundo do mar durante o descomissionamento do Brent. O segundo duto selecionado é o gasoduto PL047/N0404, que se encontrava entre a plataforma de Brent Bravo e Charlie, com 4,4 km de comprimento.

As decisões de ambos os dutos foram tomadas considerando um conjunto C composto por 12 subcritérios. A Tabela 3 mostra o conjunto de critérios utilizados para a escolha da alternativa.

Tabela 3: Critérios e subcritérios utilizados no experimento de Brent.

Critério	Subcritério
Segurança	1- Risco de segurança do trabalho <i>offshore</i> (PPV)
	2- Risco de segurança para outros usuários do mar (PPV)
	3- Risco de segurança do trabalho <i>onshore</i> (PPV)
Meio Ambiente	4- Impacto ambiental operacional (Nota)
	5- Legado dos impactos Ambientais (Nota)
	6- Uso da Energia (GJ)
	7- Emissões de gases (Ton de CO2)
Técnico	8- Viabilidade Técnica (Nota)
Social	9- Efeitos na pesca comercial (GBP)
	10- Emprego (HH)
	11- Impacto nas comunidades (Nota)
Econômico	12- Custo (mGBP)

PPV – Prováveis perdas de vida; GJ – Gigajoules; GBP – Libras esterlinas; HH –Homem-hora.

Fonte: Adaptado Shell (2017)

Na Tabela 4 são listadas todas as alternativas de descomissionamento para o campo de Brent. As possibilidades serão analisadas de acordo com cada um dos dutos.

Tabela 4: Alternativas de descomissionamento.

Alternativas	Descrição
a ₁	Deixar no local sem necessidade de remediação adicional;
a ₂	Manter conectado à plataforma e aterrar a extremidade;
a ₃	Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas;
a ₄	Desconectar da instalação submarina e aterrar todo o comprimento do duto;
a ₅	Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha;
a ₆	Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação;
a ₇	Remover todo o comprimento do duto por S-lay reverso (junta única)

Fonte: Adaptado Shell (2017)

5.1.1.1 PL 002/N0201

De acordo com o duto PL 002/N0201 escolhido, a Tabela 5 mostra as alternativas de descomissionamento disponíveis. Uma única alternativa deve ser selecionada considerando o conjunto de doze subcritérios descritos na Tabela 3.

Tabela 5: Alternativas de descomissionamento do duto escolhido.

Duto	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
PL 002/N0201		✓	✓	✓	✓	✓	✓

Para aplicar o método utilizaremos a Tabela 6, que apresenta os dados brutos relativos aos subcritérios e alternativas. Já a Tabela 7 mostra esses dados convertidos para um problema de maximização.

Tabela 6: Dados brutos para cada subcritério.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
1	0,0016	0,0016	0,0024	0,0020	0,0028	0,0043
2	0,008	0,0938	0,0016	0,0016	0,0012	0,0012
3	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
4	0,99	0,98	0,91	0,85	0,91	0,95
5	0,95	0,95	1	0,9	1	1
6	24345,42	20867,51	24345,42	24345,42	24345,42	27823,34
7	1881,7	1881,7	2195,15	1881,7	1568,25	1881,7
8	0,92	1	0,8	1	0,84	0,35
9	0	0	228344,2	183367,3	228344,2	228344,2
10	6,35	3,17	9,53	6,35	19,05	31,76
11	0,9955	0,9955	0,9955	0,9955	0,9463	0,9463
12	1,34	1,07	2,14	1,87	5,07	7,75

Tabela 7: Desempenho das alternativas após maximização.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
1	625,00	625,00	416,67	500,00	357,14	232,56
2	12,50	10,66	625,00	625,00	833,33	833,33
3	833,33	833,33	833,33	833,33	833,33	833,33
4	0,99	0,98	0,91	0,85	0,91	0,95
5	0,95	0,95	1,00	0,90	1,00	1,00
6	4,11E-05	4,79E-05	4,11E-05	4,11E-05	4,11E-05	3,59E-05
7	0,000531	0,000531	0,000456	0,000531	0,000638	0,000531
8	0,92	1,00	0,80	1,00	0,84	0,35
9	1,00	1,00	228344,20	183367,30	228344,20	228344,20

10	6,35	3,17	9,53	6,35	19,05	31,76
11	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95
12	0,75	0,93	0,47	0,53	0,20	0,13

O próximo passo é a construção da matriz dos geradores infinitesimais para todos os 12 subcritérios, usando a Eq. (3).

A título de exemplo, a Tabela 8 apresenta os resultados das taxas de transição para o subcritério 1. As matrizes de transição dos outros subcritérios encontram-se no Apêndice I.

Tabela 8: Matriz de taxas de transição do subcritério 1.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-3,41	1,00	0,67	0,80	0,57	0,37
a ₃	1,00	-3,41	0,67	0,80	0,57	0,37
a ₄	1,50	1,50	-5,62	1,20	0,86	0,56
a ₅	1,25	1,25	0,83	-4,51	0,71	0,47
a ₆	1,75	1,75	1,17	1,40	-6,72	0,65
a ₇	2,69	2,69	1,79	2,15	1,54	-10,85

Após resolver (4) para cada subcritério, obtemos as probabilidades do regime permanente (Tabela 9), isto é, de acordo com cada subcritério, a probabilidade do tomador de decisão preferir uma alternativa:

Tabela 9: Distribuição de probabilidade.

Altern.	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}
a ₂	0,282	0,004	0,167	0,188	0,161	0,163	0,162	0,196	0,001	0,026	0,172	0,280
a ₃	0,282	0,003	0,167	0,184	0,161	0,222	0,162	0,232	0,001	0,006	0,172	0,439
a ₄	0,125	0,180	0,167	0,159	0,178	0,163	0,119	0,148	0,251	0,058	0,172	0,110
a ₅	0,180	0,180	0,167	0,138	0,144	0,163	0,162	0,232	0,232	0,026	0,172	0,144
a ₆	0,092	0,320	0,167	0,159	0,178	0,163	0,233	0,164	0,263	0,234	0,156	0,020
a ₇	0,039	0,320	0,167	0,173	0,178	0,125	0,162	0,028	0,251	0,649	0,156	0,008

A matriz de arrependimentos R produzida pela Eq. (6) é dada na Tabela 10, na qual cada coluna r_j corresponde a um subcritério específico:

Tabela 10: Matriz de Arrependimentos.

Altern.	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}	r_{11}	r_{12}
a ₂	0,000	0,316	0,000	0,000	0,017	0,059	0,071	0,036	0,261	0,624	0,000	0,159
a ₃	0,000	0,317	0,000	0,004	0,017	0,000	0,071	0,000	0,261	0,643	0,000	0,000
a ₄	0,157	0,139	0,000	0,029	0,000	0,059	0,114	0,083	0,011	0,591	0,000	0,329
a ₅	0,101	0,139	0,000	0,049	0,034	0,059	0,071	0,000	0,031	0,624	0,000	0,295
a ₆	0,190	0,000	0,000	0,029	0,000	0,059	0,000	0,068	0,000	0,416	0,017	0,419
a ₇	0,243	0,000	0,000	0,015	0,000	0,097	0,071	0,203	0,011	0,000	0,017	0,430

Portanto, o vetor de arrependimentos máximos - Eq. (7) – em relação a cada alternativa é dado a seguir:

$$r_m = [0,624 \ 0,643 \ 0,591 \ 0,624 \ 0,419 \ 0,430].$$

Por consequência, a alternativa que minimiza o arrependimento máximo de acordo com a Eq. (8) é $a^* = a_6$, cujo arrependimento é 0,419, lembrando que a alternativa a_6 indica “Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação”, conforme descrito na Tabela 5.

Os dados utilizados foram extraídos do relatório da SHELL (2017) para o campo Brent, que utilizou avaliação comparativa. Este método usa 'escalas globais' como uma maneira de fornecer uma escala adimensional para comparar diferentes subcritérios. Esse processo de transformação converteu os diferentes subcritérios em uma medida comum, o que permite que os dados sejam examinados com mais facilidade. Não é um método muito robusto, mas é bastante simples.

O relatório aplicou o método de avaliação comparativa e o resultado encontrado foi a alternativa a₅ – “Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha”. Contudo, essa não foi a alternativa selecionada; a opção praticada foi a a₄ – “Desconectar da instalação submarina e aterrar todo o comprimento do duto”.

Segundo análises da SHELL (2017), quando os desempenhos em todos os outros subcritérios não mostram diferenças significativas, o custo pode ser considerado um fator determinante. Considerando as opiniões expressas pela Federação Escocesa de Pescadores (SFF) durante discussões informais, buscou-se uma alternativa mais equilibrada entre a redução do risco de segurança para outros usuários (pescadores) e as despesas do projeto. Para esse fim, os dados da alternativa a₄ – “Desconectar da instalação submarina e aterrar todo o comprimento do duto” foram examinados, pois essa opção resultaria na redução da metade do risco potencial de segurança para os pescadores.

Na alternativa a₄, o risco potencial de segurança para os pescadores durante a vida útil prevista do oleoduto é metade do estimado para a alternativa a₅. Essa redução de PPV (prováveis perdas de vida) seria acompanhada de um ligeiro aumento no risco de segurança para as pessoas do projeto em a₄, que não foi considerado significativo. A propósito, a alternativa a₄ teria menos impacto operacional que a alternativa a₅.

Para as operações da alternativa a₅, seria necessário despejar rochas, diferentemente da a₄, na qual o oleoduto seria completamente enterrado. A alternativa a₄, portanto, tem um desempenho melhor que a alternativa a₅ no subcritério 'impacto ambiental', atingindo a pontuação mais alta possível na escala global. No entanto, a abertura de valas do gasoduto usaria menos energia e geraria menos emissões gasosas. Essas diferenças nos valores calculados são, todavia, pequenas. Além disso, devido às condições difíceis e variáveis do fundo do mar no campo de Brent, considera-se um pouco mais difícil escavar o oleoduto do que removê-lo cortando e levantando ou despejando rochas por todo o comprimento; contudo, a diferença de viabilidade não é grande.

Portanto, após a escolha da alternativa pelo método de avaliação comparativa, ela não foi utilizada e as análises foram feitas com outras consideradas mais atrativas economicamente. Assim, o modelo parece insuficiente ou impreciso. Diferentemente do método usado pela Shell, o método sugerido neste artigo tem o tratamento dos dados de entrada, além do uso não arbitrário do peso, sendo assim mais preciso na escolha da alternativa. Não é difícil entender a preferência da companhia petrolífera pelas opções a_4 e a_5 , uma vez que essas são mais econômicas por não envolverem a remoção do duto. Assim, a alternativa mais equilibrada em relação aos arrependimentos, a_6 , ficou de fora da análise após aplicação da ferramenta de avaliação comparativa.

5.1.1.2 PL 047/N0404

Para o gasoduto PL 047/N0404, são utilizados os mesmos conjuntos de critérios e subcritérios, mostrados na Tabela 3, porém as alternativas de descomissionamento são diferentes. O duto escolhido tem possibilidade de 5 alternativas de descomissionamento, como apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Alternativas de descomissionamento do duto escolhido.

Duto	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
PL 047/N0404	✓			✓	✓	✓	✓

Os dados brutos, retirados do relatório da SHELL (2017), são apresentados na Tabela 12, mostrando o desempenho de cada alternativa. A Tabela 13 mostra os valores após serem maximizados, em relação a cada subcritério.

Tabela 12: Dados brutos para cada subcritério.

Alternativas	a_1	a_4	a_5	a_6	a_7
1	0,0001	0,0009	0,0008	0,0045	0,0067
2	0,0631	0,0015	0,003	0	0
3	0	0	0	0,0004	0,0004
4	1	0,85	0,77	0,91	0,92
5	0,83	1	0,65	1	1

6	48,767	56,584	62,403	56,966	53,719
7	3,949	4,502	4,773	3,745	3,576
8	1	0,8	1	0,87	0,35
9	0	284,105	227,284	284,105	284,105
10	0,4	7,3	9,6	52,8	64,9
11	1	0,99	0,99	0,9	0,9
12	0,09	1,83	2,41	13,26	16,3

Tabela 13: Desempenho das alternativas após maximização.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
1	10000	1111,11	1250	222,22	149,25
2	0,942	0,998	0,997	1	1
3	1	1	1	0,9996	0,9996
4	1	0,85	0,77	0,91	0,92
5	0,83	1	0,65	1	1
6	0,020	0,017	0,0160	0,017	0,018
7	0,253	0,222	0,209	0,267	0,2796
8	1	0,8	1	0,87	0,35
9	0,10	284,10	227,28	284,10	284,10
10	0,4	7,3	9,6	52,8	64,9
11	1	0,99	0,99	0,9	0,9
12	11,111	0,546	0,414	0,075	0,061

Utilizando a Eq. (3), construímos a matriz dos geradores infinitesimais para cada um dos 12 subcritérios. A título de exemplo, a Tabela 14 apresenta os resultados das taxas de transição para o subcritério 1. As matrizes de transição dos outros subcritérios encontram-se no Apêndice II.

Tabela 14: Matriz de taxas de transição do subcritério 1.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-0,27	0,11	0,13	0,02	0,01
a ₄	9,00	-10,46	1,13	0,20	0,13
a ₅	8,00	0,89	-9,19	0,18	0,12
a ₆	45,00	5,00	5,63	-56,30	0,67
a ₇	67,00	7,44	8,38	1,49	-84,31

Após resolver (4) para cada subcritério, obtemos as probabilidades do regime permanente (Tabela 15), isto é, de acordo com cada subcritério, a probabilidade do tomador de decisão preferir uma alternativa:

Tabela 15: Distribuição de probabilidade.

Alternativas	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}
a ₁	0,9751	0,182	0,200	0,251	0,168	0,256	0,209	0,284	0,00001	0,0001	0,218	0,9985
a ₄	0,0001	0,204	0,200	0,181	0,243	0,190	0,161	0,182	0,2747	0,00753	0,214	0,0001
a ₅	0,0191	0,204	0,200	0,149	0,103	0,156	0,143	0,284	0,1759	0,013015	0,214	0,0001
a ₆	0,005	0,205	0,199	0,208	0,243	0,187	0,232	0,215	0,2747	0,3902	0,177	0,0002
a ₇	0,0007	0,205	0,199	0,212	0,243	0,211	0,255	0,035	0,2747	0,5892	0,177	0,0002

Utilizando a Eq. (6), construímos a matriz de arrependimentos R, apresentada na Tabela 16, na qual cada coluna r_j corresponde ao arrependimento de um subcritério individual:

Tabela 16: Matriz de Arrependimentos.

Alternativas	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r ₉	r ₁₀	r ₁₁	r ₁₂
a ₁	0,000	0,023	0,000	0,000	0,076	0,000	0,046	0,000	0,275	0,589	0,000	0,000
a ₄	0,975	0,001	0,000	0,071	0,000	0,066	0,094	0,102	0,000	0,582	0,004	0,9984
a ₅	0,956	0,001	0,000	0,102	0,141	0,100	0,112	0,000	0,099	0,576	0,004	0,9984
a ₆	0,970	0,000	0,001	0,044	0,000	0,068	0,023	0,069	0,000	0,199	0,042	0,9983

a7	0,974	0,000	0,001	0,039	0,000	0,045	0,000	0,249	0,000	0,000	0,042	0,9983
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

De acordo com a tabela acima, o vetor de arrependimentos máximos - Eq. (7) – em relação a cada alternativa é dado a seguir:

$$r_m = [0,5891 \quad 0,9984 \quad 0,9984 \quad 0,9983 \quad 0,9983].$$

Portanto, a alternativa que minimiza o arrependimento máximo de acordo com a Eq. (8) é $a^* = a_1$, cujo arrependimento é 0,5891, lembrando que a alternativa a_1 indica “Deixar no local sem necessidade de remediação adicional”, conforme descrito na Tabela 11.

Com base na análise comparativa feita pela SHELL (2017), a opção recomendada é a mesma que a escolhida no experimento numérico, a_1 – “Deixar no local sem necessidade de remediação adicional”. O próximo melhor resultado é a foi a a_5 – “Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha”. A opção a_1 é geralmente classificada primeiro, embora não pontue significativamente mais alto do que a opção a_5 e a maioria das outras opções em consideração.

Porém, de acordo com o descrito no relatório da Shell, houve uma discussão informal com a associação dos pescadores e expressaram dúvidas quanto às implicações a longo prazo em deixara maioria dos dutos desprotegidos no fundo do mar com pouca ou nenhuma mitigação adicional, então chegaram à conclusão de que a opção a_1 deveria ser eliminada.

No caso de PL047/N0404, a comparação a ser feita é entre as duas próximas opções com maiores pontuações, a_5 – “Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha” e a_6 – “Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação”. No relatório de Brent, a alternativa a_6 é preferível à alternativa a_5 em sete subcritérios (uso de energia, emissões de gases, risco de segurança para outros usuários do mar, emprego, efeitos na pesca comercial, legado dos impactos ambientais e impactos ambientais operacionais). Em alguns casos, as diferenças são muito pequenas.

Em relação à viabilidade técnica, a alternativa a_5 recebeu a pontuação mais alta possível, já que despejar rochas é uma rotina na indústria e não há preocupações na capacidade de executar. Já a_6 teve uma pontuação ligeiramente inferior neste subcritério,

devido à preocupação com a capacidade de recuperar com sucesso um duto desta idade, diâmetro e comprimento em seções curtas; no entanto afirmaram que as operações de corte e elevação são rotineiras na indústria e quaisquer dificuldades técnicas encontradas provavelmente resultariam em operações prolongadas e, portanto, custo. Como tal, este subcritério não é considerado um impulsionador significativo entre as opções.

O impacto nas comunidades tem uma diferença muito pequena nessas duas alternativas de descomissionamento e a quantidade de material devolvido à costa não é grande. Portanto, foi concluído pela empresa que este subcritério não é um forte diferenciador entre as opções.

Para os impactos ambientais operacionais a alternativa a₆ resultaria em uma pequena perturbação dos sedimentos do fundo do mar, uma vez que o duto é cortado em seções e recuperado. A análise mostra uma recuperação rápida do fundo do mar e da fauna bentônica. Já a alternativa a₅ perturbaria o fundo do mar durante a deposição da rocha necessária para cobrir todo o duto. O volume necessário para cobrir o PL047/ N0404 é o terceiro maior de todos os considerados para os dutos. No entanto, de acordo com os estudos da Shell, não se espera um impacto ambiental significativo, concluindo que este subcritério não diferencia fortemente as duas opções.

É considerado que o uso da energia também não é um ponto crítico, já que os valores são próximos e o maior uso da energia é ligeiramente compensado pela reciclagem do material recuperado. O mesmo ocorre com a emissão de gases na atividade do descomissionamento, já que representa menos de 1% na emissão total das plataformas, uma proporção muito pequena em relação às emissões operacionais.

Os custos das opções para PL047 / N0404 foram compilados usando experiências internas da Shell e algumas informações fornecidas por empreiteiros da indústria. A opção a₆ tem um custo estimado de £ 13,26 milhões e a opção a₅ de £ 2,41 milhões, menos de um quinto do custo da alternativa a₆.

O risco total de segurança do projeto para a alternativa a₅ é pequeno (0,0008). De acordo com o relatório, essa alternativa teria que ser repetida 1.250 vezes antes que pudesse haver uma fatalidade entre o pessoal do projeto. O risco de segurança para a alternativa a₆ é 0,0049: seis vezes o risco potencial de a₅. Entretanto, de acordo com a Shell, quando comparado com o PLL limite usado na avaliação de projetos de E&P, o total de PLLs para a₅ está dentro do intervalo ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) e, portanto, não exigiria mitigação adicional antes da execução. A alternativa a₆ é maior que esse limite e indica que é necessária mais mitigação antes de execução da

alternativa. No entanto, a Shell afirma que as avaliações dos riscos de segurança são avaliações conservadoras (não mitigadas), feitas na ausência de quaisquer medidas de segurança específicas do local ou do projeto e que nunca embarcariam em qualquer atividade que fosse insegura.

Após a avaliação das pontuações ponderadas para cada subcritério, para a Shell não há motivadores fortes que diferenciem as alternativas a_5 e a_6 , além dos subcritérios custo e risco de segurança para o projeto e outros usuários do mar. Apesar disso, a empresa afirma que as premissas usadas nos cálculos de risco foram conservadoras e acreditam que os efeitos individuais e combinados superestimaram a probabilidade de que o equipamento de pesca prenda em dutos degradados no fundo do mar e que isso leve a acidentes e que os acidentes levarão a mortes. No entanto, os riscos para os pescadores são menos suscetíveis a mitigação que os riscos para o pessoal do projeto.

Pela análise da SHELL (2017) os desempenhos em todos os outros subcritérios não mostram diferenças significativas. Portanto, o custo pode ser considerado um motivador. A alternativa a_6 eliminaria qualquer risco de segurança futuro para os pescadores; no entanto, isso exigiria uma despesa de £ 13,26 milhões - um aumento de mais de £ 10 milhões comparado a alternativa a_5 .

Ciente das opiniões expressas pela associação pescadores, para redução do risco de segurança para outros usuários (pescadores) e as despesas do projeto, a Shell escolheu a alternativa a_4 – “Desconectar da instalação submarina e aterrar todo o comprimento do duto”. Essa alternativa resultaria na metade do risco potencial para a segurança dos pescadores e um menor custo, indicando ser uma opção equilibrada.

Isto posto, apesar da mesma escolha de alternativa com o método da análise comparativa e o experimento numérico, esta não foi utilizada e foi excluída da análise. A melhor opção seria retirar a alternativa e refazer o estudo. Além disso, a avaliação feita pela Shell comparando duas alternativas pode ter sido distorcida, já que novamente, de acordo com os interesses da empresa, a quarta opção da análise foi escolhida .

5.1.2 Experimento Campo de Cação

Para este experimento é utilizado o campo de Cação, situado no estado do Espírito Santo, Brasil. É composto por três unidades fixas de produção PCA-01, PCA-02 e PCA-03, como mostrado na Figura 4.



Figura 4: Plataforma de Cação. Fonte: PETROBRAS (2018)

O escoamento da produção é realizado através de três dutos, sendo um oleoduto de 6" e dois gasodutos de 4" e 10". Para este experimento foi selecionado o oleoduto rígido de 6", que interliga a plataforma PCA-02 à estação coletora Fazenda Cedro. Neste estudo será considerado somente o trecho marinho de comprimento de 9 km.

Os critério e subcritérios utilizados são baseados no guia da DNV (DNV-GL, 2018), que foi desenvolvido para orientações de descomissionamento de instalações submarinas pelas principais empresas de petróleo do Brasil. Além disso, o relatório de descomissionamento da PETROBRAS (2018) e o trabalho de TÁVORA (2019) são utilizados como base de dados para este experimento numérico.

São considerados 5 critérios, sendo desmembrados em 16 subcritérios e 4 alternativas de descomissionamento, como mostrado nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17: Critérios e subcritérios utilizados para a escolha da alternativa.

Critério	Subcritério
Segurança	1-Risco para trabalhadores <i>offshore</i> (PPV)
	2-Risco de segurança para outros usuários do mar (PPV)
	3- Risco de segurança do trabalho <i>onshore</i> (PPV)
	4- Risco para público em terra (PPV)

Meio Ambiente	5- Impacto sobre o ambiente marinho (Nota)
	6- Impactos sobre ambiente terrestre (Nota)
	7- Risco de disseminação de espécies invasoras (Nota)
	8- Geração de resíduos (Ton)
	9- Emissões (Ton CO ₂ -eq)
	10- Risco de vazamento no ambiente marinho (Nota)
	11- Risco do ambiente marinho a partir do legado <i>in-situ</i> (Nota)
Social	12- Impacto nas comunidades (Nota)
	13- Impactos sociais em terra (Km ² -ano-pesca)
	14- Impacto sobre o emprego (Emprego-ano)
Técnico	15- Impacto sobre a viabilidade técnica (Nota)
Econômico	16- Custo (\$)

PPV – Prováveis perdas de vida; ton – Tonelada; \$ - Dólar

Fonte: Adaptado de TÁVORA (2019)

Tabela 18: Alternativas de descomissionamento de dutos.

Alternativa	Descrição
b ₁	Abandono total do duto;
b ₂	Abandono com deposição nas extremidade com rochas;
b ₃	Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação;
b ₄	Remover todo o comprimento do duto por S-lay reverso (junta única)

Fonte: TÁVORA (2019)

Inicialmente, utilizaremos a Tabela 19, que mostra o desempenho de cada alternativa disponível em relação aos dezesseis subcritérios. A Tabela 20 mostra os dados após pré-processamento para um problema de maximização.

Tabela 19: Dados brutos para cada subcritério.

Subcritérios	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
1	0,000775	0,000499	0,00688	0,00267
2	0	0,00128	0,000464	0
3	0,0014	0,00132	0,0029	0,00168
4	0	0	0,00559	0,00018
5	20,3	21,6	61,5	62,9
6	3,25	3,77	6,42	6,52
7	5,08	7,83	6,89	9,02
8	0	0	445	359
9	10600	21100	35000	28800
10	6,5	6,61	11	11,7
11	5,26	5,15	2,15	1,56
12	8,05	8,73	28,1	13,7
13	1630	726000	56000000	87100000
14	112	70,13	52,8	78,8
15	12,9	19,6	27	22,7
16	1800000	2150000	22600000	12000000

Tabela 20: Desempenho das alternativas para cada subcritério

Subcritérios	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
1	1290,323	2004,008	145,349	374,532
2	1	0,998	0,999	1
3	714,286	757,576	344,828	595,238

4	1	1	0,994	0,999
5	0,049	0,046	0,016	0,015
6	0,308	0,265	0,156	0,153
7	0,197	0,128	0,145	0,111
8	1	1	0,140	0,145
9	9,43E-05	4,74E-05	2,86E-05	3,47E-05
10	0,154	0,151	0,091	0,085
11	0,190	0,194	0,465	0,641
12	0,124	0,115	0,036	0,073
13	6,135E-04	1,38E-06	2,0E-08	1,0E-08
14	112	70,13	52,8	78,8
15	0,077	0,051	0,037	0,0440
16	5,56E-07	4,65E-07	4,42E-08	8,33E-08

Após a construção dos geradores infinitesimais para todos os 16 subcritérios, por meio da Eq. (3), são calculadas as probabilidades do estado estacionário, que satisfazem a Eq. (4). O resultado é mostrado na Tabela 21. Já os resultados dos geradores infinitesimais podem ser consultados no Apêndice III.

Tabela 21: Distribuição de probabilidade

Altern.	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}	π_{15}	π_{16}
b ₁	0,285	0,2501	0,328	0,251	0,477	0,445	0,438	0,489	0,676	0,381	0,052	0,439	0,9990	0,4741	0,504	0,578
b ₂	0,687	0,2498	0,369	0,251	0,421	0,331	0,184	0,489	0,171	0,368	0,054	0,373	0,0002	0,1858	0,218	0,405
b ₃	0,004	0,2500	0,076	0,247	0,052	0,114	0,238	0,009	0,062	0,133	0,309	0,036	0,00001	0,1053	0,115	0,004
b ₄	0,024	0,2501	0,228	0,251	0,050	0,111	0,139	0,010	0,092	0,118	0,586	0,152	0,00001	0,2347	0,163	0,013

A matriz de arrependimentos R produzida pela Eq. (6) é dada na Tabela 22, na qual cada coluna corresponde ao arrependimento vinculado a um subcritério.

Tabela 22: Matriz de arrependimentos.

Altern.	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r ₉	r ₁₀	r ₁₁	r ₁₂	r ₁₃	r ₁₄	r ₁₅	r ₁₆
b ₁	0,402	0,0000	0,041	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,535	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
b ₂	0,000	0,0003	0,000	0,000	0,056	0,114	0,254	0,000	0,505	0,013	0,532	0,066	0,9988	0,288	0,286	0,173
b ₃	0,684	0,0001	0,292	0,004	0,425	0,331	0,200	0,480	0,614	0,248	0,278	0,403	0,9999	0,369	0,389	0,574
b ₄	0,663	0,0000	0,141	0,000	0,427	0,334	0,299	0,479	0,584	0,263	0,000	0,287	0,9999	0,239	0,341	0,565

Portanto, o vetor de arrependimentos máximos - Eq. (7) – é dado por

$$r_m = [0,5346. \ 0,9988 \ 0,9989 \ 0,9989].$$

Consequentemente, a alternativa escolhida como mais adequada para este experimento numérico, isto é, que minimiza o arrependimento máximo de acordo com a Eq. (8) é $a^* = b_1$ - “Abandono total do duto”, cujo arrependimento é 0,5346.

A título de comparação, o trabalho de TÁVORA (2019) utilizou o método PROMETHEE junto ao método SIMOS para calcular pesos para os critérios. Além do SIMOS, há mais duas variações de pesos; em uma delas os critérios têm o mesmo peso e na outra opção todos os subcritérios tem o mesmo peso. No método SIMOS três especialistas foram consultados e o peso final foi a média das três avaliações. Também foi feita uma análise de sensibilidade utilizando a simulação de Monte Carlo. A distribuição utilizada nos valores dos subcritérios foi a triangular. Foram procedidas 200 simulações.

O resultado do trabalho foi b_1 - “Abandono total” - para os três cenários de pesos. Essa solução foi confirmada pela análise de sensibilidade realizada pela simulação Monte Carlo. A análise de diversos cenários de pesos mostra a incerteza e a dificuldade do julgamento. Já o método proposto é de mais fácil implementação, pois prescinde da atribuição de pesos. Além disso, não é necessário também avaliar funções de preferência e seus valores limites.

5.2 Análise de Sensibilidade

Para os estudos de Brent e de Cação foram feitas análises de sensibilidade, técnica que permite de forma controlada conduzir experimentos e investigações com o uso de um modelo.

Alterações em uma variável foram consideradas para avaliar a saída (*output*) do modelo. Para um resultado mais robusto, a análise de sensibilidade foi feita variando o peso para cada critério, e consequentemente os subcritérios associados. Nessa avaliação, os subcritérios associados ao critério têm o mesmo peso. Utilizamos o método AHP para fazer essa variação dos pesos. Este método foi escolhido por suas características pertinentes às etapas que serão utilizadas, e por calcular os resultados parciais.

5.2.1 Campo de Brent - PL 002/N0201

Para o duto PL 002/N0201 fez-se as seguintes modificações dos pesos gerando 9 cenários. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados referentes aos pesos dos critérios.

Critérios	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
Segurança	0,1	0,3	0,5	0,3	0,1	0,2	0,25	0,25	0,200
Meio Ambiente	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,10	0,10	0,300
Técnico	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,20	0,20	0,150
Social	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,25	0,15	0,250
Econômico	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,20	0,30	0,100
Resultado	a ₃	a ₆	a ₅	a ₃	a ₆	a ₃	a ₅	a ₃	a ₆

a₃: Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas; a₅: Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha; a₆: Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação;

Para analisar melhor o resultado, foi gerado um gráfico que avalia a comparação dos pesos de acordo com as alternativas escolhidas, como mostrado na Figura 5.

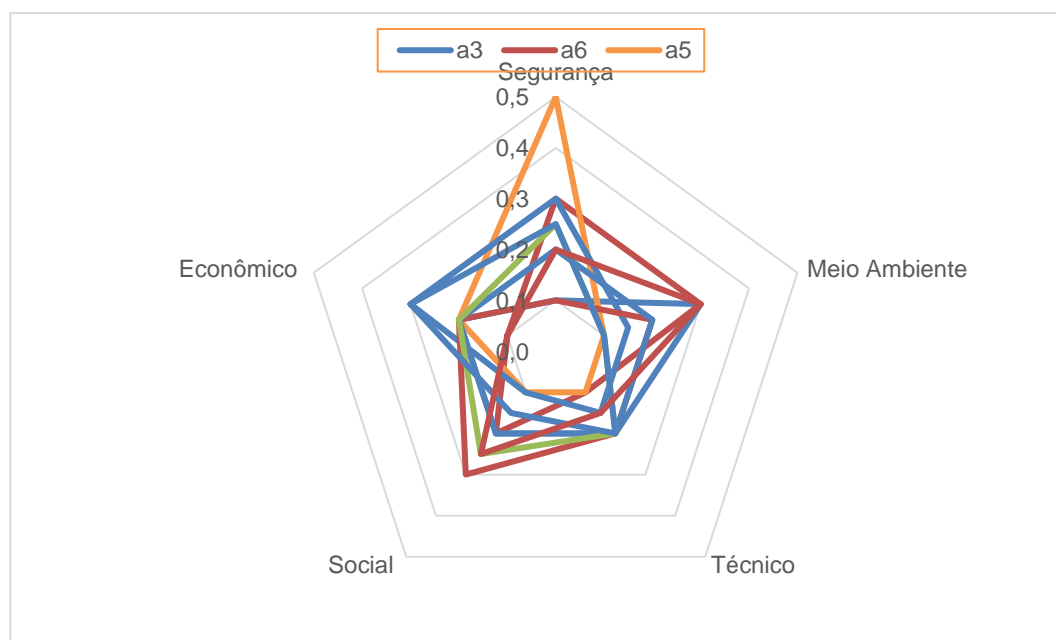


Figura 5: Análise dos pesos de acordo com a alternativa.

De acordo com a Tabela 23 e a Figura 5, verifica-se que apesar dos pesos não apresentarem uma diferenciação relevante, os resultados finais variam significativamente. Prova disso é que obtivemos 3 resultados diferentes (a_3 , a_5 , a_6) em 9 simulações realizadas. Além disso, as alternativas com as mesmas escolhas tendem a um critério ou tendem a ter menos peso em um certo critério, como ocorre na alternativa a_6 , cujos pesos no econômico e no técnico são pequenos.

Quando uma pequena variação em um parâmetro, como no peso, impacta o resultado final, conclui-se que este parâmetro possui grande sensibilidade.

A título de exemplo, analisamos separadamente os cenários 7 e 8, como mostrado na Figura 6. Estes possuem pesos similares, porém com propostas de descomissionamento diferentes. Enquanto a escolha da alternativa no cenário 8 foi a_3 - “Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas”, para o cenário 7 a alternativa selecionada foi a_5 - “Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha”.

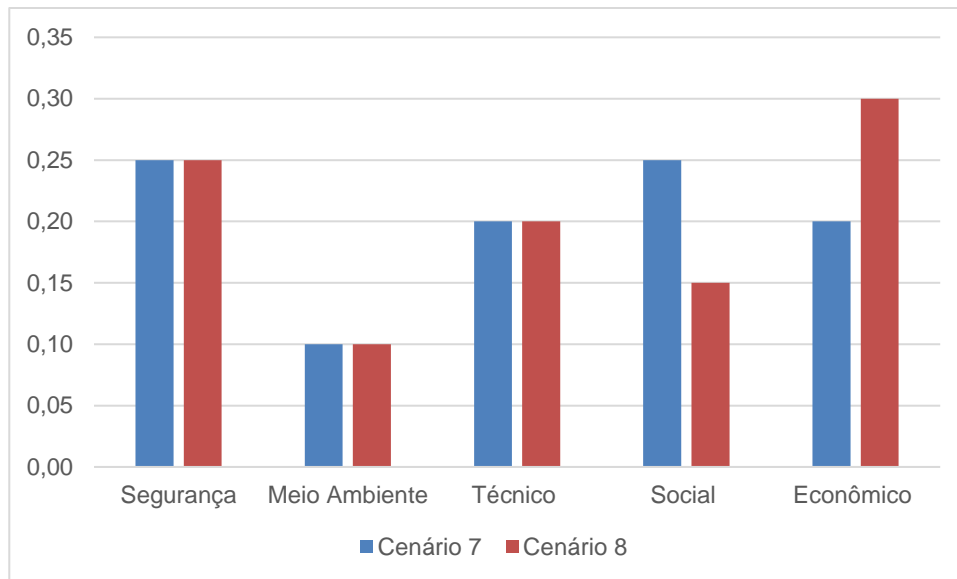


Figura 6: Comparação dos pesos nos cenários 7 e 8.

Apesar das alternativas serem consideradas parecidas, os atributos dos subcritérios variam significativamente, como por exemplo, a alternativa a_3 tem um risco de segurança para usuários do mar 58 vezes maior e gera metade dos empregos que a alternativa a_5 . Entretanto, a opção a_3 não tem efeitos na pesca comercial, diferente da a_5 que tem um grande impacto.

Os cenários 1, 4, 6 e 8 tiveram a mesma alternativa escolhida – a_3 . Para melhor visualização, observe a Figura 7.

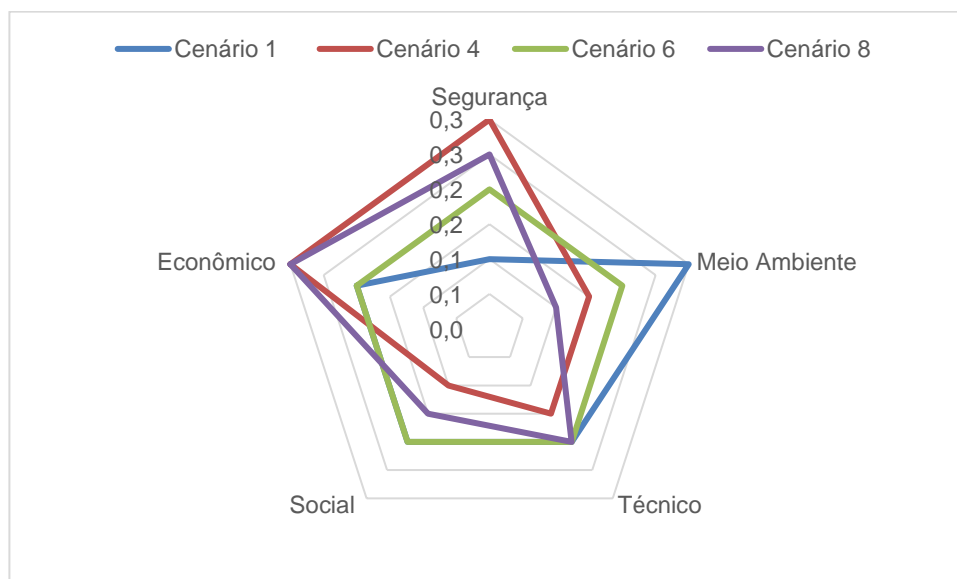


Figura 7: Cenários com a escolha de alternativa a_3 .

Da mesma maneira são apresentadas as Figuras 8 e 9 com os resultados das alternativas a_5 e a_6 , respectivamente.

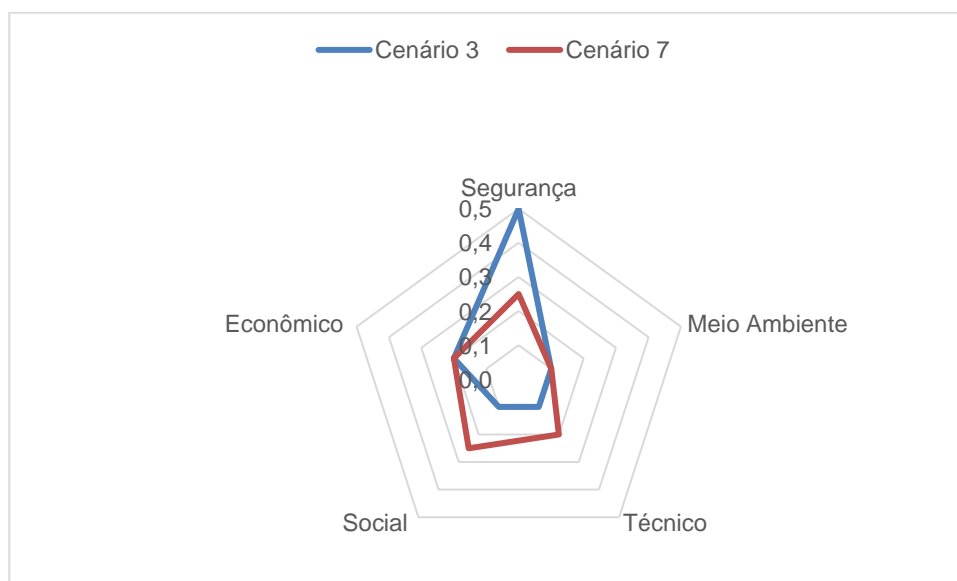


Figura 8: Cenários com a escolha da alternativa a_5 .

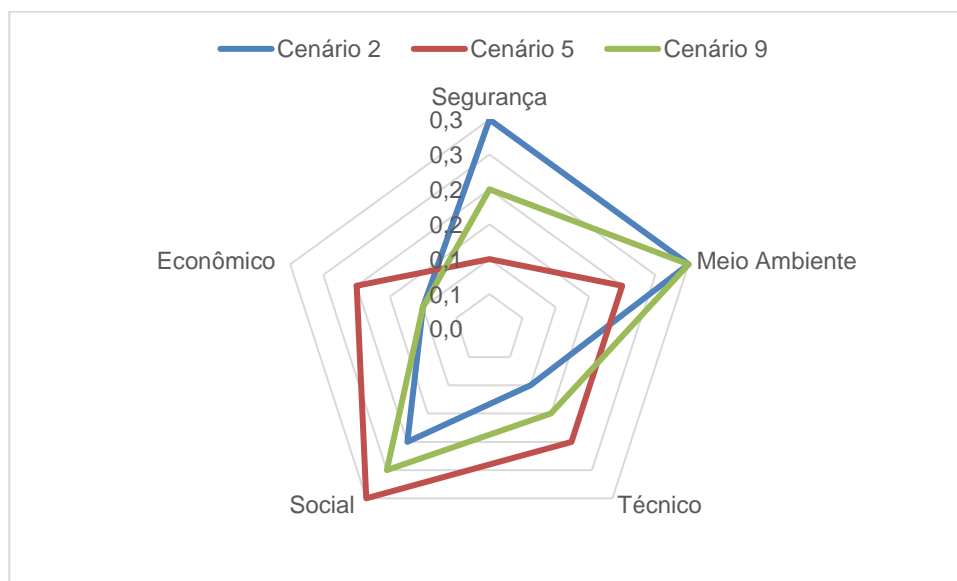


Figura 9: Cenários com a escolha da alternativa a_6 .

Portanto, pode-se concluir que o componente peso associa uma variedade de incertezas nos resultados finais obtidos no processo de tomada de decisão.

5.2.2 Campo de Brent -PL 047/N0404

Outra análise de sensibilidade foi feita para o campo de Brent. Para o duto PL 047/N0404 fez-se as seguintes modificações dos pesos gerando 9 cenários (Tabela 24).

Tabela 24: Resultados referentes aos pesos dos critérios.

Crítérios	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
Segurança	0,20	0,15	0,30	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10	0,25
Meio Ambiente	0,20	0,25	0,30	0,20	0,30	0,10	0,20	0,40	0,033
Técnico	0,20	0,20	0,10	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,083
Social	0,20	0,30	0,20	0,30	0,25	0,10	0,30	0,30	0,25
Econômico	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,25	0,10	0,083
Resultado	a ₁	a ₆	a ₁	a ₆	a ₁	a ₁	a ₁	a ₇	a ₁

a₁: Deixar no local sem necessidade de remediação adicional; a₆: Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação; a₇: Remover todo o comprimento do duto por S-lay reverso (junta única).

Foi gerado um gráfico que avalia a comparação dos pesos entre os cenários de acordo com as alternativas escolhidas, como mostrado na Figura 10.

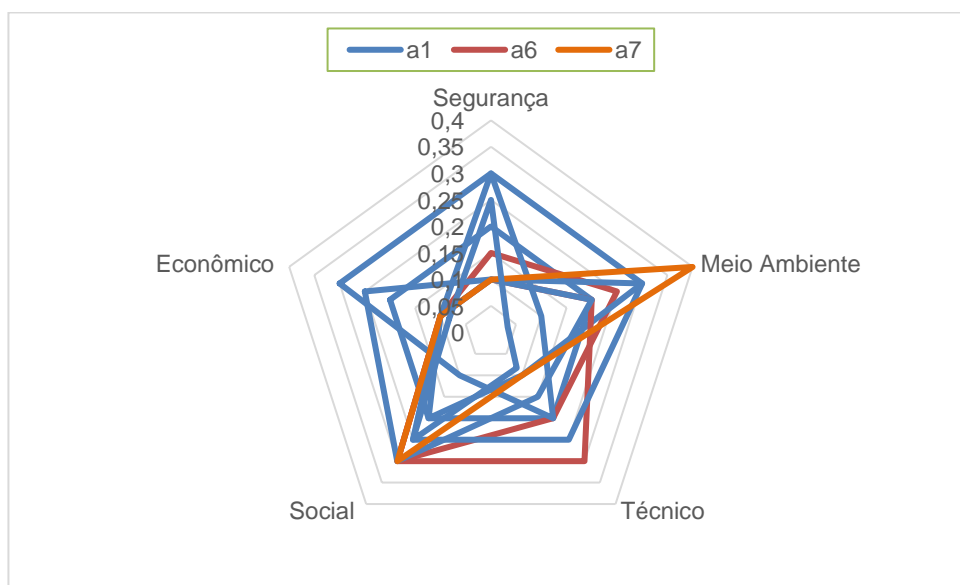


Figura 10: Análise dos pesos de acordo com a alternativa.

De acordo com a análise feita pelo método AHP e fazendo a variação dos pesos, para o duto selecionado, apresentam-se três opções de descomissionamento: a_1 – “Deixar no local sem necessidade de remediação adicional”; a_6 – “Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação” e a_7 – “Remover todo o comprimento do duto por S-lay reverso (junta única)”.

Entende-se ter uma opção de preferência neste experimento, já que somente para valores mais extremos de alguns critérios a alternativa de descomissionamento é modificada. Além disso, observou-se que para a escolha da alternativa a_7 os pesos dos critérios técnico, econômico e segurança devem ser baixos, em contraste com o critério meio ambiente, que deve ter valor alto.

Para a alternativa a_6 , os critérios econômicos e de segurança devem continuar baixos. Mas, diferente da alternativa a_7 , o valor do critério técnico pode ser alto. Os dois cenários mostram a necessidade de o peso do critério social ser acima de 0,3 (Figura 11).

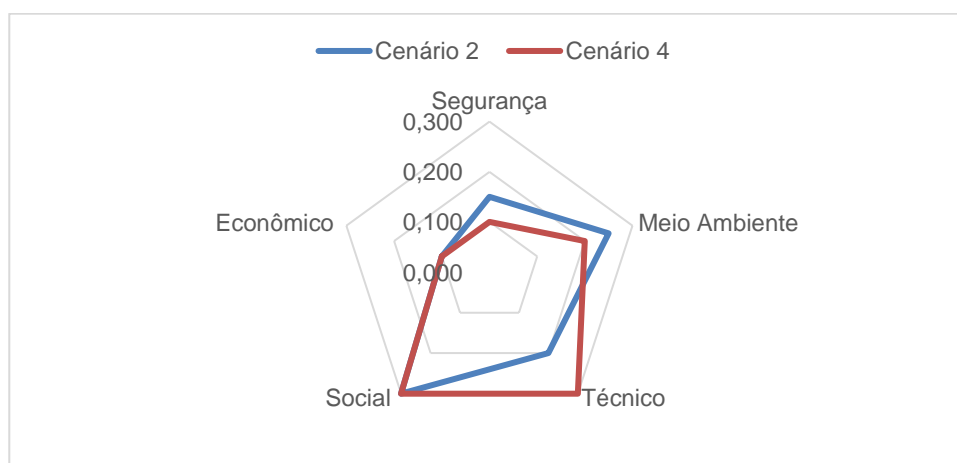


Figura 11: Cenários com a escolha da alternativa a_6 .

Os valores dos pesos de cada cenário foram gerados arbitrariamente. Nota-se que, apesar de uma alternativa ser mais prevalente, outras opções podem ser selecionadas dependendo do conjunto de pesos atribuídos. Outro fator importante são os dados de entrada, que devem ser bem avaliados para evitar viés no processo de escolha.

5.2.3 Campo de Cação

Para o Campo de Cação, localizado na bacia do Espírito Santo, também foram feitas análises dos pesos utilizando o método AHP, com 9 cenários de pesos diferentes, como apresentado na Tabela 25 a seguir.

Tabela 25: Resultados referentes aos pesos dos critérios.

Crítérios	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
Segurança	0,15	0,30	0,25	0,10	0,10	0,10	0,35	0,10	0,25
Meio Ambiente	0,20	0,20	0,25	0,20	0,15	0,30	0,10	0,20	0,44
Técnico	0,10	0,10	0,20	0,20	0,30	0,10	0,10	0,25	0,06
Social	0,25	0,20	0,20	0,40	0,30	0,30	0,10	0,15	0,19
Econômico	0,30	0,20	0,10	0,10	0,15	0,20	0,35	0,30	0,06
Resultado	b ₁	b ₁	b ₁	b ₁	b ₁	b ₁	b ₁	b ₁	b ₁

b₁: Abandono total do duto

Para uma melhor visualização do resultado, um gráfico foi elaborado para ilustrar os pesos para cada um dos nove cenários (Figura 12).

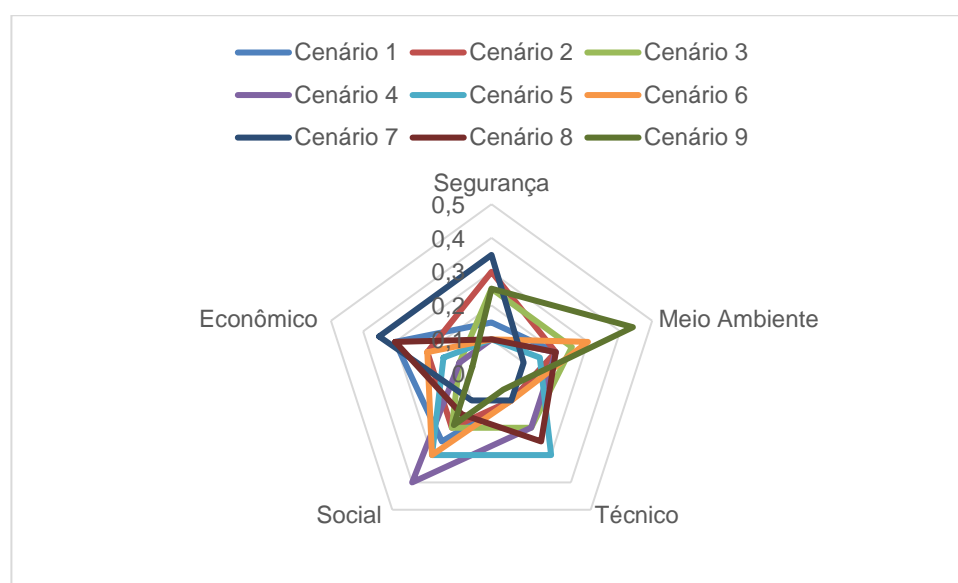


Figura 12: Análise dos pesos comparando os cenários.

Neste experimento numérico observa-se um claro viés para uma alternativa de descomissionamento. Em todos os cinco critérios os valores da opção b₁ – “Abandono total do duto” são melhores. Dessa maneira, independente do conjunto de pesos, a opção escolhida será a mesma.

A Figura 12 apresenta os cenários, que apesar de distintos, não modificam o resultado. Este exemplo mostra a importância de uma base de dados elaborada com cuidado para que seja o resultado seja imparcial e assertivo.

Como já comentado anteriormente, a atribuição de pesos não é uma tarefa fácil, podendo ocorrer divergência em relação aos tomadores de decisão e o resultado da média entre eles pode não demonstrar a diversidade de opiniões.

De acordo com o analisado, diferentes cenários podem gerar resultados distintos. Por consequência, a atribuição de pesos pode ser bastante sensível e uma alternativa pode ser modificada, por exemplo por uma mudança no grupo dos tomadores de decisão. Portanto, quantificar os pesos pode ser uma tarefa difícil e altamente subjetiva. Daí a necessidade de encontrar ferramentas que não utilizem atribuição de pesos para os critérios.

5.3. Outros métodos MCDA aplicados ao Campo de Brent

O relatório da Shell inclui recomendações detalhadas para descomissionar as quatro plataformas e a infraestrutura submarina do campo Brent. Essas recomendações são os resultados de mais de 10 anos de estudos de engenharia, contribuições de especialistas, consultas e avaliações científicas, e contém extensas discussões com mais de 180 organizações, incluindo organizações não-governamentais, acadêmicos, pescadores e comunidades locais. Esse programa de consulta abrangente reflete uma das principais lições aprendidas com o descomissionamento, além de uma base de dados mais consolidada. Portanto, usaremos o campo de Brent e o duto PL002/N040 para as análises desta seção.

Para fazer a comparação foi escolhido o método AHP, método compensatório que faz comparações par a par e permite encontrar resultados parciais, utiliza pesos e possibilita incluir o método de arrependimento nos cálculos parciais a título de comparação ao método proposto. O outro método escolhido foi o PROMETHEE, método não-compensatório, que também utiliza comparação aos pares e atribui pesos aos critérios. Além disso, permite utilizar indiferença, preferência e função de preferência, em contraste com o resultado do método compensatório. Neste exemplo, os critérios foram considerados independentes.

Como os métodos escolhidos não se caracterizam para uma problemática ($P.\alpha$) de escolha, um ponto para estudo futuro é fazer uma investigação de ordem.

5.3.1 AHP

O método AHP se baseia nas comparações par a par dos elementos em relação ao nível hierárquico superior. É necessário fornecer a importância relativa de cada critério e subcritério. Normalmente, a escala de SAATY (1990) varia o grau de importância de 1 a 9. Para esta dissertação serão utilizados valores qualitativos, os mesmos valores julgados para cada subcritério no experimento numérico de Brent PL 002/N201 (Tabela 6).

As atribuições dos pesos para os critérios são definidas pelos tomadores de decisão. O peso indica a importância de um critério em relação aos demais. Quanto maior o valor, maior a importância.

Para este exemplo, a importância entre os critérios é a mesma. Já dentre os subcritérios relativos a um dado critério, os pesos são divididos igualmente. É criada uma matriz para cada subcritério e são calculados os autovetores, também chamados de prioridade média local. Os resultados dessa etapa atribuem valores de desempenho (escores) em uma escala de 0 a 1. Esses valores são multiplicados pelos pesos dos subcritérios, e o resultado é mostrado na Tabela 26 a seguir.

Tabela 26: Resultado parcial do AHP.

Alternativas	Segurança	Meio Ambiente	Técnico	Social	Econômico
a ₂	0,132	0,168	0,187	0,083	0,248
a ₃	0,132	0,174	0,204	0,070	0,311
a ₄	0,177	0,161	0,163	0,184	0,155
a ₅	0,187	0,159	0,204	0,153	0,178
a ₆	0,193	0,175	0,171	0,222	0,066
a ₇	0,178	0,163	0,071	0,277	0,043

Com a tabela parcial dos resultados, o próximo passo é a multiplicação desta pelos pesos dos critérios, que neste exemplo são iguais. O resultado é mostrado na Tabela 27.

Tabela 27: Resultado do método AHP com mesmo peso entre os critérios.

a ₂	0,164
a ₃	0,178
a ₄	0,168
a ₅	0,176
a ₆	0,165
a ₇	0,147

Com o resultado apresentado na Tabela 27, a opção de preferência do descomissionamento é a de maior valor, isto é, a alternativa a₃ – “Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas”.

Utilizando ainda o AHP, porém com os mesmos pesos entre os subcritérios, isto é, 8,33% para cada um dos 12 subcritérios e calculando da mesma maneira que o exemplo anterior, o resultado é coincidentemente o mesmo, a alternativa a₃ – “Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas”.

O método AHP com arrependimento é inicialmente similar ao anterior, mas agora dispensam os pesos e utilizando medidas de arrependimento, como na análise por cadeia de Markov. Utilizamos a estrutura do AHP e as preferências relativas a cada subcritério, o que nos permite calcular os arrependimentos de forma similar à Eq. (7), porém substituindo as probabilidades de longo prazo pelos *scores* do AHP. Com isso, não é necessário utilizar pesos para a análise multicritério. O resultado final do AHP junto a análise de arrependimento é mostrado na Tabela 28.

Tabela 28: Resultado do AHP e método de arrependimento.

a ₂	0,60385
a ₃	0,375148
a ₄	0,291694
a ₅	0,333421
a ₆	0,245031
a ₇	0,267698

A alternativa escolhida com o método AHP em combinação com o método de arrependimento é a opção alternativa a_6 – “Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação”.

A diferença entre esta combinação e a do experimento numérico é que a cadeia de Markov analisa as incertezas dos dados de entrada naturalmente, já o AHP faz somente uma média aritmética entre os valores julgados para cada alternativa.

5.3.2 PROMETHEE

Já no método PROMETHEE, foram utilizados os mesmos pesos para cada critério, ou seja, os subcritérios com pesos diferentes. Além disso, foram utilizados os mesmos dados de entrada com seis alternativas e as funções de preferência utilizadas foram V-shape, usual e linear, como mostrado na Figura 13.

Cenário 1	Risco de Seg...	Risco de seg...	Risco de seg...	Impactos Am...	Legado dos i...	Uso da Ener...	Emissão de ...	Viabilidade T...	Efeito na pe...	Emprego	Impacto nas ...	Custo
Unit	PPV	PPV	PPV	Nota	Nota	GJ	tCO2	Nota	GBP	HH	Nota	mGBP
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences												
Min/Max	min	min	min	max	max	min	min	max	max	max	max	min
Weight	6,67	6,67	6,67	5,00	5,00	5,00	5,00	20,00	6,67	6,67	6,67	20,00
Preference Fn.	V-shape	V-shape	V-shape	Usual	Usual	Linear	Linear	Usual	Linear	Usual	Usual	Linear
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,5	0,5	n/a	0,5	n/a	n/a	0,5000
- P: Preference	15,0000	30,0000	2,0000	n/a	n/a	2,5	2,5	n/a	2,5	n/a	n/a	2,5000
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics												
Minimum	0,0016	0,0012	0,0012	0,8500	0,9000	20867,5	1568,3	0,3500	0,0	3,2	0,9463	0,3400
Maximum	0,0043	0,0938	0,0012	0,9900	1,0000	27823,3	2195,2	1,0000	228344,2	31,8	0,9955	7,7500
Average	0,0024	0,0299	0,0012	0,9317	0,9667	24345,4	1881,7	0,8183	144733,3	12,7	0,9791	3,0400
Standard Dev.	0,0009	0,0405	0,0000	0,0478	0,0373	2008,0	181,0	0,2223	103569,9	9,9	0,0232	2,5708
Evaluations												
1	0,0016	0,0800	0,0012	0,9900	0,9500	24345,4	1881,7	0,9200	0,0	6,3	0,9955	0,3400
2	0,0016	0,0938	0,0012	0,9800	0,9500	20867,5	1881,7	1,0000	0,0	3,2	0,9955	1,0700
3	0,0024	0,0016	0,0012	0,9100	1,0000	24345,4	2195,2	0,8000	228344,2	9,5	0,9955	2,1400
4	0,0020	0,0016	0,0012	0,8500	0,9000	24345,4	1881,7	1,0000	183367,3	6,3	0,9955	1,8700
5	0,0028	0,0012	0,0012	0,9100	1,0000	24345,4	1568,3	0,8400	228344,2	19,1	0,9463	5,0700
6	0,0043	0,0012	0,0012	0,9500	1,0000	27823,3	1881,7	0,3500	228344,2	31,8	0,9463	7,7500

Figura 13: Software VISUAL PROMETHEE com dados do campo de Brent.

O resultado do método PROMETHEE, utilizando pesos iguais, é mostrado na Tabela 29 abaixo:

Tabela 29: Resultado do PROMETHEE para pesos iguais entre os critérios.

Alternativas	ϕ_+	ϕ_-	ϕ
a ₂	0,37	0,22	0,15
a ₃	0,39	0,17	0,22
a ₄	0,28	0,31	-0,04
a ₅	0,33	0,23	0,10
a ₆	0,31	0,39	-0,07
a ₇	0,18	0,53	-0,36

A alternativa com a melhor pontuação foi a₃- “Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas”.

Utilizando o mesmo peso para todos os subcritérios do PROMETHEE, com os mesmos dados do exemplo acima, a alternativa escolhida permaneceu a alternativa a₃- “Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas”, como mostrado na Tabela 30.

Tabela 30: Resultado do PROMETHEE para pesos iguais entre os subcritérios.

Alternativas	ϕ_+	ϕ_-	ϕ
a ₂	0,29	0,23	0,05
a ₃	0,32	0,24	0,09
a ₄	0,27	0,27	0,00
a ₅	0,22	0,31	-0,09
a ₆	0,33	0,27	0,07

a7	0,25	0,37	-0,12
----	------	------	-------

É importante notar que os métodos que usaram arrependimento (minimax) obtiveram a mesma opção. Da mesma maneira, o método PROMETHEE e o método AHP produziram o mesmo resultado com os mesmos pesos. A Tabela 31 resume os métodos comparativos e os resultados encontrados.

Tabela 31: Resumo dos métodos comparativos.

Método	Alternativa
Cadeia de Markov e método de arrependimento	Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação
Avaliação Comparativa	Desconectar da plataforma e da estrutura submarina, cobrir com rochas todo o comprimento da linha
PROMETHEE com o mesmo peso entre critérios	Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas
PROMETHEE com o mesmo peso entre subcritérios	Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas
AHP com o mesmo peso entre critérios	Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas;
AHP com o mesmo peso entre subcritérios	Manter conectado à plataforma e cobrir a extremidade com rochas;
AHP e método de arrependimento	Remover todo o comprimento do duto por corte e elevação

Observa-se a variabilidade dos resultados apresentados de acordo com o método utilizado e a sensibilidade dos pesos. Como já comentado, há uma dificuldade de julgar os pesos dos critérios sem tomar uma decisão tendenciosa, além disso, tomadores de decisão, por vezes, optam por alternativas que sejam mais baratas, como identificado no caso de Brent. Isso mostra a importância de um método que não utilize parâmetros subjetivos.

Portanto, o método de arrependimento mostra ser mais robusto por não depender dos valores de pesos. Além disso é composto por um modelo estocástico, no qual as variações são naturalmente modeladas.

6. CONCLUSÃO

Existem muitos métodos multicritérios na literatura. Estes avaliam as alternativas de forma diferente, mas a maioria deles utilizam pesos para avaliar os critérios e fazer a escolha da alternativa; atribuir pesos, entretanto, é uma tarefa difícil e por vezes muito subjetiva e sujeita a vieses.

A análise de vários critérios também pode ser comprometida pelo excesso de parâmetros específicos que devem ser incluídos nos métodos. Além disso, normalmente há uma imprecisão em relação à análise dos dados de entrada, sem tratamento eficaz das incertezas, não trazendo a robustez necessária para o resultado final.

Dada a necessidade de uma ferramenta para avaliar o efeito estocástico das preferências dos tomadores de decisão e melhorar a transparência, o presente estudo discute um método estocástico para fazer a escolha mais adequada sob uma estrutura apropriada de MCDA sob incerteza. Propusemos uma estrutura que utiliza a cadeia de Markov em tempo contínuo com o método de arrependimento, com intuito de minimizar o arrependimento máximo da escolha.

Diferentemente do que já foi desenvolvido para a análise multicritério, esse método trata a incerteza dos dados naturalmente e não há necessidade de julgar pesos para os critérios. Por ser projetado para uma prática estocástica, fornece uma ferramenta para decisão sob incerteza que não requer calibração adicional e também pode ser aplicada a modelos determinísticos.

Para ilustrar a aplicabilidade do método em casos reais, três experimentos de descomissionamento de dutos submarinos foram selecionados: dois no campo Brent, localizado na Bacia do Leste de Shetland, no Mar do Norte, operado pela Shell e um no campo de Cação, no Brasil, operado pela Petrobras. Cada campo tem características próprias de suas áreas em descomissionamento.

Diferentemente dos métodos aplicados em outros trabalhos, o método proposto é um método robusto, que aborda as incertezas dos dados e dispensa a necessidade de intervenções humanas para atribuir pesos aos critérios, evitando assim viés em alguma área e manipulação de dados de entrada, tais como funções de preferência. O método

proposto foi comparado a métodos clássicos da literatura, todos eles desenvolvidos para tratar problemas puramente determinísticos.

Considerando o cenário de descomissionamento *offshore* no Brasil, percebe-se um desafio para o país nos próximos anos, pois envolve a desativação de campos com lâminas d'água cada vez mais profundas. Apesar de muitos estudos estarem em desenvolvimento, ainda é uma atividade relativamente nova e com ambiente regulatório em evolução.

Cabe ressaltar que simplificações e restrições foram feitas no decorrer do trabalho. Sugere-se para trabalhos futuros discutir a interdependência entre critérios e as alternativas. Além disso, é importância gerar mais dados e experimentos para fomentar a pesquisa futura.

Outro ponto que pode ser trabalhado é o desenvolvimento de um software baseado na metodologia descrita para a análise multicritério, já que são utilizados softwares diferentes para implementação do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, E.; COLOMER, M.; VITTO, W. A. C.; NUNES, L.; BOTELHO, F.; COSTA, F.; FILGUEIRAS, R. Regulação do descomissionamento e seus impactos para a competitividade do upstream no Brasil. Ciclo de Debates sobre Petróleo e Economia, 2017.

ANP. Anuário Estatístico. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5809-anuario-estatistico-2020>. Acesso em: 01/08/2020a.

ANP. Descomissionamento de instalações. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/descomissionamento-de-instalacoes>. Acesso em: 05/08/2020b.

BELL, D. E. Regret in decision making under uncertainty. *Operations research*, v. 30, n. 5, p. 961-981, 1982.

BENÍTEZ, J., CARPITELLA, S., CERTA, A., & IZQUIERDO, J. Management of uncertain pairwise comparisons in AHP through probabilistic concepts. *Applied Soft Computing*, 78, 274-285. 2019.

BERGER, J. O. Prior information and subjective probability. In: *Statistical decision theory and Bayesian analysis*. Springer, 1985. p. 74–117. 1985.

BEYNON, M. DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 140, n. 1, p. 148–164, 2002.

BG Group. Atlantic & Cromarty fields - Decommissioning programmes and comparative assessment report. Technical Report. Aberdeen, UK: BG Group. 2016.

BRANS, J.; MARESCHAL, B. Promethee-Gaia: une methodologie d'aide à la décision en presence de critères multiples. Éditions de l'Université de Bruxelles Bruxelles, 2002.

BRANS, J.; MARESCHAL, B. Promethee methods. In: *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. New York: Springer New York. p. 163–186. 2005.

BRANS, J.; VINCKE, P. A preference ranking organisation method: (the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). *Management Science, INFORMS*, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985.

BRÉMAUD, P. Gibbs fields Monte Carlo simulation, and queues. New York: Springer-Verlag, 1999.

BRIGGS, A.; SCULPHER, M. An introduction to Markov modelling for economic evaluation. *Pharmacoeconomics*, v. 13, n. 4, p. 397-409, 1998.

BSEE. Bureau of Safety and Environmental Enforcement. Disponível em: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/boem-decomm-guide-4-2-19.pdf>.

BURGERS, L. T.; REDEKOP, W. K.; AL, M. J.; LHACHIMI, S. K.; ARMSTRONG, N.; WALKER, S.; SEVERENS, J. L. Cost-effectiveness analysis of new generation coronary CT scanners for difficult-to-image patients. *The European Journal of Health Economics*, 18(6), 731-742. 2017.

CARNERO, M. C.; GOMEZ, A. Optimization of maintenance in production and storage systems for domestic water. *Water Resources Management*, Springer, v. 32, n. 1, p. 359–380, 2018.

CARNERO, M. C.; GOMEZ, A. A multicriteria decision making approach applied to improving maintenance policies in healthcare organizations. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, Springer, v. 16, n. 1, p. 47, 2016.

CHAKHAR, S.; MOUSSEAU, V. GIS-based multicriteria spatial modeling generic framework. *International Journal of Geographical Information Science*, Taylor & Francis, v. 22, n. 11-12, p. 1159–1196, 2008.

CHEN, Y.; YU, J.; SHAHBAZ, K.; XEVI, E. A GIS-based sensitivity analysis of multicriteria weights. In *Proceedings of the 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia* (pp. 13-17). 2009,

CHOO, E. U.; SCHONER, B.; WEDLEY, W. C. Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 37, n. 3, p. 527–541, 1999.

CHU, B. K.; MARGARET, J. T.; SATO, R. R.; & READ, E. L. Markov State Models of gene regulatory networks. *BMC systems biology*, 11(1), 1-17. 2017.

CNRI. Murchison decommissioning - comparative assessment report. Technical report. MURDECOM-CNR-PM-REP. CNR Int., 00225. <http://www.cnri-northsea-decom.com/Comparative-Assessment.pdf>. 2013.

COSTA, C. A. B. A multicriteria decision aid methodology to deal with conflicting situations on the weights. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 22–34, 1986.

ĆWIK, M.; JÓZEFCZYK, J. Heuristic algorithms for the minmax regret flow-shop problem with interval processing times. *Central European journal of operations research*, v. 26, n. 1, p. 215-238, 2018.

DE GRAAFF, B., NEIL, A., SI, L., YEE, K. C., SANDERSON, K., GURRIN, L., & PALMER, A. J.. Cost-effectiveness of different population screening strategies for hereditary haemochromatosis in Australia. *Applied health economics and health policy*, v. 15, n. 4, p. 521-534, 2017.

DECC, Decommissioning of *Offshore* Oil and Gas Installations and Pipelines Under the Petroleum Act 1998, Guidance Notes. Department of Energy and Climate Change, Aberdeen, UK, 2011.

DESPOTIS, D. K. Fractional minmax goal programming: A unified approach to priority estimation and preference analysis in MCDM. *Journal of the Operational Research Society*, v. 47, n. 8, p. 989-999, 1996.

DIAS, L. C.; CLÍMACO, J. N. Additive aggregation with variable interdependent parameters: The VIP analysis software. *Journal of the Operational Research Society*, Taylor & Francis, v. 51, n. 9, p. 1070–1082, 2000.

DNV-GL. JIP - Guidelines for Risk-Based Comparative Assessment of Options for Decommissioning of Subsea Installations in Brazil. n. 116C9AFX-9, p. 135, 2018.

DURBACH, I. N., STEWART, T. J. Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 223, n. 1, p. 1–14, 2012.

EDWARDS, W., NEWMAN, J. R. Multiattribute evaluation. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

EMMERICH, M. T. M., DEUTZ, A. H. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. *Natural computing*, Springer, v. 17, n. 3, p. 585–609, 2018.

EUM, Y. S., PARK, K. S., KIM, S. H. Establishing dominance and potential optimality in multi-criteria analysis with imprecise weight and value. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 28, n. 5, p. 397–409, 2001.

FAIRFIELD FAGUS LIMITED. Osprey pipelines and structures decommissioning programmes (DP2) - Non-Degoration. p. 66, 2017.

FAM, M. L.; KONOVESSIS, D.; ONG, L. S.; TAN, H. K. A review of *offshore* decommissioning regulations in five countries – Strengths and weaknesses. *Ocean Engineering*, v. 160, 244–263, 2018.

FISHBURN, P. C. Letter to the editor—additive utilities with incomplete product sets: application to priorities and assignments. *Operations Research*, INFORMS, v. 15, n. 3, p. 537–542, 1967.

GARG, H. New exponential operational laws and their aggregation operators for interval-valued Pythagorean fuzzy multicriteria decision-making. *International Journal of Intelligent Systems*, Wiley Online Library, v. 33, n. 3, p. 653–683, 2018.

GOMES, C. F. S., COSTA, H. G. Aplicação de métodos multicritério ao problema de escolha de modelos de pagamento eletrônico por cartão de crédito. *Production*, 25(1), 54–68. 2015.

GRECO, S., MATARAZZO, B., SŁOWIŃSKI, R. Decision Rule Approach. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 507–555). Springer, New York, NY. 2005.

HAHN, E. D. Decision making with uncertain judgments: a stochastic formulation of the analytic hierarchy process. *Decision Sciences*, Wiley Online Library, v. 34, n. 3, p. 443–466, 2003.

HAMER, C. E.; HALBERT, B. E.; WEBSTER, M.; SCHARER, J. M.. Assessment of model adequacy and parameter identifiability for predicting contaminant transport in the Beaverlodge Lake area, Canada. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v.

164, p. 159-170, 2012.

HAMZAH, B. A. International rules on decommissioning of *offshore* installations : some observations. v. 27, p. 339–348, 2003.

HANAWAL, M. K.; LIU, H.; ZHU, H.; PASCHALIDIS, I. Learning Policies for Markov Decision Processes from Data. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018.

HAWKINS, N., SCULPHER, M., EPSTEIN, D. Cost-effectiveness analysis of treatments for chronic disease: using R to incorporate time dependency of treatment response. Medical Decision Making, v. 25, n. 5, p. 511-519, 2005.

HEFFRON, R.J.; Energy law for decommissioning in the energy sector in the 21st century, The Journal of World Energy Law & Business, Volume 11, Issue 3, Pages 189–195, June 2018.

HEMAM, S. M., HIOUAL, Q. Load balancing issue in cloud services selection by using MCDA and Markov Chain model approaches. In: IEEE. 2016 2nd International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech). p. 163–169. 2016.

HENRION, M., BROCK B., SURYA S. multi-attribute decision analysis for decommissioning *offshore* oil and gas platforms." Integrated environmental assessment and management 11 (4): 594 609. 2015.

HODGETT, R. E.; SIRAJ, S. SURE: a method for decision-making under uncertainty. Expert Systems with Applications, Elsevier, v. 115, p. 684–694, 2019.

HWANG, C.; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. In: Multiple attribute decision making. Springer, p. 58–191. 1981

HYDE, K., MAIER, H. R., COLBY, C. Incorporating uncertainty in the PROMETHEE MCDA method. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Wiley Online Library, v. 12, n. 4-5, p. 245–259, 2005.

IHS Markit. Decommissioning of Aging *Offshore* Oil and Gas Facilities Increasing Significantly, with Annual Spending Rising to \$13 Billion by 2040, IHS Markit Says. Fonte: IHS: <http://news.ihsmarkit.com/press-release/energy-power-media/decommissioning-aging-offshore-oil-and-gas-facilities-increasing-si>. 2016.

INEOS. Windermere Decommissioning Project Comparative Assessment. Technical Report April. UK: INEOS UK SNS Limited. 2018.

ITHACA ENERGY. Jacky Decommissioning Pipelines and Power Cable Comparative Assessment. Technical Report February, UK: Ithaca Energy (UK) Limited. 2018.

IVANOV, D., DOLGUI, A; SOKOLOV, B; WERNER, F. Schedule robustness analysis with the help of attainable sets in continuous flow problem under capacity disruptions, International Journal of Production Research, 54:11, 3397-3413. 2016.

JAFARI, M., MAJEDI, H., MONAVARI, S. M., ALESHEIKH, A. A., & ZARKESH, M. K. Dynamic simulation of urban expansion through a CA-Markov model case study:

Hyrcanian region, Gilan, Iran. *European Journal of Remote Sensing*, v. 49, n. 1, p. 513-529, 2016.

JAHANSHAHLOO, G. R.; LOTFI, F. H.; IZADIKHAH, M. Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, v. 181, n. 2, p. 1544–1551, 2006.

JAVID, N., KHALILI-DAMGHANI, K., MAKUI, A., & ABDI, F. Multi-objective flexibility-complexity trade-off problem in batch production systems using fuzzy goal programming. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 148, p. 113266, 2020.

JEONG, K. S., CHOI, B. S., MOON, J. K., HYUN, D. J., KIM; G. H., KIM, T. H., LEE, J. J. Relative evaluation on decommissioning accident scenarios of nuclear facilities." *Annals of Nuclear Energy* 50: 268{270. 2012.

KACEM, I., KELLERER, H. Complexity results for common due date scheduling problems with interval data and minmax regret criterion. *Discrete Applied Mathematics*, v. 264, p. 76-89, 2019.

KEENEY, R., RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

KIRYTOPOULOS, K., VOULGARIDOU, D., PLATIS, A., & LEOPOULOS, V. An effective Markov based approach for calculating the limit matrix in the analytic network process. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 214, n. 1, p. 85–90, 2011.

KOSAREVA, N., KRYLOVAS, A., ZAVADSKAS, E. K. Statistical analysis of MCDM data normalization methods using Monte Carlo approach. The case of ternary estimates matrix. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 2018.

KUMAR, A., SAH, B., SINGH, A. R., DENG, Y., HE, X., KUMAR, P., BANSAL, R. C. A review of multi criteria decision making (mcdm) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 69, p. 596–609, 2017.

KUZMANOVSKA, I. Parameter inference for stochastic single-cell dynamics from lineage tree data. *BMC systems biology*, v. 11, n. 1, p. 52, 2017.

LAHDELMA, R., SALMINEN, P. Stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). In: *Trends in multiple criteria decision analysis*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 285–315.

LEGROS, B., JOUINI, O., KOOLE, G. A uniformization approach for the dynamic control of queueing systems with abandonments. *Operations Research*, v. 66, n. 1, p. 200-209, 2017.

LEYVA-LOPEZ, J. C. Interpretation and Generalization of Regret Theory on MCDA. In: *2007 International Conference on Service Systems and Service Management*. IEEE, p. 1-6. 2007.

LI, M., Y. LIU, M. PENG, C. XIE, AND L. YANG. The decision making method of task arrangement based on analytic hierarchy process for nuclear safety in radiation field."

Progress in Nuclear Energy 93: 318-326. 2016.

LOPES, Y. G., ALMEIDA, A. T. PROMETHEE-S: um método de sobreclassificação para apoio multicritério a decisão em situação de incerteza. *XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Salvador*, 525-536. 2014.

LU, Q., JOYCE, J., IMEN, S., & CHANG, N. B. Linking socioeconomic development, sea level rise, and climate change impacts on urban growth in New York City with a fuzzy cellular automata-based Markov chain model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 46, n. 3, p. 551-572, 2019.

LYU, H. M., ZHOU, W. H., SHEN, S. L., & ZHOU, A. N. Inundation risk assessment of metro system using AHP and tfn-ahp in shenzhen. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, v. 56, p. 102103, 2020.

MACHARIS, C., BERNARDINI, A. Reviewing the use of multi-criteria decision analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach. *Transport policy*, Elsevier, v. 37, p. 177–186, 2015.

MADANI, K., LUND, J. R. A Monte-Carlo game theoretic approach for multi-criteria decision making under uncertainty. *Advances in water resources*, Elsevier, v. 34, n. 5, p. 607–616, 2011.

MARATHON OIL. DUNN, LOUISA, CHRIS WICKS, AND DAVID WILSON. East Brae Sub-Structure Comparative Assessment. Technical Report. Marathon Oil. 2017.

MARDANI, A., JUSOH, A., NOR, K., KHALIFAH, Z., ZAKWAN, N., & VALIPOUR, A. Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, v. 28, n. 1, p. 516–571, 2015.

MARESCHAL, M. Weight stability intervals in multicriteria decision aid. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 54–64, 1988.

MARTINS, F. C. O Descomissionamento De Estruturas De Produção *Offshore* No Brasil. Departamento De Engenharia Ambiental. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental. 2015.

MARTINS, I. D., BAHIENSE, L., INFANTE, C. E., ARRUDA, E. F. Dimensionality reduction for multi-criteria problems: An application to the decommissioning of oil and gas installations. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 148, p. 113236, 2020a.

MARTINS, I. D.; MORAES, F. F.; TÁVORA, G., SOARES, H. L. F.; INFANTE, C. E.; ARRUDA, E. F.; BAHIENSE, L.; CAPRACE, J.; LOURENÇO, M. I. A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems. *Ocean & Coastal Management*, Elsevier, v. 184, p. 105000, 2020b.

MARTINS, V. B. *Metodologia Baseada em Sistemas de Informação Geográfica e Análise Multicritério para a Seleção de Áreas para a Construção de um Repositório para o Combustível Nuclear Usado* (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear)., Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro). 2009.

- MEIER, J., DIETZ, A., BOEHM, A., NEUMUTH, T. Predicting treatment process steps from events. *Journal of biomedical informatics*, v. 53, p. 308-319, 2015.
- MONDAL, B., DAS, D. N., BHATTA, B. Integrating cellular automata and Markov techniques to generate urban development potential surface: a study on Kolkata agglomeration. *Geocarto international*, v. 32, n. 4, p. 401-419, 2017.
- MONTIBELLER, G., PATEL, P., VICTOR, J. A critical analysis of multi-criteria models for the prioritisation of health threats. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 281, n. 1, p. 87–99, 2020.
- MOSADEGHI, R., WARNKEN, J., TOMLINSON, R., & MIRFENDERESK, H. Uncertainty analysis in the application of multi-criteria decision-making methods in australian strategic environmental decisions. *Journal of Environmental Planning and Management*, Taylor & Francis, v. 56, n. 8, p. 1097–1124, 2013.
- MOSALAM, K. M., ALIBRANDI, U., LEE, H., & ARMENGOU, J. Performance-based engineering and multi-criteria decision analysis for sustainable and resilient building design. *Structural Safety*, Elsevier, v. 74, p. 1–13, 2018.
- MURRAY, F., NEEDHAM, K., GORMLEY, K., ROUSE, S., COOLEN, J. W., BILLET, D., FERRIS, J. S.. Data challenges and opportunities for environmental management of North Sea oil and gas decommissioning in an era of blue growth. *Marine Policy*, n. May, p. 0–1, 2018.
- NA, K. L., LEE, H. E., LIEW, M. S., & ZAWAWI, N. W. A. An expert knowledge based decommissioning alternative selection system for fixed oil and gas assets in the South China Sea. *Ocean Engineering* 130: 645{658. 2017.
- NAWAZ, F., ASADABADI, M. R., JANJUA, N. K., HUSSAIN, O. K., CHANG, E., & SABERI, M. An MCDM method for cloud service selection using a Markov chain and the best-worst method. *Knowledge-Based Systems*, Elsevier, v. 159, p. 120–131, 2018.
- OIL & GAS UK. Decommissioning insight 2017. 2017.
- OIL & GAS UK. Guidelines for Comparative Assessment in Decommissioning Programmes. UK Oil and Gas Industry Association Limited. 2015.
- PEREIRA, F. A. P. Metodologia de análise econômica de projetos de óleo e gás. Monografia, Engenharia de Produção - Escola de Engenharia, UFRJ: Rio de Janeiro. 2004.
- PEREIRA, J. The robust (minmax regret) assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & Operations Research*, v. 93, p. 27-40, 2018.
- PERENCO, T. Thames Area Decommissioning Environmental Impact Assessment. Technical Report. Perenco UK Limited & Tullow Oil SK Limited, London. 2014.
- PETROBRAS. Plataformas de Cação (PCA – 1, 2, 3) Bacia do Espírito Santo. Projeto de desativação consolidado. Volume Único. 2018.
- POSKAS, G., POSKAS, P., & SIMONIS, A. Analysis of radwaste management

alternatives during dismantling of Ignalina NPP systems with low level contamination. *Kerntechnik*, 78(6), 477-483. 2013.

PPSA. Empresa Brasileira De Administração De Petróleo E Gás Natural S.A. Características. Disponível em: <https://www.presalpetroleo.gov.br/ppsa/o-presal/caracteristicas>. Acesso em: 11/08/2020.

RAJU, K. S., KUMAR, D. N. Ranking irrigation planning alternatives using data envelopment analysis. *Water Resources Management*, v. 20, n. 4, p. 553-566, 2006.

RAM, C., MONTIBELLER, G., MORTON, A. Extending the use of scenario planning and MCDA for the evaluation of strategic options, *Journal of the Operational Research Society*, 62:5, 817-829. 2011.

RICHTER, A. K., KLIMEK, L., MERK, H. F., MÜLLENEISEN, N., RENZ, H., WEHRMANN, W., WASEM, J. Impact of increasing treatment rates on cost-effectiveness of subcutaneous immunotherapy (SCIT) in respiratory allergy: a decision analytic modelling approach. *The European Journal of Health Economics*, p. 1-14, 2018.

ROMERO, C. A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research*, v. 153, n. 3, p. 675-686, 2004.

ROSZKOWSKA, E. Multi-criteria decision making models by applying the TOPSIS method to crisp and interval data. *Multiple Criteria Decision Making/University of Economics in Katowice*, v. 6, p. 200-230, 2011.

ROUSE, S., HAYES, P., DAVIES, I. M., & WILDING, T. A. *Offshore* pipeline decommissioning: scale and context. *Marine pollution bulletin*, 129(1), 241-244. 2018.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. In: *Readings in multiple criteria decision aid*. Springer, 1990. p. 155-183.

ROY, B., SKALKA, J.M. ELECTRE IS: Aspects methodologiques et guide d'utilisation. IN LAMSADE. Ed. Cahier du LAMSADE. Paris, Université de Paris-Dauphine. 1985.

ROY, BERNARD. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. No. BOOK. Economica, 1985.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, North-Holland, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SADIQ, R., TESFAMARIAM, S. Environmental decision-making under uncertainty using intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (IF-AHP). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Springer, v. 23, n. 1, p. 75-91, 2009.

SANTOS, L. F. D. Descomissionamento de sistemas *offshore* técnicas, potenciais problemas e riscos relacionados ao final da vida produtiva. Relatório de Projeto Final em Engenharia Naval - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica: Rio de Janeiro. 2011.

SCHETININ, V., JAKAITE, L., KRZANOWSKI, W. Bayesian averaging over Decision Tree models for trauma severity scoring. *Artificial intelligence in medicine*, v. 84, p. 139-

145, 2018.

SHELL. Brent Field Decommissioning: Comparative Assessment Procedure. Technical Report. Shell U. K. Limited. 2017.

SHEN, L., ZHU, J., ROBERT LI, S. Y., & FAN, X. Detect differentially methylated regions using non-homogeneous hidden Markov model for methylation array data. *Bioinformatics*, v. 33, n. 23, p. 3701-3708, 2017.

SINGH, S. K., LAARI, P. B., MUSTAK, S. K., SRIVASTAVA, P. K., & SZABÓ, S. Modelling of land use land cover change using earth observation data-sets of Tons River Basin, Madhya Pradesh, India. *Geocarto international*, v. 33, n. 11, p. 1202-1222, 2018.

SOMMER, B., FOWLER, A. M., MACREADIE, P. I., PALANDRO, D. A., AZIZ, A. C., & BOOTH, D. J.. Decommissioning of *offshore* oil and gas structures—Environmental opportunities and challenges. *Science of the total environment*, 658, 973-981. 2019.

SPIRIT ENERGY. Bains Decommissioning Comparative Assessment. Technical Report. Spirit Energy Limited. CEU-DCM-EIS0046-REP-0002. 2018.

STEWART, T. J. Dealing with uncertainties in MCDA. In: Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. [S.l.]: Springer, 2005. p. 445–466.

SUN, X., CAI, C., YANG, J., & SHEN, X. Route evaluation for unmanned aerial vehicle based on type-2 fuzzy sets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 39, p. 132-145, 2015.

TAVORA, G. S. Análise Estocástica De Decisão Multicritério Para Descomissionamento De Dutos Rígidos Submarinos. Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2019.

TERVONEN, T., LAHDELMA, R. Implement- ing stochastic multicriteria acceptability analysis. *European Journal of Op- erational Research*, Elsevier, v. 178, n. 2, p. 500–513, 2007.

TIAN, C., ZHANG, W. Y., ZHANG, S., & PENG, J. J. An extended single-valued neutrosophic projection-based qualitative flexible multi-criteria decision-making method. *Mathematics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 1, p. 39, 2019.

TZENG, G.H., SHIAU, T.A., LIN, C.Y. Application of multicriteria decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan. *Energy* 17 (10), 983–992. 1992.

VIEIRA, A. C. L.; OLIVEIRA, M. D.; BANA E COSTA, C. A. Enhancing knowledge construction processes within multicriteria decision analysis: the collaborative value modelling framework. *Omega*, Elsevier, p. 102047, 2019.

VINCKE, P. Multicriteria decision-aid. John Wiley & Sons, 1992.

WADDINGHAM, E., MT-ISA, S., NIXON, R., & ASHBY, D. A Bayesian approach to

probabilistic sensitivity analysis in structured benefit-risk assessment. *Biometrical Journal*, v. 58, n. 1, p. 28-42, 2016.

WALL, K. D.; CORREIA, C. A preference-based method for forecast combination. *Journal of Forecasting*, v. 8, n. 3, p. 269-292, 1989.

WANG, J., XIAO, B. A minmax regret price control model for managing perishable products with uncertain parameters. *European Journal of Operational Research*, v. 258, n. 2, p. 652-663, 2017.

YANG, X., YAN, L., ZENG, L. How to handle uncertainties in AHP: The cloud delphi hierarchical analysis. *Information Sciences, Elsevier*, v. 222, p. 384–404, 2013.

ZHOU, H.; WANG, J.-q.; ZHANG, H. Stochastic multicriteria decision-making approach based on smaa-electre with extended gray numbers. *International Transactions in Operational Research, Wiley Online Library*, v. 26, n. 5, p. 2032–2052, 2019.

ZHU, H., WANG, H., LUO, X., & QIAN, H. AN ONLINE LEARNING APPROACH TO WIRELESS COMPUTATION OFFLOADING. In: 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE. p. 678-682. 2018.

APÊNDICE I– MATRIZES DE TRANSIÇÃO – CAMPO DE BRENT PL002201

Neste apêndice encontram-se as matrizes de transição obtidas pela cadeia de Markov para cada subcritério do experimento numérico do campo de Brent para o duto PL002/N0201.

Tabela 32: Matriz de taxas de transição para o subcritério 1.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-3,41	1,00	0,67	0,80	0,57	0,37
a ₃	1,00	-3,41	0,67	0,80	0,57	0,37
a ₄	1,50	1,50	-5,62	1,20	0,86	0,56
a ₅	1,25	1,25	0,83	-4,51	0,71	0,47
a ₆	1,75	1,75	1,17	1,40	-6,72	0,65
a ₇	2,69	2,69	1,79	2,15	1,54	-10,85

Tabela 33: Matriz de taxas de transição para o subcritério 2.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-234,19	0,85	50,00	50,00	66,67	66,67
a ₃	1,17	-274,76	58,63	58,63	78,17	78,17
a ₄	0,02	0,02	-3,70	1,00	1,33	1,33
a ₅	0,02	0,02	1,00	-3,70	1,33	1,33
a ₆	0,02	0,01	0,75	0,75	-2,53	1,00
a ₇	0,02	0,01	0,75	0,75	1,00	-2,53

Tabela 34: Matriz de taxas de transição para o subcritério 3.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-5	1	1	1	1	1
a ₃	1	-5	1	1	1	1
a ₄	1	1	-5	1	1	1
a ₅	1	1	1	-5	1	1
a ₆	1	1	1	1	-5	1
a ₇	1	1	1	1	1	-5

Tabela 35: Matriz de taxas de transição para o subcritério 4.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-4,65	0,99	0,92	0,86	0,92	0,96
a ₃	1,01	-4,70	0,93	0,87	0,93	0,97
a ₄	1,09	1,08	-5,14	0,93	1,00	1,04
a ₅	1,16	1,15	1,07	-5,58	1,07	1,12
a ₆	1,09	1,08	1,00	0,93	-5,14	1,04
a ₇	1,04	1,03	0,96	0,89	0,96	-4,88

Tabela 36: Matriz de taxas de transição para o subcritério 5.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-5,11	1,00	1,05	0,95	1,05	1,05
a ₃	1,00	-5,11	1,05	0,95	1,05	1,05
a ₄	0,95	0,95	-4,80	0,90	1,00	1,00
a ₅	1,06	1,06	1,11	-5,44	1,11	1,11

a ₆	0,95	0,95	1,00	0,90	-4,80	1,00
a ₇	0,95	0,95	1,00	0,90	1,00	-4,80

Tabela 37: Matriz de taxas de transição para o subcritério 6.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-5,04	1,17	1,00	1,00	1,00	0,87
a ₃	0,86	-4,18	0,86	0,86	0,86	0,75
a ₄	1,00	1,17	-5,04	1,00	1,00	0,87
a ₅	1,00	1,17	1,00	-5,04	1,00	0,87
a ₆	1,00	1,17	1,00	1,00	-5,04	0,87
a ₇	1,14	1,33	1,14	1,14	1,14	-5,90

Tabela 38: Matriz de taxas de transição para o subcritério 7.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-5,06	1,00	0,86	1,00	1,20	1,00
a ₃	1,00	-5,06	0,86	1,00	1,20	1,00
a ₄	1,17	1,17	-6,07	1,17	1,40	1,17
a ₅	1,00	1,00	0,86	-5,06	1,20	1,00
a ₆	0,83	0,83	0,71	0,83	-4,05	0,83
a ₇	1,00	1,00	0,86	1,00	1,20	-5,06

Tabela 39: Matriz de taxas de transição para o subcritério 8.

Alternativas	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂	-4,34	1,09	0,87	1,09	0,91	0,38
a ₃	0,92	-3,91	0,80	1,00	0,84	0,35
a ₄	1,15	1,25	-5,14	1,25	1,05	0,44

a5	0,92	1,00	0,80	-3,91	0,84	0,35
a6	1,10	1,19	0,95	1,19	-4,85	0,42
a7	2,63	2,86	2,29	2,86	2,40	-13,03

Tabela 40: Matriz de taxas de transição para o subcritério 9.

Alternativas	a2	a3	a4	a5	a6	a7
a2	-54,14	1,00	13,34	13,12	13,34	13,34
a3	1,00	-54,14	13,34	13,12	13,34	13,34
a4	0,07	0,07	-3,13	0,98	1,00	1,00
a5	0,08	0,08	1,02	-3,20	1,02	1,02
a6	0,07	0,07	1,00	0,98	-3,13	1,00
a7	0,07	0,07	1,00	0,98	1,00	-3,13

Tabela 41: Matriz de taxas de transição para o subcritério 10.

Alternativas	a2	a3	a4	a5	a6	a7
a2	-11,00	0,50	1,50	1,00	3,00	5,00
a3	2,00	-23,04	3,01	2,00	6,01	10,02
a4	0,67	0,33	-7,00	0,67	2,00	3,33
a5	1,00	0,50	1,50	-11,00	3,00	5,00
a6	0,33	0,17	0,50	0,33	-3,00	1,67
a7	0,20	0,10	0,30	0,20	0,60	-1,40

Tabela 42: Matriz de taxas de transição para o subcritério 11.

Alternativas	a2	a3	a4	a5	a6	a7
a2	-4,90	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95
a3	1,00	-4,90	1,00	1,00	0,95	0,95

a4	1,00	1,00	-4,90	1,00	0,95	0,95
a5	1,00	1,00	1,00	-4,90	0,95	0,95
a6	1,05	1,05	1,05	1,05	-5,21	1,00
a7	1,05	1,05	1,05	1,05	1,00	-5,21

Tabela 43: Matriz de taxas de transição para o subcritério 12.

Alternativas	a2	a3	a4	a5	a6	a7
a2	-3,03	1,25	0,63	0,72	0,26	0,17
a3	0,80	-2,22	0,50	0,57	0,21	0,14
a4	1,60	2,00	-5,44	1,14	0,42	0,28
a5	1,40	1,75	0,87	-4,63	0,37	0,24
a6	3,78	4,74	2,37	2,71	-14,26	0,65
a7	5,78	7,24	3,62	4,14	1,53	-22,32

APÊNDICE II – MATRIZES DE TRANSIÇÃO – CAMPO DE BRENT

PL 047/N0404

Neste apêndice encontram-se as matrizes de transição obtidas pela cadeia de Markov para cada subcritério do experimento numérico do campo de Brent para o duto PL047/N0404.

Tabela 44: Matriz de taxas de transição para o subcritério 1.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-0,27	0,11	0,13	0,02	0,01
a ₄	9,00	-10,46	1,13	0,20	0,13
a ₅	8,00	0,89	-9,19	0,18	0,12
a ₆	45,00	5,00	5,63	-56,30	0,67
a ₇	67,00	7,44	8,38	1,49	-84,31

Tabela 45: Matriz de taxas de transição para o subcritério 2.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-4,24	1,06	1,06	1,06	1,06
a ₄	0,94	-3,95	1,00	1,00	1,00
a ₅	0,95	1,00	-3,95	1,00	1,00
a ₆	0,94	1,00	1,00	-3,94	1,00
a ₇	0,94	1,00	1,00	1,00	-3,94

Tabela 46: Matriz de taxas de transição para o subcritério 3.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-4,00	1,00	1,00	1,00	1,00
a ₄	1,00	-4,00	1,00	1,00	1,00
a ₅	1,00	1,00	-4,00	1,00	1,00
a ₆	1,00	1,00	1,00	-4,00	1,00
a ₇	1,00	1,00	1,00	1,00	-4,00

Tabela 47: Matriz de taxas de transição para o subcritério 4.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-3,45	0,85	0,77	0,91	0,92
a ₄	1,18	-4,24	0,91	1,07	1,08
a ₅	1,30	1,10	-4,78	1,18	1,19
a ₆	1,10	0,93	0,85	-3,89	1,01
a ₇	1,09	0,92	0,84	0,99	-3,84

Tabela 48: Matriz de taxas de transição para o subcritério 5.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-4,40	1,20	0,78	1,20	1,20
a ₄	0,83	-3,48	0,65	1,00	1,00
a ₅	1,28	1,54	-5,89	1,54	1,54
a ₆	0,83	1,00	0,65	-3,48	1,00
a ₇	0,83	1,00	0,65	1,00	-3,48

Tabela 49: Matriz de taxas de transição para o subcritério 6.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-3,41	0,86	0,78	0,86	0,91
a ₄	1,16	-4,11	0,91	0,99	1,05
a ₅	1,28	1,10	-4,64	1,10	1,16
a ₆	1,17	1,01	0,91	-4,15	1,06
a ₇	1,10	0,95	0,86	0,94	-3,85

Tabela 50: Matriz de taxas de transição para o subcritério 7.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-3,86	0,88	0,83	1,05	1,10
a ₄	1,14	-4,54	0,94	1,20	1,26
a ₅	1,21	1,06	-4,88	1,27	1,33
a ₆	0,95	0,83	0,78	-3,61	1,05
a ₇	0,91	0,79	0,75	0,95	-3,40

Tabela 51: Matriz de taxas de transição para o subcritério 8.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-3,02	0,80	1,00	0,87	0,35
a ₄	1,25	-4,03	1,25	1,09	0,44
a ₅	1,00	0,80	-3,02	0,87	0,35
a ₆	1,15	0,92	1,15	-3,62	0,40
a ₇	2,86	2,29	2,86	2,49	-10,49

Tabela 52: Matriz de taxas de transição para o subcritério 9.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-1079,599	284,105	227,284	284,105	284,105
a ₄	0,004	-2,804	0,800	1,000	1,000
a ₅	0,004	1,250	-3,754	1,250	1,250
a ₆	0,004	1,000	0,800	-2,804	1,000
a ₇	0,004	1,000	0,800	1,000	-2,804

Tabela 53: Matriz de taxas de transição para o subcritério 10.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-336,50	18,25	24,00	132,00	162,25
a ₄	0,05	-17,49	1,32	7,23	8,89
a ₅	0,04	0,76	-13,06	5,50	6,76
a ₆	0,01	0,14	0,18	-1,56	1,23
a ₇	0,01	0,11	0,15	0,81	-1,08

Tabela 54: Matriz de taxas de transição para o subcritério 11.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-3,78	0,99	0,99	0,90	0,90
a ₄	1,01	-3,83	1,00	0,91	0,91
a ₅	1,01	1,00	-3,83	0,91	0,91
a ₆	1,11	1,10	1,10	-4,31	1,00
a ₇	1,11	1,10	1,10	1,00	-4,31

Tabela 55: Matriz de taxas de transição para o subcritério 12.

Alternativas	a ₁	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₁	-0,10	0,05	0,04	0,01	0,01
a ₄	20,33	-21,34	0,76	0,14	0,11
a ₅	26,78	1,32	-28,43	0,18	0,15
a ₆	147,36	7,25	5,50	-160,93	0,81
a ₇	180,96	8,90	6,76	1,23	-197,85

APÊNDICE III – MATRIZES DE TRANSIÇÃO – CAMPO DE CAÇÃO

Neste apêndice encontram-se as matrizes de transição obtidas pela cadeia de Markov para cada subcritério do experimento numérico do campo de Cação.

Tabela 56: Matriz de taxas de transição para o subcritério 1.

Alternativas	b_1	b_2	b_3	b_4
b_1	-1,96	1,55	0,11	0,29
b_2	0,64	-0,90	0,07	0,19
b_3	8,88	13,79	-25,24	2,58
b_4	3,45	5,35	0,39	-9,18

Tabela 57: Matriz de taxas de transição para o subcritério 2.

Alternativas	b_1	b_2	b_3	b_4
b_1	-3,00	1,00	1,00	1,00
b_2	1,00	-3,00	1,00	1,00
b_3	1,00	1,00	-3,00	1,00
b_4	1,00	1,00	1,00	-3,00

Tabela 58: Matriz de taxas de transição para o subcritério 3.

Alternativas	b_1	b_2	b_3	b_4
b_1	-2,38	1,06	0,48	0,83
b_2	0,94	-2,18	0,46	0,79
b_3	2,07	2,20	-5,99	1,73
b_4	1,20	1,27	0,58	-3,05

Tabela 59: Matriz de taxas de transição para o subcritério 4.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-2,99	1,00	0,99	1,00
b ₂	1,00	-2,99	0,99	1,00
b ₃	1,01	1,01	-3,02	1,01
b ₄	1,00	1,00	0,99	-2,99

Tabela 60: Matriz de taxas de transição para o subcritério 5.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,59	0,94	0,33	-1,59
b ₂	1,06	-1,76	0,35	1,06
b ₃	3,03	2,85	-6,85	3,03
b ₄	3,10	2,91	1,02	3,10

Tabela 61: Matriz de taxas de transição para o subcritério 6.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,87	0,86	0,51	0,50
b ₂	1,16	-2,33	0,59	0,58
b ₃	1,98	1,70	-4,66	0,98
b ₄	2,01	1,73	1,02	-4,75

Tabela 62: Matriz de taxas de transição para o subcritério 7.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,95	0,65	0,74	0,56
b ₂	1,54	-3,55	1,14	0,87
b ₃	1,36	0,88	-3,00	0,76
b ₄	1,78	1,15	1,31	-4,24

Tabela 63: Matriz de taxas de transição para o subcritério 8.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,29	1,00	0,14	0,15
b ₂	1,00	-1,29	0,14	0,15
b ₃	7,10	7,10	-15,23	1,03
b ₄	6,89	6,89	0,97	-14,74

Tabela 64: Matriz de taxas de transição para o subcritério 9.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,17	0,50	0,30	0,37
b ₂	1,99	-3,33	0,60	0,73
b ₃	3,30	1,66	-6,18	1,22
b ₄	2,72	1,36	0,82	-4,90

Tabela 65: Matriz de taxas de transição para o subcritério 10.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-2,13	0,98	0,59	0,56
b ₂	1,02	-2,18	0,60	0,56
b ₃	1,69	1,66	-4,30	0,94

b ₄	1,80	1,77	1,06	-4,63
----------------	------	------	------	-------

Tabela 66: Matriz de taxas de transição para o subcritério 11.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-6,84	1,02	2,45	3,37
b ₂	0,98	-6,68	2,40	3,30
b ₃	0,41	0,42	-2,20	1,38
b ₄	0,30	0,30	0,73	-1,33

Tabela 67: Matriz de taxas de transição para o subcritério 12.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,80	0,92	0,29	0,59
b ₂	1,08	-2,03	0,31	0,64
b ₃	3,49	3,22	-8,76	2,05
b ₄	1,70	1,57	0,49	-3,76

Tabela 68: Matriz de taxas de transição para o subcritério 13.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-0,00230	0,00225	0,00003	0,00002
b ₂	444,49	-444,51	0,01	0,01
b ₃	36082,35	81,18	-36164,20	0,68
b ₄	53427,40	120,20	1,48	-53549,08

Tabela 69: Matriz de taxas de transição para o subcritério 14.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,80	0,63	0,47	0,70
b ₂	1,60	-3,47	0,75	1,12
b ₃	2,12	1,33	-4,94	1,49
b ₄	1,42	0,89	0,67	-2,98

Tabela 70: Matriz de taxas de transição para o subcritério 15.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,70	0,66	0,48	0,57
b ₂	1,52	-3,11	0,73	0,86
b ₃	2,09	1,38	-4,66	1,19
b ₄	1,76	1,16	0,84	-3,76

Tabela 71: Matriz de taxas de transição para o subcritério 16.

Alternativas	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
b ₁	-1,07	0,84	0,08	0,15
b ₂	1,19	-1,47	0,10	0,18
b ₃	12,56	10,51	-24,95	1,88
b ₄	6,67	5,58	0,53	-12,78