



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ROBERTA BARBOSA DA SILVA

**CONSTRUÇÃO DE MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA ESCOLHA
DE TECNOLOGIA NO SETOR DE PETRÓLEO**

Recife
2019

ROBERTA BARBOSA DA SILVA

**CONSTRUÇÃO DE MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA ESCOLHA
DE TECNOLOGIA NO SETOR DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves, CRB-4 / 1260

S586c Silva, Roberta Barbosa da.
Construção de modelo de decisão multicritério para escolha de tecnologia no
setor de petróleo / Roberta Barbosa da Silva. - 2019.
58 folhas, Il. e Tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
Inclui: Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Emissão de enxofre. 3. Decisão
multicritério. 4. FITradeoff. I. Almeida. Adiel Teixeira de (Orientador).
II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-177

ROBERTA BARBOSA DA SILVA

**CONSTRUÇÃO DE MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA ESCOLHA
DE TECNOLOGIA NO SETOR DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 21/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

.

Prof. PhD Adiel Teixeira De Almeida (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dra. Danielle Costa Moraes (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. PhD Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani (Examinadora Externo)
Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Lucio e Conceição, por todos os valores transmitidos, suporte e compreensão, que me fizeram chegar ao que sou hoje, pessoal e profissionalmente.

Agradeço ao meu orientador, Adiel Teixeira de Almeida, pelo aprendizado e oportunidades concedidas durante a pesquisa.

Agradeço ao meu irmão, David, por toda colaboração e disposição. Ao meu namorado pelo suporte e compreensão nos momentos difíceis. E aos meus companheiros de laboratório por todo apoio e por tornarem a rotina mais leve e divertida.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro proporcionado para a elaboração desta pesquisa.

RESUMO

A qualidade do meio ambiente tem sido uma preocupação frequente e assunto recorrente nos debates entre as grandes potências mundiais. Neste contexto, empresas e órgãos reguladores têm procurado e exigido processos e produtos que não sejam tão agressivos ao planeta. O petróleo possui grande influência na economia mundial desempenhando papel estratégico dentro da matriz energética. Este, no entanto, é um produto de origem fóssil, que contém uma série de poluentes prejudiciais ao ecossistema. A etapa de refino, fundamental na cadeia petrolífera, é grande geradora de poluentes, e por isso existem algumas normas que regulam as emissões provenientes deste processo. Desta maneira, este trabalho visa à construção de um modelo de decisão multicritério, tendo em vista a interdisciplinaridade e necessidade de atendimento a diversos objetivos, para estruturar o problema de escolha de tecnologia a ser utilizada em refinaria do nordeste brasileiro para abatimento de enxofre, buscando o atendimento às normas ambientais vigentes. O problema foi analisado pela perspectiva do coordenador de operações da empresa que teve a estrutura de preferências avaliada através do uso do método FITradeoff, que possibilita a análise do problema com o uso de informações parciais, diminuindo assim a taxa de inconsistências e tempo de resolução, fatores imprescindíveis dentro do meio organizacional. Ao final os resultados foram analisados, e algumas considerações foram feitas acerca da aplicação.

Palavras Chave: Petróleo. Emissão de enxofre. Decisão multicritério. FITradeoff.

ABSTRACT

As a recurrent issue nowadays, the environment sustainability has been a frequent concern among the most developed countries in the world. In this context, companies and regulatory authorities have sought processes and demanded cleaner products to avoid aggressive impacts to the planet. The petroleum has large impact in the world's economy and plays a strategic role in the global power matrix. However, this is a product of fossil origin, which contains many pollutants that can negatively impact the entire ecosystem. The refining stage, essential to the oil production chain, produces many harmful substances and therefore there are some regulations to control the emissions caused by this process. Due to the interdisciplinarity involved, and the need to meet the multiple objectives, this project presents the conception of a multicriteria decision model to structure the problem of choosing the best technology to reduce level of sulphur in the emissions of an Oil refinery in northeastern Brazil, seeking compliance with current environmental standards. The problem was analysed considering the perspective of the Operations Coordinator of the company, whose preference structure assessed by using the FITradeoff system, which allows the analysis of a multicriteria decision problem with partial information. This method of analysis enables to reduce the rate of inconsistencies and resolution time, both important elements in the organizational environment. At the end, the results were evaluated e some considerations were made about the application.

.
Keywords: Petroleum. Sulphur emissions. Multicriteria decision making. FITradeoff.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma do método FITradeoff	18
Figura 2 –	Ordenação das constantes de escala.....	19
Figura 3 –	Consequências hipotéticas no processo de elicitação de preferências do decisor.....	20
Figura 4 –	Consequências hipotéticas no processo de elicitação de preferências do decisor.....	21
Figura 5 –	Processo de refino do petróleo.....	31
Figura 6 –	Procedimento para resolução de um problema de decisão.....	33
Figura 7 –	Tela inicial FITradeoff Web-Based	40
Figura 8 –	Tela da ordenação das constantes de escala no SAD FITradeoff Web-Based.....	41
Figura 9 –	Etapas iniciais da ordenação das constantes de escala no SAD FITradeoff Web-Based.....	42
Figura 10 –	Etapas finais da ordenação das constantes de escala no SAD FITradeoff Web-Based.....	43
Figura 11 –	Exploração do espaço de consequências no SAD FITradeoff Web-Based.....	44
Figura 12 –	Visualização dos resultados parciais por meio de gráfico de barras no SAD FITradeoff Web-Based.....	46
Figura 13 –	Visualização dos resultados parciais por meio de gráfico de bolhas no SAD FITradeoff Web-Base.....	46
Figura 14 –	Visualização dos resultados parciais por meio de gráfico radar no SAD FITradeoff Web-Based.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Matriz de consequências de um problema multicritério.....	16
Tabela 2 –	Níveis conhecimento técnico.....	35
Tabela 3 –	Níveis de rentabilidade.....	36
Tabela 4 –	Resumo dos Critérios.....	36
Tabela 5 –	Matriz de consequência do problema.....	38
Tabela 6 –	Ordenação das constantes de escala.....	43
Tabela 7 –	Informação parcial a respeito das constantes de escala.....	45
Tabela 8 –	Espaço de possíveis valores para as constantes de escala.....	45
Tabela 9 –	Respostas da elicitación de preferências.....	47
Tabela 10 –	Solução do problema.....	48
Tabela 11 –	Espaço de pesos.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos.....	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.1	Decisão Multicritério.....	15
2.1.2	Método FITradeoff.....	17
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.2.1	Seleção de equipamentos no contexto multicritério	22
2.2.2	Relevância do controle de emissões atmosféricas no setor do petróleo	24
2.3	SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTE TRABALHO	26
3	MODELO PROPOSTO	28
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE DECISÃO	28
3.1.1	Caracterização da Refinaria analisada no estudo	30
3.1.2	Descrição do problema.....	32
3.2	MODELAGEM E ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA.....	32
3.2.1	Etapa 1 – Caracterizar decisor(es) e outros autores	33
3.2.2	Etapa 2 - Identificação dos objetivos	33
3.2.3	Etapa 3 – Estabelece critérios.....	34
3.2.4	Etapa 4 – Estabelecer espaço de ações e problemática	36
3.2.5	Etapa 5 – Identificar fatores não controlados.....	38
3.2.6	Etapa 6 – Efetuar modelagem de preferências	39
3.2.7	Etapa 7 – Efetuar avaliação intracritério.....	39
3.2.8	Etapa 8 – Efetuar avaliação intercritério.....	40
3.2.9	Etapa 9 – Avaliação das alternativas	45
3.2.10	Etapa 10 – Efetuar análise de sensibilidade.....	48
3.2.11	Etapa 11 – Analisar resultados e elaborar recomendação	48
3.2.12	Etapa 12 – Implementar decisão	48
3.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49

4	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
4.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das maiores descobertas da humanidade e desempenha importante papel dentro da sociedade e na economia mundial. O primeiro uso deste material foi para a produção de querosene, no século XIX, em substituição ao óleo de Baleia, empregado na época para iluminação. Posteriormente, foi utilizado como óleo combustível nas indústrias, comércios e residências, e apenas por volta de 1919 o óleo diesel entrou no mercado (QUELHAS et al., 2012).

O também chamado ‘ouro negro’, que de acordo com a ASTM, *American Society for Testing and Materials*, caracteriza-se por uma mistura de hidrocarbonetos contendo também derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados, consiste hoje em uma das principais fontes de energia, além de ser matéria-prima para produção de uma série de bens de consumo, amplamente utilizados mundo afora. Dessa maneira, a ausência das comodidades trazidas por tal, exigiriam mudanças radicais nos hábitos e funcionamento do dia-a-dia da sociedade contemporânea. Dentro desse contexto, o processo de refino assume extensa importância na indústria do petróleo, pois é ele que confere ao mesmo seu maior valor comercial.

No que diz respeito a aspectos ambientais, o refino, que de maneira resumida consiste no conjunto de procedimentos físicos e químicos que vão transformar o óleo cru (petróleo ainda na forma em que foi extraído) nos derivados de valor comercial, é um grande gerador de poluição, uma vez que produz grande quantidade de resíduos líquidos e gasosos nocivos ao meio ambiente bem como resíduos sólidos de difícil tratamento (MARIANO, 2005).

Tendo em vista os danos causados ao meio ambiente, a prática da fixação de especificações que limitem os teores dos poluentes presentes nos combustíveis produzidos, bem como aqueles liberados durante o processo de produção, torna-se cada vez mais presente no âmbito mundial (DE AZEVEDO, 2003). No Brasil não é diferente, e tais restrições são regidas através do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

Considerando os altos níveis de poluição já alcançados e a crescente industrialização no país, que levam a uma degradação cada vez maior da qualidade do ar, a resolução CONAMA 436, em complemento a resolução 382, estabelece limites para emissão de poluentes atmosféricos provenientes de diversos processos industriais. Através do Anexo VI da resolução 436, são estabelecidos os limites para procedimentos realizados em refinarias de petróleo, o que

traz às unidades de refino distribuídas pelo país a necessidade de rever seus métodos de processamento e tratamento, visando cumprimento das novas especificações.

Um dos processos explicitados na norma é o do tratamento das correntes de gás ácido residual, através do qual, compostos sulfurados presentes nesta corrente são convertidos em enxofre, que pode ser reaproveitando como subproduto do processo. Existe, no entanto, mais de uma tecnologia possível de ser empregada para esta finalidade, possuindo cada uma diferentes características e vantagens.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um modelo de decisão multicritério para estruturar a decisão a cerca de um problema realístico de escolha de tecnologia de tratamento de enxofre dentro de uma refinaria do nordeste brasileiro.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar da grande importância dentro da cadeia produtiva do petróleo, o processo de refino também tem seus impactos negativos sobre a sociedade e meio ambiente. O refinamento do óleo cru é responsável pela geração de grande quantidade de compostos químicos, que podem ser liberados na forma de emissões atmosféricas, efluentes líquidos ou ainda, resíduos sólidos. Devido ao forte impacto que estas substâncias têm sobre o meio ambiente, as emissões relacionadas ao refino do petróleo, bem como a de outros processos industriais, são regidas por legislações ambientais que controlam o nível de emissão dos principais poluentes (MARIANO, 2005).

Um dos principais contaminantes gerados neste processo é o sulfeto de hidrogênio (H_2S). Na refinaria em estudo, este gás, que é altamente tóxico, é queimado no incinerador (flare), liberando grande quantidade de SO_x para a atmosfera. Para que a refinaria consiga operar em sua máxima capacidade, torna-se necessário o uso de algum método de recuperação de enxofre, caso contrário, os limites de emissão do mesmo, estabelecidos nas últimas resoluções da CONAMA são violados, fato que torna necessária uma atualização no processo de refino, para que o complexo em questão atenda às normas ambientais vigentes (CONAMA, 2006, 2011).

Existe no mercado mais de uma tecnologia possível para o abatimento do enxofre, de maneira que a relevância do presente trabalho encontra-se na necessidade de realizar esta escolha de maneira estruturada, levando em consideração os diversos aspectos existentes neste contexto, de modo a selecionar a opção mais vantajosa aos interesses da empresa. Com o intuito de realizar uma abordagem mais completa do problema em questão, possibilitando uma futura

análise de desempenho e funcionamento, bem como apoiar o processo decisório como um todo, será construído um modelo de decisão multicritério, com base no framework proposto por De Almeida (2013) e De Almeida et al. (2015).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Abaixo serão descritos os objetivos do trabalho bem como a estrutura do mesmo.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor um modelo multicritério de apoio à decisão para estruturar a escolha de tecnologia a ser utilizada na recuperação do enxofre em refinaria do nordeste brasileiro.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- Construir de um modelo baseado no procedimento de 12 etapas e refinamento sucessivo proposto por De Almeida (2013);
- Avaliar do modelo construído;
- Analisar crítica do uso da versão para web do SAD empregado para resolução do problema

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 4 capítulos descritos a seguir:

O Capítulo I, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo.

O Capítulo II apresenta uma fundamentação teórica em Decisão multicritério e no método FITradeoff. Posteriormente, para avaliação do estado da arte, é feita uma revisão de literatura sobre problemas de seleção de equipamentos no contexto de análise multicritério e a respeito da importância do controle de emissões atmosféricas.

O Capítulo III, foca na construção do modelo de decisão multicritério para seleção de equipamentos no setor do petróleo. Nele são definidos os atores do processo, as alternativas e o método utilizado. Em seguida é utilizado um Sistema de Apoio à Decisão para avaliação das alternativas existentes, visando a escolha dentre as tecnologias disponíveis.

Por fim, no IV Capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é fornecida inicialmente a fundamentação teórica sobre decisão multicritério e o método FITradeoff. Em seguida, é apresentado um mapeamento do estado da arte a respeito de modelos multicritério para seleção de tecnologias bem como da importância do controle de emissões atmosféricas no setor do petróleo.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base conceitual utilizada para este trabalho é apresentada a seguir. A seção 2.1.1 apresenta uma breve fundamentação a respeito de decisões multicritério, enquanto no item 2.1.2 é explicado o método do FITradeoff.

2.1.1 Decisão Multicritério

O processo de tomada de decisão é uma problemática constante dentro das organizações e em sua maioria visa atender múltiplos objetivos, que podem ser conflitantes entre si, caracterizando-se como problemas de decisão multicritério (DE ALMEIDA, et al., 2015; DE ALMEIDA, 2013). Para tais circunstâncias, o uso de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDM/A), que abordam os problemas de maneira estruturada, favorece a qualidade do processo decisório (THOKALA et al., 2016). Keeney & Raiffa (1976) colocam que estes métodos, através da agregação das análises individuais em cada critério, auxiliam na avaliação das alternativas.

De Almeida (2013) destaca ainda as possíveis figuras existentes no procedimento, como o decisor, que tem papel fundamental, explicitando suas preferências a cerca do problema, de maneira a obter a recomendação de maior compromisso com o objetivo desejado.

Neste tipo de problema são construídas as chamadas matrizes de consequências, exemplificada na Tabela 1, em que cada alternativa terá um desempenho em determinado critério, podendo este ser probabilístico ou determinístico. Uma questão chave para o uso dos métodos multicritério na tomada de decisão é a impossibilidade de expressar todos os critérios em uma mesma unidade (DE ALMEIDA, 2013).

Tabela 1 - Matriz de consequências de um problema multicritério

Alternativas/ Critérios	c_1	c_2	...	c_m
a_1	$v_1(a_1)$	$v_2(a_1)$	...	$v_m(a_1)$
a_2	$v_1(a_2)$	$v_2(a_2)$	...	$v_m(a_2)$
...	...	...	...	...
a_n	$v_1(a_n)$	$v_2(a_n)$	...	$v_m(a_n)$

Fonte: de Almeida (2013, p.33)

Existem na literatura diversos métodos possíveis para resolução deste tipo de problema, e sua escolha deve ser feita de maneira cuidadosa, analisando as características específicas de cada situação. Este trabalho, no entanto, foca nos métodos de agregação aditivo determinísticos, em que é feita uma agregação das avaliações das alternativas nos critérios existentes, representado na forma da função valor global expressa na Equação 2.1

$$V(a) = \sum_{j=1}^n k_j v_j(a)$$

Equação 2.1

Onde:

$V(a)$ é a função valor global da alternativa a

$v_j(a)$ é a função valor de cada critério

k_j é a constante de escala para cada critério j

n é o número de criterios

$$\sum_{j=1}^n k_j = 1 \text{ e } k_j \geq 0$$

Inicialmente é feita uma avaliação intracritério, em que o decisor, podendo ser auxiliado por especialistas, determina os valores que retratam os desempenhos de cada alternativa nos critérios. Devido as diferentes unidades utilizadas para representação dos critérios, uma

normalização destes valores torna-se necessária, levando-os a uma escala de 0 a 1 (DE ALMEIDA, 2013)

Outra avaliação necessária à obtenção do valor global é a intercritério, em que os valores das constantes de escala são definidos. De posse destas duas informações, torna-se possível a agregação aditiva das alternativas, que são posteriormente colocadas em ordem crescente do valor global, e aquela com o maior valor consistirá na solução do problema.

Para resolução do problema em análise neste trabalho será utilizado o método FITradeoff (DE ALMEIDA et al., 2016), abordado nos mais diversos contextos (ALVAREZ CARRILLO et al., 2018; DA SILVA; VIEIRA; BENAVALLI, 2017; FREJ et al., 2017; FREJ; DE ALMEIDA; COSTA, 2019; KANG; JÚNIOR; DE ALMEIDA, 2018; ROSELLI; DE ALMEIDA; FREJ, 2019)

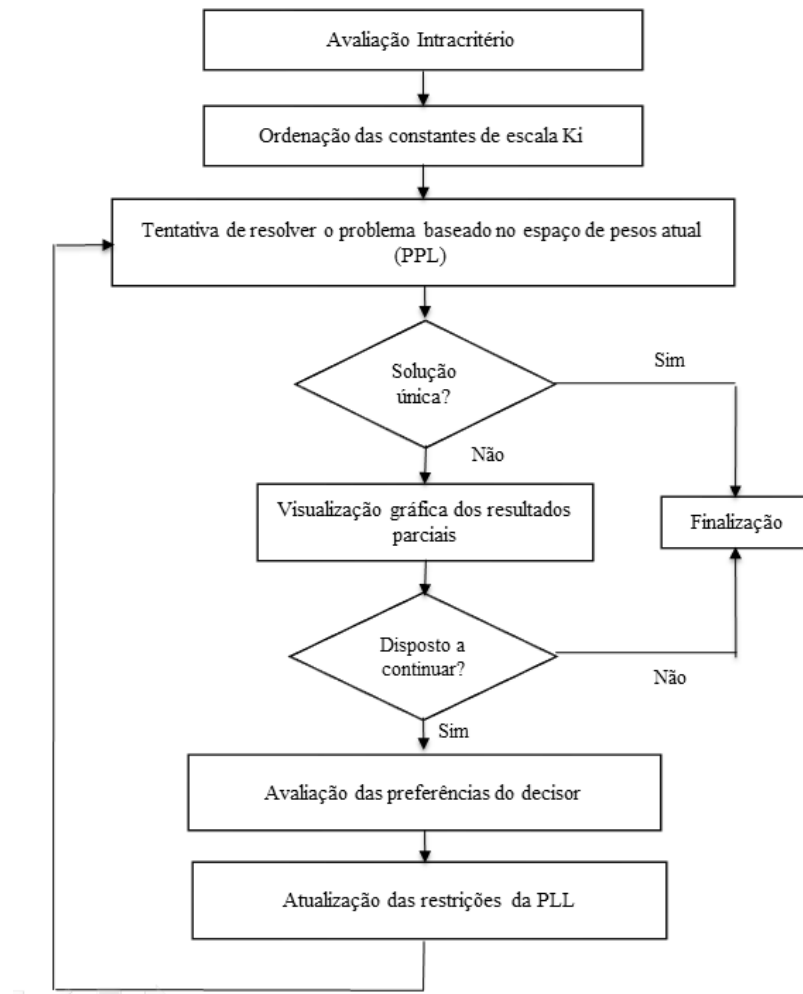
2.1.2 Método FITradeoff

A consideração das constantes de escala como representação do grau de importância relativo entre os critérios é um erro constante no procedimento de agregação da função valor aditiva. Isto porque sua avaliação deve estar sempre associada ao desempenho obtido nos critérios avaliados e não somente ao grau de importância daquele critério isoladamente (DE ALMEIDA, 2013). Nesse contexto, o processo de eliciação destas variáveis é uma etapa crítica dentro dos métodos de agregação aditiva (RIABACKE; DANIELSON; EKENBERG, 2012).

Pensando nesta dificuldade De Almeida et al. (2016) propõem um método de eliciação flexível e interativo, baseado no procedimento de Tradeoff tradicional (KEENEY; RAIFFA, 1976), visando uma diminuição do esforço cognitivo exigido do decisor, levando assim a redução na ocorrência de inconsistências (DE ALMEIDA-FILHO; DE ALMEIDA; COSTA, 2017). Tal fato acontece por este ser um procedimento mais simples, em que, ao invés de ser demandada do decisor a definição de um valor específico de indiferença entre duas consequências, é solicitado o estabelecimento de relações de preferência estrita, tornando o processo cognitivamente mais fácil.

O processo consiste basicamente em, a partir das informações fornecidas pelo decisor, estabelecer restrições para o problema de programação linear formulado, visando encontrar a solução mais consistente com os objetivos estabelecidos. De forma resumida a aplicação do método consiste no demonstrado na Figura 1.

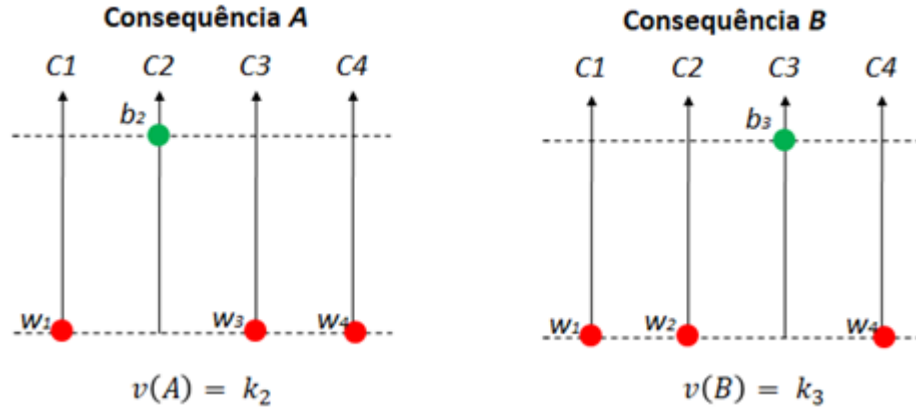
Figura 1 - Fluxograma do método FITradeoff



Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2016)

A etapa de ordenação das constantes de escala ocorre de maneira similar ao que acontece no Tradeoff tradicional, em que questiona-se ao decisor acerca de duas situações hipotéticas, como demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com um dos critérios com desempenho maximizado e os demais minimizados. Tal etapa prossegue até que todas as constantes de escala estejam ordenadas.

Figura 2 - Ordenação das constantes de escala



Fonte: Adaptado de De Almeida et al (2016)

Para o caso exemplificado acima, a consequência A apresenta o critério C2 com performance máxima e os demais critérios com performance mínima, enquanto a consequência B possui o critério C3 com o maior desempenho e os demais com o menor. Se neste caso, o decisor optar pela consequência A, é possível inferir que $k_2 > k_3$. Tal procedimento irá prosseguir até que todas as constantes de escala estejam ordenadas.

A partir deste ponto, ocorre a primeira tentativa de solucionar o problema de programação linear (PLL), que terá como restrições as informações de potencial otimalidade, da normalização, da não negatividade e da ordenação das constantes de escala, representadas nas equações 2-3, 2-4, 2-5 e 2-6, respectivamente. Esta PLL é executada para todas as alternativas, a cada pergunta realizada. Caso o problema não seja solucionado, ou seja, caso exista mais de uma solução ao problema de programação linear, as preferências do decisor serão elicitadas, realizando perguntas com os valores intermediários dos critérios (x'_c e x''_c), fornecendo assim as inequações que servirão como novas restrições representadas pelas equações 2-7 e 2-8, reduzindo o espaço de pesos.

$$\text{Max } \sum_{c=1}^n k_c v_c(x_{ca}), \quad a = 1, 2, \dots, m$$

Equação 2.2

s.a.

$$\sum_{c=1}^n k_c v_c(x_{ca}) \geq \sum_{c=1}^n k_c v_c(x_{cb}), \quad b = (1, 2, \dots, a, b \neq a)$$

Equação 2.3

$$\sum_{c=1}^n k_c = 1 \quad \text{Equação 2.4}$$

$$k_c \geq 0, \quad c = 1, 2, \dots, n \quad \text{Equação 2.5}$$

$$k_1 > k_2 > k_3 > \dots > k_n \quad \text{Equação 2.6}$$

$$k_{c+1} \leq k_c v_c(x'_c) - \varepsilon \quad \text{Para } c=1 \text{ até } n-1 \quad \text{Equação 2.7}$$

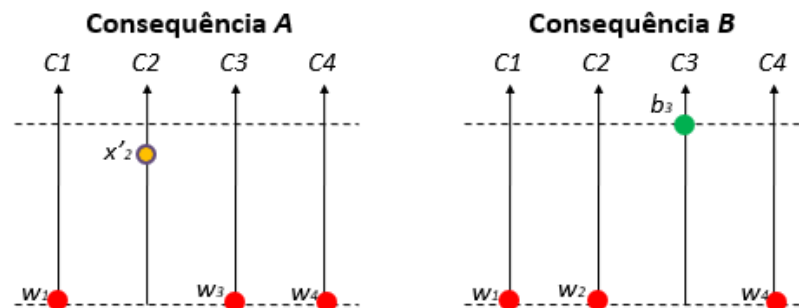
$$k_{c+1} \geq k_c v_c(x''_c) + \varepsilon \quad \text{Para } c=1 \text{ até } n-1 \quad \text{Equação 2.8}$$

Para elicitación das preferências do decisor, são feitas também comparações de situações hipotéticas. Suponha, por exemplo, que na fase de ordenação dos critérios foi estabelecida a relação $k_2 > k_3$. Na etapa seguinte o decisor irá declarar sua preferência entre a consequência A, com o desempenho intermediário no critério 2 e o pior desempenho nos demais critérios, e a consequência B com melhor desempenho no critério C3 e pior desempenho nos demais critérios. Desta forma, através de relações de preferência estrita, novas inequações são estabelecidas, atualizando as restrições do problema de programação linear.

Suponha que inicialmente é questionado ao decisor sua preferência entre as situações exibidas na Figura 3, em que a consequência A possui desempenho intermediário (x'_2) no critério C2 e pior desempenho nos demais critérios, e a consequência B possui melhor desempenho no critério C3 e pior desempenho nos demais. Se para o decisor, a situação demonstrada pela consequência A for preferível à exibida na consequência B, a inequação representada pela Equação 2.9 é formada.

$$k_2 v_2(x'_2) > k_3 \quad \text{Equação 2.9}$$

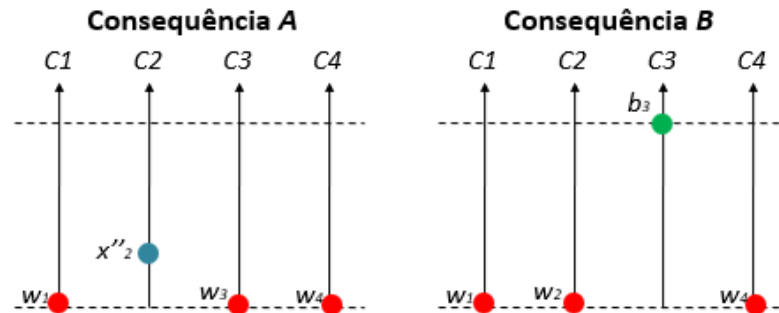
Figura 3 - Consequências hipotéticas no processo de elicitación de preferências do decisor



Fonte: Adaptado de De Almeida et al. (2016)

Em um segundo momento, a performance do critério C2 pode ser alterada (x''_2) de maneira que o decisor passe a preferir a consequência B.

Figura 4 - Consequências hipotéticas no processo de elicitación de preferências do decisor



Fonte: Adaptado de De Almeida et al. (2016)

Se para as situações exibidas na Figura, por exemplo, o decisor preferir a consequência B, uma nova inequação será formada, transformando a restrição deste par de consequências na relação exibida na Equação 2.10.

$$k_2 v_2(x''_2) < k_3$$

Equação 2.10

Nota-se que não é necessário chegar ao ponto exato de indiferença, pois o método faz uso de relações de preferência estrita, fato que torna o processo mais fácil para o decisor, reduzindo a possibilidade de inconsistências no processo.

A cada pergunta respondida, novas inequações serão adicionadas ao problema, reduzindo assim o espaço de pesos, tentando resolver a programação linear para cada alternativa, buscando a otimalidade. O procedimento prossegue até que a solução seja encontrada ou até que o decisor não deseje mais continuar o processo, uma vez que este pode acompanhar e analisar os resultados parciais durante o andamento da elicitación.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado um mapeamento do estado da arte sobre métodos de decisão multicritério para seleção de tecnologia e equipamentos bem como uma revisão bibliográfica a respeito da importância dos procedimentos de tratamento de poluentes.

2.2.1 Seleção de equipamentos no contexto multicritério

O problema de seleção de equipamentos/tecnologia pode ocorrer nos mais diversos cenários, e os aspectos considerados são os mais variados, a depender da área de aplicação da situação abordada. Aloini et al. (2018) ressaltam a importância da análise e seleção de tecnologias, bem como definição dos critérios de avaliação adequados, uma vez que estas escolhas estão diretamente relacionadas à alocação de recursos. Neste contexto, existe na literatura uma vasta gama de trabalhos envolvendo esta problemática.

No âmbito da saúde, os problemas de decisão são conhecidamente complexos, por considerarem muitos fatores e por comumente envolver várias partes no processo (ANGELIS; KANAVOS, 2017). Dentro deste cenário muito se fala em avaliação de tecnologias da saúde (*Health Technology Assessment – HTA*), metodologia que analisa e avalia tecnologias da saúde podendo considerar diversos aspectos, amplamente utilizada para aumento da eficiência na alocação de recursos da área (IMPROTA et al., 2018; ANGELIS; KANAVOS, 2017). Angelis, Lange e Kanavos (2017) enfatizam também que avaliações econômicas se tornaram populares dentre as organizações de avaliação de tecnologia na saúde, mas que nem sempre as preferências do decisor neste setor podem ser bem representadas apenas por aspectos econômicos. A necessidade de considerar vários fatores simultaneamente na tomada de decisão no domínio da saúde faz com que os métodos de decisão multicritérios ganhem espaço dentro deste campo (BALTUSSEN; NIESSEN, 2006).

Nesse contexto, Improta et al. (2018) e Voudrias (2016) utilizam o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em problemas de escolha. O primeiro integra as metodologias AHP com HTA, através de simulações, visando superar as limitações de ambas, para escolha de prótese a ser utilizada em pacientes com hérnia. O segundo, por sua vez, utiliza o AHP para escolha de procedimento mais adequado para tratamento de resíduos médicos infecciosos. Angelis & Kanavos (2017) apresentam uma abordagem de decisão multicritério, baseada na teoria de valor multi-atributo (MAVT), para construção de um modelo multicritério de análise de novos medicamentos. A abordagem top-down VFT (*Value focused thinking*) é utilizada para identificar as preferências do decisor e estruturar um modelo genérico de análise.

No cenário de energia a análise de decisão multicritério também é utilizada para seleção de equipamentos, com as mais diversas finalidades, pois nem sempre as avaliações tradicionalmente utilizadas, como análises custo-benefício, ou indicadores econômicos e financeiros são suficientes para validação satisfatória de projetos (CAVALLARO, 2009). Çolak

& Kaya (2017) atentam para o fato de que nem sempre o julgamento por meio de números exatos é possível, contexto no qual o uso de números fuzzy pode auxiliar, tornando a análise mais flexível. Maxim (2014) argumenta que a escolha de políticas energéticas deveria ser feita de maneira mais estruturada e utiliza o método SWING para ranquear 14 tecnologias de geração de energia baseado em sua compatibilidade com o desenvolvimento sustentável da indústria. Haddad, Liazid & Ferreira (2017) integram o método AHP ao feedback de especialistas da área para avaliação de diferentes opções de energia renovável do sistema elétrico Argelino. Şengül et al. (2015) desenvolvem um framework, utilizando o fuzzy TOPSIS para ranquear os sistemas de fornecimento energético da Turquia. Streimikiene et al. (2012) utilizam o MULTIMOORA (*Multiple Objective Optimization using Ratio Analysis plus the Full Multiplicative Form*) em conjunto com o TOPSIS para escolha de fonte renovável de energia. San Cristóbal (2011), por sua vez, considera fatores tecnológicos, sociais, econômicos e ambientais para, através dos métodos VIKOR e AHP, escolher a tecnologia de energia renovável que mais se adeque ao plano energético proposto pelo governo Espanhol.

Ainda no setor energético, considerando questões ambientais e econômicas, bem como as incertezas relacionadas às performances dos sistemas em questão, Alanne et al. (2007) empregam a metodologia PAIRS para análise e seleção de sistema de suprimento de energia a empreendimentos residenciais. No domínio da energia solar mais especificamente, Cavallaro, Zavadskas & Streimikiene (2018) desenvolvem um algoritmo fuzzy multi-atributo para fornecer um ranking de plantas solares híbridas, que combinam a tecnologia de geração solar com outras fontes renováveis e fósseis de geração de energia, possibilitando uma redução nos custos de projeto, tornando-os mais viáveis economicamente. Troldborg, Heslop & Hough (2014) desenvolvem uma metodologia que associa o PROMETHEE ao método de simulação de Monte-Carlo para tratar a incerteza dos critérios e fornecer um ranking de diferentes tecnologias de energia renovável. Kirppu, Lahdelma & Salminen (2018), devido ao conflito existente entre as preferências dos especialistas participantes, usam uma análise estocástica de aceitabilidade multicritério (Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis - SMAA), para comparar e selecionar tecnologias de produção de calor neutras em carbono.

No que diz respeito ao campo tecnológico, Byun & Lee (2005) utilizam o TOPSIS modificado, que permite o uso de valores linguísticos para definição de seus parâmetros, com o objetivo de selecionar uma tecnologia ótima de prototipagem rápida. Büyüközkan, Göçer & Feyzioglu (2018), avaliam e selecionam servidores de computação em nuvem através do

método *Interval-valued intuitionistic fuzzy (IVIF)*. Balli & Korukoglu (2009) desenvolvem um modelo de decisão multicritério para seleção de sistema operacional mais adequado a ser utilizado nos sistemas computacionais de empresas, levando em consideração julgamentos subjetivos dos decisores. Para isso é proposto uma abordagem baseada nos métodos FAHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) e TOPSIS.

Na indústria química, Olivares & Oddershede (2018) também apresentam uma abordagem com o método AHP associado à lógica fuzzy, para análise e seleção de opções tecnológicas para produção de cloreto férrico. Peko, Gjeldum & Bilic (2018) utilizam os métodos PROMETHEE, AHP e fuzzy AHP para selecionar o procedimento de fabricação aditiva mais adequado a determinado usuário ou companhia. Chinese, Nardin & Saro (2011) empregam o método multicritério AHP com o propósito de escolha de tecnologia para aquecimento em um empreendimento industrial, pois argumentam que este tipo de problema dispõe de diversos e conflitantes objetivos, fazendo com que modelos de otimização econômica não consigam expressar corretamente as preferências do decisor. Karimi et al. (2011) através da escolha das tecnologias disponíveis, selecionam o melhor processo de tratamento de águas residuais. Para alcançar tal objetivo, utilizam os métodos AHP e fuzzy AHP, visando a consideração de incertezas nas avaliações dos decisores.

A utilização dos métodos multicritério traz grandes vantagens ao processo de tomada de decisão, não só no contexto organizacional (DE ALMEIDA, 2013), mas em diversos outros cenários. Tendo em vista a multidisciplinaridade existente no problema de seleção de tecnologia, e os diversos aspectos considerados, o presente trabalho visa desenvolver um modelo multicritério de apoio à decisão para auxiliar na escolha de equipamento para recuperação de enxofre.

2.2.2 Relevância do controle de emissões atmosféricas no setor do petróleo

O petróleo ocupa hoje lugar de extrema importância no que diz respeito ao fornecimento de energia, não só para as indústrias, mas também no cotidiano da população (VARJANI; GNANSOUNOU; PANDEY, 2017). A crescente industrialização presenciada nas últimas décadas, e o consequente aumento no consumo do petróleo e seus derivados, fez aumentar os níveis de poluição, fazendo desta uma das grandes preocupações das entidades ambientais (OMIDVARBORNA; BAAWAIN; AL-MAMUN, 2018; HADIDI et al., 2016). Nesse

contexto, o planejamento de políticas de controle de emissões, torna-se essencial para minimizar os danos causados à saúde e meio ambiente (BHANARKAR et al., 2005).

Desde o princípio da exploração do petróleo e produção de seus derivados, o método de queima tem sido uma técnica utilizada para liberação de gases associados a esta atividade. Esta alternativa, no entanto, acaba por ser um dos grandes fatores contribuintes à poluição (SOLTANIEH et al., 2016). Não obstante às práticas citadas, os impactos pós-produção como a queima de combustíveis fósseis, por exemplo, também são nocivos ao meio ambiente e fonte de preocupação (FAWOLE; CAI; MACKENZIE, 2016).

O processo de refino deste óleo representa um dos principais seguimentos dentro da indústria química (XU; ZHANG; XU, 2018), e é responsável pela emissão de uma série de gases prejudiciais à saúde e meio ambiente, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x), monóxidos de carbono (CO) e os chamados compostos voláteis orgânicos (VOC's) (HADIDI et al., 2016). As taxas de poluentes oriundos de uma refinaria dependem, entretanto, de fatores como: idade do complexo industrial, capacidade de produção, especificações do material de input utilizado, tipos de produtos gerados e complexidade das unidades de operação (MINABI et al., 2018).

O aumento nas emissões desses gases é prejudicial e embora já existam medidas para o controle destas substâncias, o aumento de sua concentração traz efeitos ao ecossistema (GAO et al., 2018). Omidvarborna, Baawain & Al-manun (2018) fizeram um estudo em que analisam a qualidade do ar nos países do conselho de cooperação do golfo. Neste trabalho especificam os problemas trazidos pelos principais poluentes. O SO_x liberado durante o refino do petróleo e na queima de combustíveis fósseis afeta a qualidade do ar e contribui para formação de chuvas ácidas, além de causar problemas respiratórios (SADARE; OBAZU; DARAMOLA, 2017). O NO_x é altamente reativo na atmosfera, podendo formar ozônio, por exemplo, que contribui para a oxidação atmosférica. Em contato com moléculas de oxigênio e água também podem levar à formação de chuva ácida (OMIDVARBORNA; BAAWAIN; AL-MAMUN, 2018). O ácido sulfídrico (H₂S), por sua vez, um dos principais subprodutos do petróleo, é um gás altamente tóxico, além de ser corrosivo (MONDAL; SEN; SINGH, 2015).

Dentro deste contexto, alguns estudos foram realizados em que os efeitos destes poluentes para o meio ambiente e para a saúde da população são analisados. Shie, Yuan & Chan (2013) avaliam os impactos trazidos pela alta concentração de SO₂ em uma cidade próxima a um centro petroquímico em Taiwan, baseado em dados recolhidos da estação de monitoramento da

qualidade do ar de Taishi. Zhang et al. (2018) analisam as emissões de compostos orgânicos voláteis (VOC's) de uma refinaria na China para avaliar os riscos à que os trabalhadores estavam expostos. O risco potencial foi avaliado utilizando os métodos padrões da agência de proteção ambiental dos EUA (US EPA – US Environmental Protection Agency) e da Conferência Americana dos Higienistas Industriais Governamentais (ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists). Minabi et al. (2018), por sua vez, verificaram as concentrações de SO_2 provenientes de uma refinaria de gás localizada no Iran, para posterior análise da possível influência de tais gases na saúde da população. Para isto as emissões foram medidas sazonalmente, no período de um ano, e o modelo AEROMOD foi utilizado para simular os padrões de dispersão.

Kenessary et al. (2017) fizeram um estudo sobre os impactos trazidos pela emissão de vários poluentes provenientes das atividades realizadas no campo de óleo e gás de Karachaganak, na Ásia, para a população das comunidades vizinhas. Através das análises puderam perceber que a concentração de H_2S estava acima do esperado em alguns dos vilarejos considerados. Os autores expõem que a absorção de ácido sulfídrico, mesmo que em pequenas concentrações, pode ser extremamente prejudicial à saúde. Deger et al. (2012) fizeram um estudo para analisar a contribuição das emissões de SO_2 de uma refinaria de petróleo no Canadá, para os casos de asma em crianças residentes nas vizinhanças do complexo industrial.

Nesse contexto, Xu, Zhang & Xu (2018) discutem sobre o desafio de balancear a alta produtividade mantendo a rentabilidade e competitividade do negócio frente à concorrência, com alternativas rentáveis de redução de emissões, e as cada vez mais restritivas normas ambientais. Visando uma melhoria na qualidade do ar, bem como atenuação dos efeitos trazidos pela presença dos poluentes oriundos dos processos envolvidos com extração e tratamento do petróleo, e do uso de seus produtos e sub-produtos normas são estabelecidas para regulamentação dos limites de emissão permitidos.

2.3 SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTES TRABALHOS

Através da revisão de literatura pode-se perceber que existem variados estudos no que diz respeito aos efeitos que a presença de determinados poluentes traz e em como estes podem ser prejudiciais tanto ao meio ambiente como à saúde da população, mas pouco se fala nas medidas necessárias para que estas modificações sejam realizadas. Alguns trabalhos referem-se ainda à

dificuldade de atender às normas regulamentadoras conciliando as adaptações necessárias com a manutenção da rentabilidade do negócio.

No que diz respeito à seleção de equipamento/tecnologia, foram encontrados estudos que fazem esta análise em diversos setores. Em sua maioria, estes são considerados problemas multiobjectivo, uma vez que possuem a necessidade de consideração de diversos fatores no processo de decisão. No entanto, pouco foi encontrado no tocante ao setor do petróleo, ou na escolha de equipamentos para redução de emissões em outros domínios.

Desta maneira, dada à escassez de estudos desta finalidade no âmbito petrolífero e a necessidade real de resolução do problema de maneira estruturada, este trabalho tem por objetivo, estruturar um modelo de apoio à decisão para apoiar o problema de escolha de tecnologia mais adequada à redução de emissões de enxofre em refinaria do nordeste brasileiro, visando atendimento às leis vigentes.

3 MODELO PROPOSTO

Neste capítulo será apresentado um modelo multicritério para seleção de tecnologia a ser utilizada para recuperação de enxofre em refinaria do nordeste brasileiro. O item 3.1 apresenta uma contextualização do problema e empresa estudada, o item 3.1.1 apresenta uma caracterização da refinaria em estudo, o 3.1.2 uma descrição do problema e o 3.2 a modelagem e estruturação do mesmo.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE DECISÃO

O petróleo é uma matéria prima essencial à sociedade contemporânea, e sua utilização vem desde as antigas civilizações. Triggia et al. (2004) citam sua utilização pelos egípcios na pavimentação de estradas e na construção de pirâmides, pelos gregos e romanos para propósitos bélicos e pelos fenícios para impermeabilização de embarcações, por exemplo. Sua aplicação para os fins que são conhecidos na atualidade começou a tornar-se reconhecida no início no século XIX, nos Estados Unidos, sendo empregado inicialmente em substituição ao óleo de baleia, utilizado então para iluminação. Com o advento dos motores a diesel e gasolina, o petróleo começou a ganhar ainda mais importância dentro do mercado e da sociedade (QUELHAS et al., 2012)

A busca pelo petróleo levou a significantes descobertas, não só nos Estados Unidos, mas em diversas outras potências, elevando esta indústria ao status global (CAMPOS, 2014). A década de 50 marca a expansão da atividade exploratória, antes majoritariamente norte-americana, para outros polos, sendo consolidada na década seguinte com o sucesso do Oriente médio e União Soviética neste segmento. A partir daí o petróleo começa a fortalecer seu valor na matriz energética mundial (TRIGGIA et al., 2004).

No Brasil, o primeiro poço perfurado com a finalidade de encontrar petróleo foi feito no município de Bofete, São Paulo, em 1897. A atividade exploratória, apesar de não ter sido bem sucedida em seu início, possibilitou um maior conhecimento sobre a geologia do país assim como proporcionou aos estudiosos da área uma maior experiência sobre a exploração do mineral, até que o primeiro campo comercial fosse encontrado, fato que ocorreu apenas em 1939 (GAUTO, 2011; TRIGGIA et al., 2004).

Ainda hoje, o também chamado “ouro negro” encontra-se no centro de diversos conflitos, tanto no âmbito político quanto econômico. Clo (2000) destaca algumas das razões pela qual este ocupa posição fundamental dentro da economia mundial. Além de ser uma das fontes energéticas mais consumidas na atualidade, possui grande representatividade dentro da esfera industrial e de transporte, fazendo com que estas sejam fortemente impactadas por oscilações do mercado petrolífero (CAMPOS, 2014).

As atividades constituintes deste setor distribuem-se basicamente em cinco etapas: exploração, produção, transporte, refino e distribuição. Estas, por sua vez, costumam estar associadas a grandes investimentos e sua execução pode estar atrelada a altos riscos. Vinculada à atividade exploratória, complexos estudos geológicos são realizados com a finalidade de analisar a possível ocorrência do mineral, que pode ou não vir a ser comercial, a depender do volume encontrado (CAMPOS, 2014; GAUTO, 2011). De posse do óleo bruto, este será transportado para as refinarias, visto que, apesar de sua destacada relevância nas mais variadas áreas, o petróleo em sua forma original não possui grande valor comercial, se não para o fornecimento de energia via combustão. Desta forma, torna-se necessário a realização de uma série de processos, para que o material extraído da natureza possa se transformar nos produtos derivados deste, conhecidos e utilizados para as mais diversas finalidades (MARIANO, 2005).

Neste contexto, o processo de refino desempenha papel fundamental na cadeia do petróleo e conseqüentemente na economia, uma vez que a matriz energética mundial ainda é dependente dos produtos gerados a partir deste minério. Esta etapa, além de assegurar o suprimento do mercado no que diz respeito aos derivados do petróleo, é também responsável por garantir o nível de qualidade destes, bem como o atendimento às exigências ambientais e de segurança, cada vez mais rígidas e restritivas, devido à crescente degradação causada ao meio ambiente pelas atividades humanas (ANP - Agência Nacional do Petróleo, 2018; QUELHAS et al., 2012). A questão ambiental vem sendo amplamente abordada em todo o mundo, de maneira que no Brasil não é diferente. As empresas precisam rever e atualizar seus processos com o passar do tempo, pois os avanços tecnológicos e novas exigências do mercado tornam as técnicas utilizadas anteriormente obsoletas.

A empresa cujo problema é estudado é atuante no setor petrolífero, e está entre as mais influentes do mundo nesta área. Foi fundada em 1953, com sede no Rio de Janeiro, e tem participação principalmente nos segmentos de exploração e produção de petróleo, refino, comercialização e distribuição do mesmo e de seus derivados. Está presente em mais de 19

países através de parcerias com empresas estrangeiras, mantendo-se referência no setor energético mundial. Teve sua primeira refinaria fundada em 1961, e atualmente possui 13 refinarias distribuídas pelo país.

Com uma marca de produção no ano de 2017 de 2,15 milhões de barris por dia (bpd), a companhia assume posição fundamental e estratégica na economia do país, que é o 7º maior consumidor de derivados de petróleo do mundo (ODDONE, 2018). A refinaria em análise no problema possui atualmente, uma capacidade de refino de 100.000 bpd, um pouco abaixo do seu máximo (que seria de 115.000 bpd), representando aproximadamente 4,3% do refino nacional. Tal capacidade é restringida pela ausência de uma unidade que efetue tratamentos nas correntes de saída do processo, não tornando possível o controle dos níveis de enxofre emitidos na atmosfera limitando assim o funcionamento e produção do complexo industrial em questão.

Desta maneira, o problema aqui tratado foi elaborado a partir de uma problemática existente em uma das unidades de refino localizadas no nordeste do país, essencial para o desenvolvimento da região. O setor de refino gera emprego, renda e desenvolvimento que impactam diretamente na realidade econômica local. Além dos empregos diretamente gerados pela implementação de tais empreendimentos, estes, funcionam como polos de desenvolvimento industrial, sendo atrativo para o estabelecimento de outras empresas na área. Para construção do problema foram usados dados realísticos.

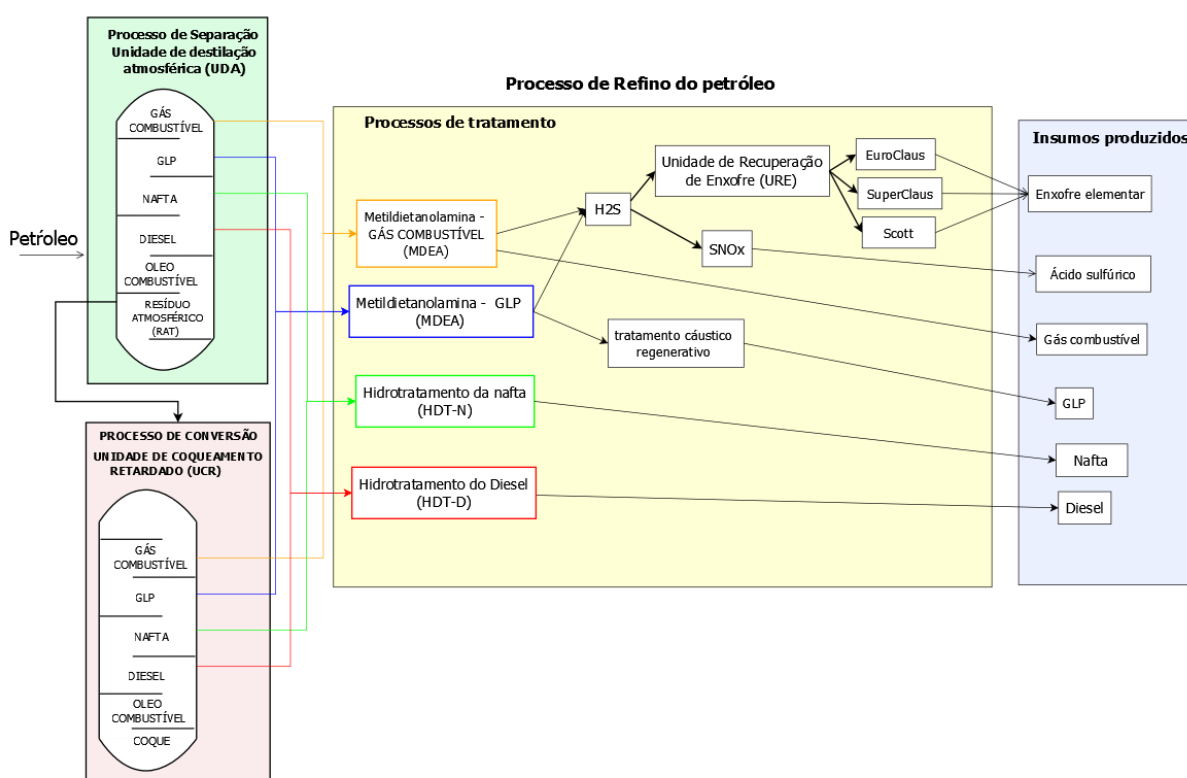
3.1.1 Caracterização da Refinaria analisada no estudo

As refinarias são complexos industriais que têm por objetivo a obtenção dos derivados de petróleo visando o aproveitamento máximo de seu potencial energético. Consistem em um amplo sistema de operações para realização de beneficiamentos da matéria prima de entrada, originando assim frações de destilação. As operações constituintes de uma refinaria irão variar de acordo com alguns fatores como as propriedades do óleo a ser trabalhado bem como dos produtos que se deseja obter (MARIANO, 2005).

A refinaria analisada no estudo, localizada no nordeste brasileiro, tem por objetivo principal a produção de produtos energéticos e é composta por unidades de destilação atmosférica (UDA), de coqueamento retardado (UCR) e de tratamento (metilditanolamina – MDEA, HDT, tratamento caustico) para posterior geração dos derivados. O processo consiste basicamente no exposto na Figura 5 em que o mineral bruto é recebido inicialmente na UDA onde é separado em: gás combustível, GLP, Nafta, Diesel, óleo combustível e resíduo

atmosférico (RAT). O resíduo atmosférico tem baixo valor comercial, mas na UCR é transformado em produtos de maior valor agregado, onde acontece a quebra de algumas moléculas mais pesadas gerando, assim como na UDA, gás combustível, GLP, Nafta, Diesel, óleo combustível. Nesta unidade é gerado também o coque. Os produtos gerados em comum na UDA e na UCR são enviados para as respectivas unidades de tratamento, onde propriedades indesejáveis associadas à presença de determinados contaminantes são eliminadas ou modificadas. Tais tratamentos são necessários, pois, devido às normas ambientais os produtos derivados de petróleo devem atender a determinadas especificações.

Figura 5 - Processo de refino do petróleo



Fonte: Roberta Barbosa da Silva (2019)

Um possível processo de tratamento são aqueles realizados com aminas, que realizam a retirada de H_2S das frações mais leves do petróleo. Na refinaria em estudo, é utilizada a metildietanolamina - MDEA para tratamento do GLP e gás combustível. No entanto, atualmente, o ácido sulfídrico resultante das unidades MDEA é queimado sendo utilizado como fonte de energia para os demais processos. Este processo acaba por limitar a produção da unidade de refino, pois caso esta funcionasse com sua máxima capacidade, ocasionaria a emissão de SO_x em quantidades acima das permitidas por lei.

3.1.2 Descrição do problema

As atividades industriais desenvolvidas no país devem seguir uma série de regimentos e normas, estabelecidos pelos órgãos competentes. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, órgão do Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA, estabelecido através da Lei Nº 6.938/81, é responsável por estabelecer políticas de proteção ao mesmo. Dentre suas competências está o estabelecimento de normas e padrões relativos à conservação da qualidade do ecossistema. Para isso faz uso de resoluções, moções e recomendações (MMA - Ministério do Meio Ambiente, 2018)

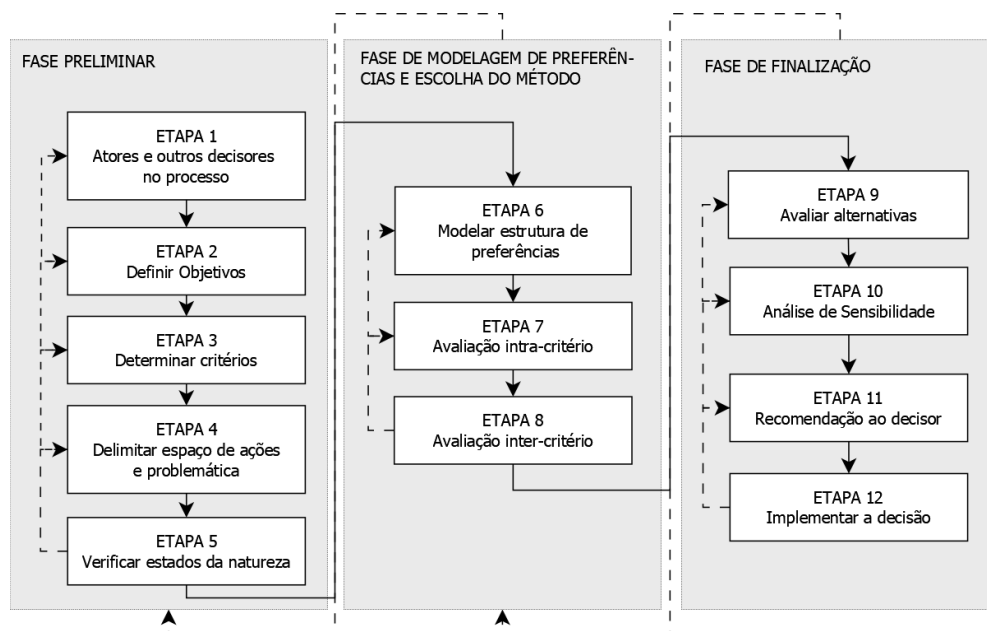
Através da Resolução 436/2011 divulgada em complemento à Resolução 382/2006, são estabelecidos os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Na atual configuração da refinaria em estudo, caso esta funcione em sua máxima capacidade, a destinação do H_2S extraído pelas unidades de tratamento MDEA, faz com que o limite de emissão estabelecido no item 3.1 do anexo VI para fornos e caldeiras queimando gás em refinarias de petróleo seja excedido, fazendo necessária alguma medida de controle de poluentes.

Tendo em vista a necessidade de escolha da tecnologia que será utilizada para tal processo, bem como a complexidade e multidisciplinaridade envolvidas neste problema, este trabalho tem por objetivo propor um modelo de decisão multicritério para estruturar a decisão de escolha de tecnologia a ser utilizada para recuperação de enxofre em refinaria do nordeste brasileiro.

3.2 MODELAGEM E ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

Visando conduzir o processo de modelagem, estruturação do problema e aplicação prática, foi utilizado o framework de 12 etapas proposto por (DE ALMEIDA, 2013; DE ALMEIDA et al., 2015) ilustrado na Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Procedimento para resolução de um problema de decisão



Fonte: Adaptado de de Almeida (2013)

3.2.1 Etapa 1 – Caracterizar decisor(es) e outros autores

A primeira etapa consiste na identificação do(s) decisor(es) e dos outros ator(es) do processo. Neste caso o decisor é o coordenador de operações, que possui conhecimento das principais necessidades da empresa, podendo assim expressar as preferências da mesma durante a resolução do problema. Apesar de neste caso a decisão ter sido tomada individualmente, outros atores estão envolvidos no processo, como por exemplo, especialistas que forneceram informações factuais sobre o problema, e a presença de um analista que conduziu o processo.

3.2.2 Etapa 2 - Identificação dos objetivos

Na segunda etapa foram definidos os objetivos do problema, através de discussões com os especialistas e o decisor. O objetivo fundamental é reduzir da emissão de enxofre, oriundos do processo de refino do petróleo na refinaria em análise, para que a máxima capacidade de produção possa ser alcançada sem que as leis ambientais vigentes sejam violadas, bem como a utilização de processos cada vez menos prejudiciais ao ecossistema. Para alcançar este objetivo central, no entanto, alguns aspectos tiveram de ser considerados, caracterizando os objetivos meio do problema.

Paralelamente ao fator de recuperação, outras questões tiveram de ser analisadas, como por exemplo, o tempo necessário à implementação de tais tecnologias, uma vez que a resolução

CONAMA 436/2011, publicada em complemento à resolução 382/2006, estabelece prazos para que os limites de emissão sejam atendidos.

Outro aspecto refere-se ao custo de implementação associado a cada tecnologia analisada, que apesar da urgência do projeto, deve ser minimizado. Além do custo de implementação, alguns outros pontos acabam por, mesmo que em longo prazo, traduzir-se em custos. O processo de recuperação de enxofre é um procedimento já adotado em outras unidades do grupo distribuídas pelo país, de maneira que a depender da tecnologia utilizada, os colaboradores da empresa podem já possuir um conhecimento prévio acerca de medidas de operação e manutenção dos equipamentos. Desta forma, o custo associado a possíveis treinamentos e ações de manutenção é reduzido. Sendo assim, um dos objetivos do problema consiste na utilização de tecnologia previamente conhecida.

Como resultado do abatimento do enxofre, existe ainda a geração de sub-produtos, que possuem valor comercial, podendo gerar certa renda à empresa. Apesar de não ser este o intuito do processo, estas substâncias podem ser comercializadas, tornando o processo mais rentável. A substância gerada irá variar de acordo com o processo base utilizado, de maneira que diferentes tecnologias podem gerar diferentes materiais. Nesse contexto, busca-se o processo que possua uma maior rentabilidade, ou seja, que gere aquele sub-produto com maior valor de mercado.

3.2.3 Etapa 3 – Estabelece critérios

Na terceira etapa são definidos os critérios que devem representar os objetivos definidos na segunda etapa sem que haja redundâncias. Para isto, foram realizadas reuniões na presença do analista e do decisor, bem como de alguns dos especialistas envolvidos no processo, em que foi discutido quais seriam os critérios mais adequados ao problema, visando a total representação dos objetivos já definidos anteriormente. É válido ressaltar que deve existir, para cada objetivo, ao menos uma variável que meça o grau de desempenho no mesmo.

Para resolução do problema foram considerados cinco critérios, descritos abaixo:

- **Custo** – refere-se ao custo atrelado à implementação dos equipamentos utilizados no processo de abatimento do enxofre. Cada tecnologia analisada possui um custo diferente associado aos equipamentos que serão instalados e ao processo de instalação. Para resolução desta problemática foram utilizados valores de custo na escala de milhão de reais.

- **Conhecimento técnico** – Consiste no conhecimento técnico que a empresa já possui sobre o equipamento. É interessante que já exista conhecimento prévio sobre a tecnologia a ser instalada, uma vez que outras unidades da empresa realizam o procedimento de recuperação de enxofre. Desta maneira as técnicas utilizadas para funcionamento e manutenção do equipamento serão mais facilmente incorporadas à rotina de trabalho do que se estes forem equipamentos e processos totalmente desconhecidos. Tal critério foi avaliado em três níveis descritos na Tabela 2:

Tabela 2 - Níveis conhecimento técnico

Avaliação	Descrição do nível
3	Tecnologia já é conhecida e utilizada em outras refinarias do grupo
2	Tecnologia parcialmente conhecida. É empregado processo similar em outras refinarias do grupo
1	Tal tecnologia nunca foi utilizada em refinarias brasileiras de modo que não se tem conhecimento técnico sobre a mesma.

Fonte: Esta pesquisa (2019).

- **Tempo de implementação** – Consiste no tempo necessário à instalação dos equipamentos e início do funcionamento dos mesmos para o processo de recuperação de enxofre. Deseja-se minimizar este tempo, visando o atendimento às normas vigentes. As informações para avaliação neste critério foram obtidas por meio de licitações realizadas pela empresa junto a diversos fornecedores, no qual o tempo foi medido numa escala de meses.
- **Rentabilidade** – este critério refere-se à rentabilidade do processo, tendo em vista o sub-produto gerado. A depender do procedimento utilizado para abater o enxofre da corrente residual de saída, diferentes substâncias podem ser formadas. Estas substâncias possuem diferentes valores de mercado e podem ser comercializadas, gerando valor para a empresa, e tornando o processo como um todo mais rentável. Apesar de ser um fator levado em consideração pelo decisor na hora da decisão, este mostrou-se como um critério de difícil mensuração, pois não se tinha conhecimento a cerca a avaliação específica de cada tecnologia. Os especialistas e decisor tinham conhecimento, no entanto, que uma das substâncias possuía valor de mercado superior ao das demais (baseadas em um mesmo

princípio), e por este motivo foi definida uma avaliação de dois níveis, como exibido abaixo.

Tabela 3 - Níveis de rentabilidade

Avaliação	Descrição do nível
0	Baixa rentabilidade
1	Alta rentabilidade

Fonte: Esta pesquisa (2019).

- Eficiência máxima – Independente da tecnologia utilizada, não é possível a total recuperação do enxofre existente na corrente residual de H_2S . A sua porcentagem de aproveitamento dependerá da eficiência do equipamento utilizado, de maneira que deseja-se obter a máxima eficiência possível. Tal critério foi analisado em porcentagem de eficiência de cada equipamento, dados estes obtidos com a ajuda de especialistas, por meio de licitações realizadas pela empresa.

Diante do exposto, a Tabela 44 apresenta um resumo dos critérios

Tabela 4 - Resumo dos Critérios

Critério	Tipo	Descrição	Escala	Unidade
Custo	Minimização	Custo de implementação	175,935 a 301,603	Milhões R\$
Conhecimento técnico	Maximização	Conhecimento sobre a tecnologia a ser instalada	3: Tecnologia conhecida 2: Tecnologia parcialmente conhecida 1: Tecnologia não é conhecida	pontuação
Tempo de implementação	Minimização	Tempo de implementação	16 a 32	meses
Rentabilidade	Maximização	Valor agregado do subproduto gerado	0: baixa rentabilidade 1: alta rentabilidade	pontuação
Eficiência máxima	Maximização	Eficiência da tecnologia implementada	96 a 99,8	%

Fonte: Esta pesquisa (2019).

3.2.4 Etapa 4 – Estabelecer espaço de ações e problemática

A quarta etapa envolve estruturação do espaço de ações e definição da problemática. Deve-se estabelecer se o espaço de ações é discreto ou contínuo e se este sofrerá alguma modificação durante o processo.

Existem diversas formas de realizar a recuperação do enxofre no processo de refino. No entanto, foram consideradas para este estudo as opções existentes nas licitações realizadas pela

empresa, de maneira que para o problema em questão o conjunto de alternativas é discreto e composto por cinco potenciais tecnologias para recuperação. São elas as unidades: Claus, SuperClaus, EuroClaus, Scott e Snox. Vale ressaltar, no entanto, que existem outras tecnologias disponíveis no mercado para este fim, mas estas foram aquelas sugeridas no processo licitatório realizado.

O processo Claus é tipicamente utilizado para tratamento das correntes de saída em refinarias. Consiste basicamente na oxidação parcial do ácido sulfídrico convertendo-o à dióxido de enxofre, numa primeira etapa, chamada de fase térmica (Equação 3.1). Posteriormente o H_2S residual reage com o SO_2 formado na primeira etapa. Esta última reação ocorre de forma catalítica (Equação 3.2), e possibilita a formação do enxofre elementar (QUELHAS et al., 2012).



Três das alternativas listadas (SuperClaus, EuroClaus e Scott) utilizam como base o processo Claus, acrescentando a este fases extras, de maneira a aumentar sua eficiência. A unidade SNOx, por sua vez, remove simultaneamente o NO_x e o SO_x dos efluentes gasosos, através de um leito catalítico, dividido em duas seções. Na primeira seção é realizada a redução do NO_x enquanto que na segunda o SO_2 é oxidado a SO_3 .

Com as alternativas e critérios do problema definidos, iniciou-se o processo de obtenção da matriz de consequências. Algumas destas informações, como o custo, tempo de implementação e eficiência máxima dos equipamentos foram obtidas por meio de licitações efetuadas pela empresa junto à alguns fornecedores. Já as informações relativas à existência ou não de conhecimento técnico total ou parcial da empresa sobre o funcionamento e manutenção dos equipamentos foram obtidas com auxílio dos especialistas, por meio de dados e documentações pertencentes à própria empresa.

A Tabela 55 apresenta a matriz de consequências para as cinco alternativas.

Tabela 5 - Matriz de consequência do problema

Tecnologia	Custo implementação (milhões R\$)	Conhecimento Técnico	Rentabilidade	Tempo de Implementação	Eficiência máxima
Claus	176	3	0	16	96
SuperClaus	200	3	0	22	98
EuroClaus	215	2	0	24	98,5
Scott	270	2	0	30	99,5
SNOx	301	1	1	32	99,9

Fonte: Esta pesquisa (2019).

Ainda na quarta etapa, deve-se selecionar o tipo de problemática. Roy (1996) define quatro possíveis problemáticas, a depender da finalidade do problema. São elas:

- Problemática de escolha ($P.\alpha$): O conjunto de alternativas é reduzido ao máximo, formando um grupo apenas com a(s) melhor(es) alternativa(s). É o caso dos problemas de otimização tradicionais;
- Problemática de classificação ($P.\beta$): Coloca as alternativas em categorias previamente estabelecidas;
- Problemática de ordenação ($P.\gamma$): estabelece um ranking das alternativas em ordem decrescente das preferências do decisor, de forma completa ou parcial;
- Problemática de descrição ($P.\delta$): descreve as ações e suas consequências de maneira a apoiar o processo decisório;

Tendo em vista que o propósito deste estudo é selecionar a opção de tecnologia para recuperação de enxofre que melhor se adeque aos objetivos estabelecidos e apenas uma será utilizada, foi definida a problemática de escolha ($P.\alpha$). É importante ainda, ressaltar a relevância desta etapa no processo de definição do método a ser utilizado, uma vez que, acaba por restringir a gama de métodos encontrados na literatura (DE ALMEIDA, 2013).

3.2.5 Etapa 5 – Identificar fatores não controlados

Esta etapa consiste na última da fase preliminar do framework utilizado. Nela os fatores não controlados devem ser identificados. Para o problema em questão, no entanto, as variáveis foram consideradas de natureza determinística, de maneira que para o presente modelo, não há possíveis estados da natureza que venham a influenciar os valores das consequências.

3.2.6 Etapa 6 – Efetuar modelagem de preferências

Na etapa seis inicia-se a fase de modelagem das preferências e escolha do método a ser utilizado. É válido ressaltar que cada método possui suas particularidades, de maneira que, as características do problema e do decisor devem ser analisadas minuciosamente, visando a escolha do método mais apropriado à resolução do problema (BELTON; STEWART, 2002).

A princípio foi considerado a estrutura de preferências (P,I), uma vez que o decisor se mostrou capaz de explicitar suas preferências através de relações de preferências estritas e indiferença, não havendo incomparabilidades entre os critérios.

Por meio de algumas avaliações a racionalidade do decisor foi definida como compensatória, pois foi percebido que um mau desempenho em um dos critérios poderia ser compensado por um bom desempenho em outro critério. De posse de tais características já foi possível restringir a lista de possíveis métodos a serem utilizados.

Prosseguindo com a análise, os critérios também foram verificados como sendo mutualmente independentes em preferência dado que, a estrutura de preferência condicional no espaço em um determinado critério, fixando o valor de outro critério, é independente deste valor que foi fixado. Após tais constatações, foi escolhido o modelo de agregação aditivo para solução do problema. Dentre os possíveis métodos, foi selecionado o FITradeoff (DE ALMEIDA et al., 2016) para elicitar as preferências do decisor, por possuir uma forte estrutura axiomática, tendo como base o Tradeoff tradicional (KEENEY; RAIFFA, 1976), e se tratar de um método interativo e flexível, em que o decisor participa integralmente do processo, e o esforço cognitivo exigido é menor, reduzindo assim a taxa de inconsistência.

3.2.7 Etapa 7 – Efetuar avaliação intracritério

Nesta etapa é realizada a avaliação intracritério. Para efeito de simplificação, foi considerado que a preferência do decisor é linear para todos os critérios, de maneira que para normalização do valor das consequências foi utilizada a Equação 3.4 abaixo, apresentada por De Almeida (2013):

$$v'_j(a_i) = \frac{v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)}{\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)} \quad \text{Equação 3.4}$$

Em que:

$v_j(a_i)$ é o valor da avaliação da alternativa i para o critério j.

$v'_j(a_i)$ é o valor normalizado da avaliação da alternativa i para o critério j .

$\text{Min } v_j(a_i)$ é o pior desempenho para o critério j .

$\text{Max } v_j(a_i)$ é o melhor desempenho para o critério j .

A normalização e etapas seguintes do modelo foram efetuadas no Sistema de Apoio à Decisão (SAD) baseado no FITradeoff para problemática de escolha, desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento de Sistemas de Apoio à Decisão (CDSID) em sua versão para web (DE ALMEIDA et al., 2019), acessada através do site www.fitradeoff.org/app/. Segundo De Almeida & Ramos (2002) os sistemas de informação tem papel fundamental na estratégia e sucesso das empresas, uma vez que tornam possível a disponibilização de informações com maior precisão e agilidade.

Inicialmente, antes do processo de ordenação das constantes de escala e elicitação das preferências, a matriz de consequências é inserida no SAD, como exibido na Figura 7.

Figura 7 - Tela inicial FITradeoff Web-Based

The screenshot displays the FITradeoff Web-Based interface. The header includes the CDSID logo, the text 'FU-TIENO-WT1 - Flexible and Interactive Tradeoff', and a 'Sign Out' button. The main content area is divided into two panels. The left panel, titled 'Input Values', contains two tables. The first table, 'Criteria', lists four criteria: 'Custo de implementacao (milhões)', 'Conhecimento técnico', 'Rentabilidade', and 'Eficiência máxima'. The second table, 'Consequence Matrix', lists five alternatives: 'Claus', 'SuperClaus', 'EuroClaus', 'Scott', and 'Snox'. The right panel, titled 'Initial Order', shows a list of criteria with a 'No Selection' button. Below this, there are buttons for 'Step 1 (Ordering the Criteria Scaling Constants)' and 'Step 2 (Flexible Elicitation)'. At the bottom right, there is a 'Value of Equivalence Distance' field with a value of 0.01. The footer contains contact information for the Federal University of Pernambuco and the FITradeoff logo.

Criteria	Custo de implementacao (milhões)	Conhecimento técnico	Rentabilidade	Eficiência máxima
0-ContMin; 1-ContMax; 2-DiscMin; 3-DiscMax	3	0		
Weights				
type	1	1	1	
a				
b				
c	3	2	0	

Alternatives	Claus	SuperClaus	EuroClaus	Scott	Snox
Consequence Matrix	176	200	215	270	301
	3	3	2	2	1
	0	0	0	0	1

Fonte: Esta pesquisa (2019)

3.2.8 Etapa 8 – Efetuar avaliação intercritério

Na etapa 8 é feita a avaliação intercritério. No método FITradeoff inicialmente é realizada a ordenação das constantes de escala, em que uma situação hipotética é apresentada ao decisor, onde todos os critérios aparecem com o pior desempenho. Como exemplificado na figura 8.

Figura 8 - Tela da ordenação das constantes de escala no SAD FITradeoff Web-Based

Holistic Evaluation

I. Consider a hypothetical alternative:

Consequence of Hypothetical Alternative

Criterion	Best Outcome (Bi)	Worst Outcome (Wi)
C1	176	301
C2	3	1
C3	1	0
C4	16	32
C5	99.9	96

Note :

Wi is the worst outcome of criterion Ci

Bi is the best outcome of criterion Ci

Step 2 (Flexible Elicitation)

II. Now suppose that you can improve the performance of this alternative in only ONE of the criteria to the maximum value. Which criteria would you choose?

Note: Select the criteria to see the changes.

C1 - Custo de implementacao (milhões);

C2 - Conhecimento técnico

C3 - Rentabilidade do produto

C4 - Tempo de Implementacao

C5 - Eficiência máxima

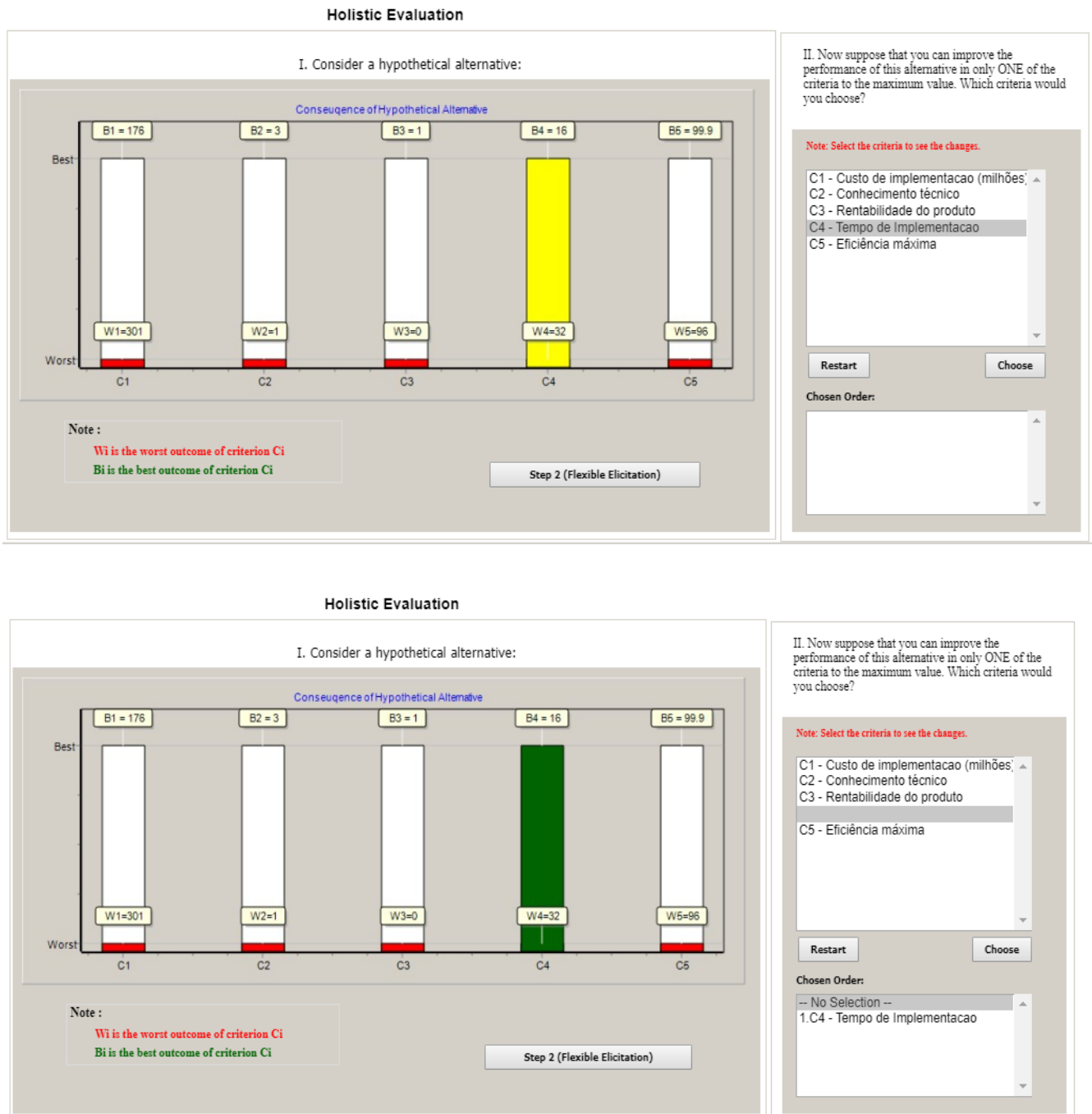
Restart Choose

Chosen Order:

Fonte: Esta pesquisa (2019)

O decisor é então questionado sobre qual critério deseja elevar à avaliação máxima, tendo em vista que todos os outros possuem o mínimo desempenho, e desta maneira as constantes de escala são gradativamente ordenadas, como exibido nas Figura 9 e Figura 10.

Figura 9 - Etapas iniciais da ordenação das constantes de escala no SAD FITradeoff Web-Based



Fonte: Esta pesquisa (2019)

Figura 10 - Etapa final da ordenação das constantes de escala no SAD FITradeoff Web-Based

Holistic Evaluation

I. Consider a hypothetical alternative:

Consequence of Hypothetical Alternative

Best

Worst

C1 C2 C3 C4 C5

Note :

Wi is the worst outcome of criterion Ci

Bi is the best outcome of criterion Ci

Do you agree with the final order found?

Yes No

Step 2 (Flexible Elicitation)

II. Now suppose that you can improve the performance of this alternative in only ONE of the criteria to the maximum value. Which criteria would you choose?

Note: Select the criteria to see the changes.

Restart Choose

Chosen Order:

- No Selection --
- 1.C4 - Tempo de Implementacao
- 2.C5 - Eficiencia máxima
- 3.C1 - Custo de implementacao (milhões)
- 4.C3 - Rentabilidade do produto
- 5.C2 - Conhecimento técnico

Fonte: Esta pesquisa (2019)

Tabela 6 - Ordenação das constantes de escala

Ordem	Crêterios
1�	Tempo de Implementação
2�	Eficiência máxima
3�	Custo
4�	Rentabilidade
5�	Conhecimento Técnico

Fonte: Esta pesquisa (2019).

Em seguida é explorado o espaço de consequências. Nesta fase são expostas ao decisor duas situações hipotéticas (consequências A e B) por vez, como exibido na Figura 11. Estes cenários irão mostrar ao decisor casos em que um dos cr terios possui avaliação maximizada ou intermediária e os demais possuem avaliação mínima, e este deve declarar sua preferência, indiferença ou que deseja não responder, de acordo com as consequências exibidas. Ao responder tais questionamentos, o decisor está fornecendo equações ou inequações que funcionarão como restrições do problema de programação linear.

Figura 11 - Exploração do espaço de consequências no SAD FITradeoff Web-Based

Which consequence do you prefer?
Answer the question by choosing one option

Consequence A

C1		X1 = 24
C2		W2 = 96
C3		W3 = 301
C4		W4 = 0
C5		W5 = 1

Consequence B

		B1 = 16
		B2 = 99.9
		B3 = 176
		B4 = 1
		B5 = 3

Note:

Wi is the worst outcome of criterion Ci
Xi is an outcome in between best and worst of criterion Ci
Bi is the best outcome of criterion Ci

Options:

☐ Consequence A
☐ Consequence B
☐ Indifferent
☐ No Answer

OK

Number of Questions Answered: 0
Number of Potentially Optimal Alternatives: 4

Show Present Result

Chosen Order:

-- No Selection --

C1 - Tempo de Implementacao
 C2 - Eficiência máxima
 C3 - Custo de implementacao (milhões)
 C4 - Rentabilidade do produto
 C5 - Conhecimento técnico

Fonte: Esta pesquisa (2019)

Para o caso exibido na Figura 11, por exemplo, o decisor respondeu preferir a situação exibida. Neste caso, foi adicionado ao problema de programação linear a restrição exibida na Equação 3.5, em que $v_1(x'_1)$ representa o valor normalizado da consequência intermediária mostrada para o critério 1 (Tempo de implementação).

$$k_1 v_1(x'_1) > k_5 \quad \text{Equação 3.5}$$

A cada pergunta respondida, o problema é rodado para todas as alternativas potencialmente ótimas, na tentativa de encontrar a solução. A exploração do espaço de consequências é realizada até que a alternativa ótima seja encontrada ou até quando o decisor julgar apropriado.

3.2.9 Etapa 9 – Avaliação das alternativas

As alternativas podem ser avaliadas ao final através do próprio SAD, quando o resultado é encontrado, e as informações a respeito da solução ótima podem ser analisadas, ou durante o processo de elicitação, através da visualização dos resultados parciais. As informações parciais podem ser visualizadas na forma de tabelas por meio do software ou exportação das informações para excel, onde os dados exibidos nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são disponibilizados **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 7 - Informação parcial à respeito das constantes de escala

	K (Tempo de Implementação)	K (Eficiência máxima)	K (Custo de implementação (milhões))	K (Rentabilidade do produto)	K (Conhecimento técnico)	Maximum Value
Claus	0,5	0,25	0,25	0	0	0,75
SuperClaus	0,367942264	0,367942264	0,264115473	0	0	0,6321
EuroClaus	0,493410908	0,493410908	0,013178183	0	0	0,5721
Snox	0,291066973	0,291066973	0,208933027	0,208933027	0	0,5

Fonte: Esta pesquisa (2019).

Tabela 8 - Espaço de possíveis valores para as constantes de escala

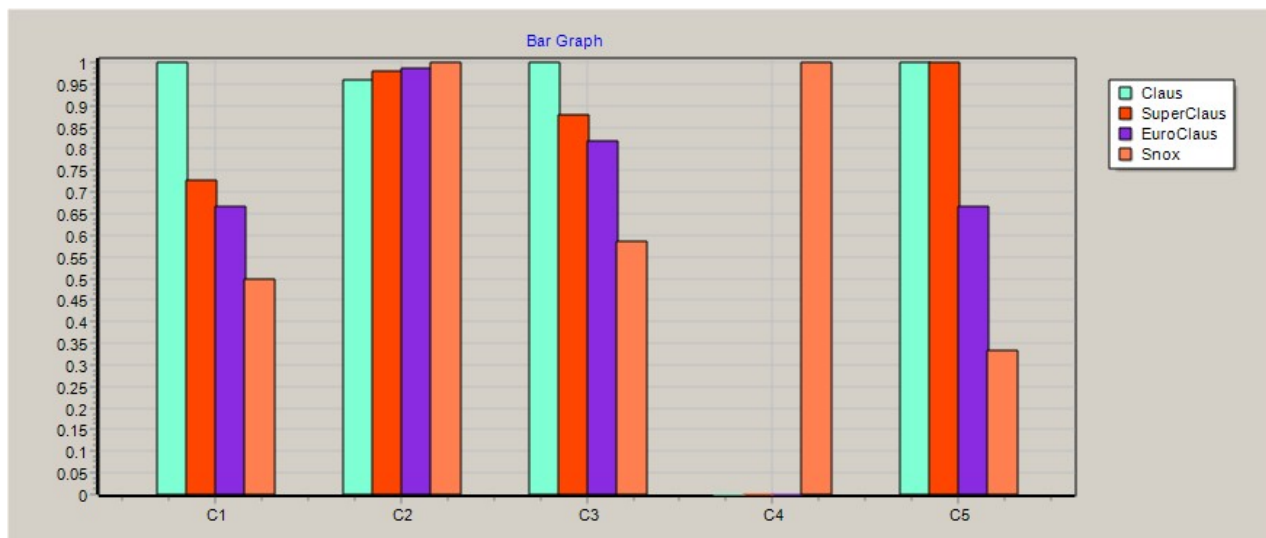
	K (Tempo de Implementacao)	K (Eficiência máxima)	K (Custo de implementacao (milhões))	K (Rentabilidade do produto)	K (Conhecimento técnico)
Maximum	0,666666667	0,5	0,333333333	0,25	0,2
Minimum	0,2	0,166666667	0	0	0

Fonte: Esta pesquisa (2019).

No SAD utilizado, a análise das alternativas também pode ocorrer por meio de gráficos, exibidos neste trabalho nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14. O uso de recurso gráfico em softwares vem

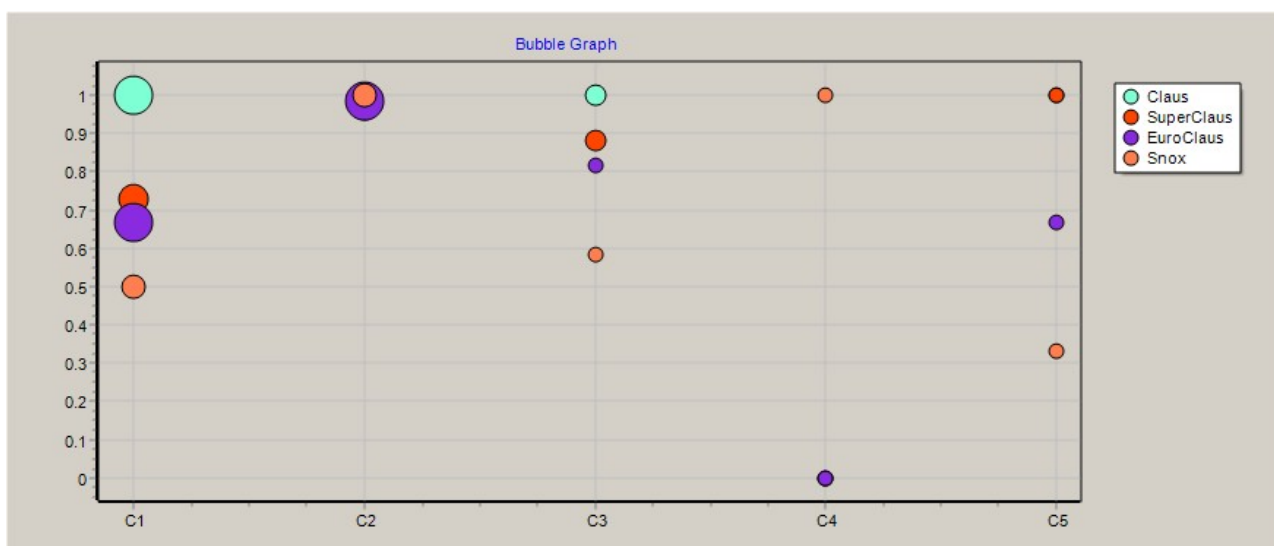
crescendo, bem como sua utilização como ferramenta para auxiliar o processo decisório, uma vez que permitem uma análise minuciosa dos aspectos envolvidos, como demonstrado por De Almeida & Roselli (2017), Roselli, Frej & De Almeida (2018) e Roselli, De Almeida & Frej (2019).

Figura 12 - Visualização dos resultados parciais por meio de gráfico de barras no SAD FITradeoff Web-Based



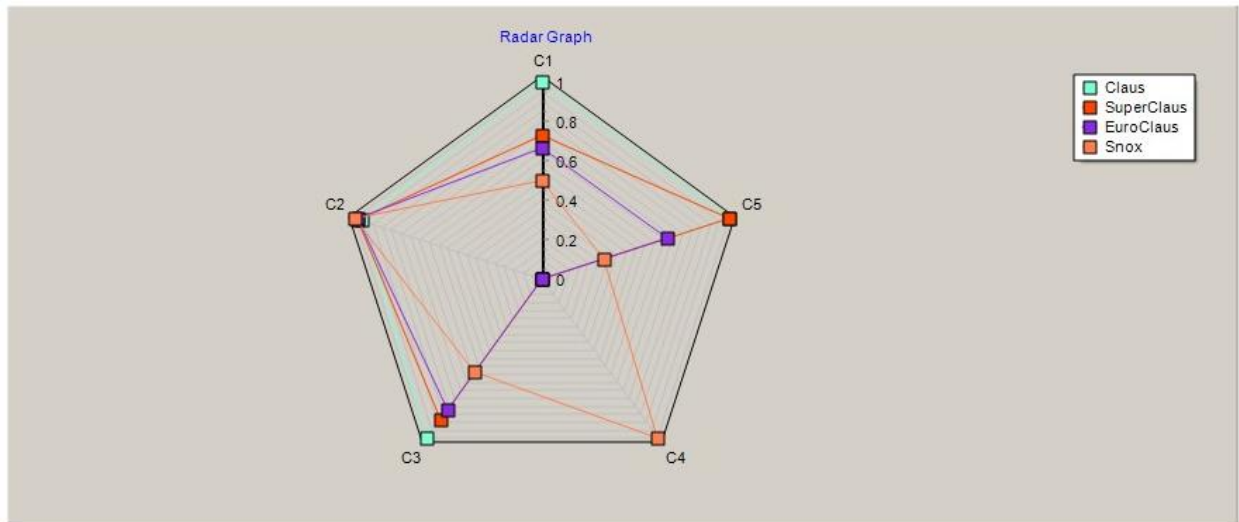
Fonte: Esta pesquisa (2019)

Figura 13 - Visualização dos resultados parciais por meio de gráfico de bolhas no SAD FITradeoff Web-Based



Fonte: Esta pesquisa (2019)

Figura 14 - Visualização dos resultados parciais por meio de gráfico radar no SAD FITradeoff Web-Based



Fonte: Esta pesquisa (2019)

Seguindo o processo indicado pela Tabela 9, uma solução foi encontrada após a quinta pergunta.

Tabela 9 - Respostas da elicitación de preferências

Etapa	Preferência	Consequência A	Consequência B	Alternativas potencialmente ótimas
Pergunta 1	Consequência A	24 Tempo implementação	Conhecimento técnico	4
Pergunta 2	Consequência B	24 Tempo implementação	Eficiência máxima	4
Pergunta 3	Consequência B	97,95 Eficiência máxima	Custo implementação	3
Pergunta 4	Consequência B	238,5 Custo implementação	Rentabilidade do produto	3
Pergunta 5	Consequência A	20 Tempo implementação	Eficiência máxima	1

Fonte: Esta pesquisa (2019).

Tabela 10 - Solução do problema

	K (Tempo de Implementação)	K (Eficiência máxima)	K (Custo de implementação)	K (Rentabilidade do produto)	K (Conhecimento técnico)	Maximum Value
Claus	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,7

Fonte: esta pesquisa (2019).

3.2.10 Etapa 10 – Efetuar análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade pode ser realizada através do espaço de pesos obtido com o uso do método, exibidos na Tabela 1111. Este tende a diminuir à medida que as perguntas são respondidas. De Almeida et al. (2016) ressalta que este tipo de análise é importante para avaliar a robustez da solução.

Tabela 11 - Espaço de pesos

	K (Tempo de Implementação)	K (Eficiência máxima)	K (Custo de implementação)	K (Rentabilidade do produto)	K (Conhecimento técnico)
Máximo	0,533333	0,324324	0,26087	0,230769	0,1875
Mínimo	0,25	0,166667	0,111111	0,0625	0

Fonte: esta pesquisa (2019).

3.2.11 Etapa 11 – Analisar resultados e elaborar recomendação

Nesta etapa os resultados são analisados e uma recomendação é feita com base na solução encontrada. É válido observar que a resposta encontrada para o problema foi condizente com a declaração de preferências do decisor, uma vez que, a medida a ser tomada tem caráter de urgência, e a alternativa recomendada possui o menor tempo de implementação, critério considerado como o mais importante na etapa de ordenação.

3.2.12 Etapa 12 – Implementar decisão

Com base nas informações obtidas durante a modelagem e resolução do problema, foi possível estabelecer, de acordo com os critérios estabelecidos e preferências do decisor, a tecnologia para recuperação de enxofre mais adequada às necessidades atuais da empresa. Foi então definida que a tecnologia Claus era àquela que atendia da melhor maneira os objetivos definidos. A partir das recomendações obtidas, já pode ser iniciado o processo de

implementação do equipamento escolhido, sendo este a tecnologia Claus. No entanto, cabe à empresa tomar a decisão do momento em que esta será implementada.

3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Dada à importância do controle de emissões nos mais diversos setores, bem como a crescente preocupação com a poluição causada no meio ambiente e a extensa gama de aplicações do petróleo e seus derivados, esse trabalho atende o objetivo estabelecido de propor a formulação de um modelo de decisão multicritério para seleção de tecnologia a ser utilizada para recuperação de enxofre no processo de refino do petróleo, visando a redução das emissões de determinados poluentes para atendimento às normas vigentes do país.

Para tal, foi utilizado o framework de 12 etapas de De Almeida (2013) e De Almeida et al. (2015), com o objetivo de estruturar o problema de forma mais consolidada. Por questões de confidencialidade e por exigência da empresa participante do estudo, não foram utilizados os dados originais, mas sim informações na mesma ordem de grandeza, mantendo as proporções entre as alternativas, de maneira a não interferir no desenvolvimento do processo e resolução da problemática.

O decisor neste problema foi o coordenador de operações, pois era este o responsável por tal decisão, podendo assim explicitar às preferências e necessidades da empresa. Reuniões iniciais aconteceram com a presença dos especialistas, que auxiliaram no estabelecimento dos principais elementos envolvidos no contexto, bem como do analista para apoiar a condução do processo. Este tipo de abordagem promove e facilita a compreensão do problema, viabilizando a percepção dos diversos aspectos, enquanto guia o processo de busca das informações relevantes, além de, devido à característica da recursividade, possibilitar a inserção de novas informações a qualquer momento.

No que diz respeito aos parâmetros envolvidos, cabe ressaltar alguns pontos. A etapa de identificação dos critérios foi uma das mais críticas do processo. Além da dificuldade na definição de quais eram aqueles que melhor expressavam os objetivos do problema, houve complicações em estabelecer o tipo de avaliação a ser utilizada, como no caso do critério rentabilidade, por exemplo. Devido à dificuldade de obtenção desta informação de forma mais exata, foram definidos níveis de avaliação. Em relação ao custo, optou-se por utilizar apenas o valor atrelado à implementação dos equipamentos. Apesar de os valores relativos à manutenção poderem exercer certa influência na escolha, estes não foram considerados no estudo, uma vez

que sua estimativa estava atrelada a diversos fatores que impossibilitavam sua determinação. Desta maneira, para simplificação do modelo, apenas os valores de instalação foram considerados.

A determinação do tempo de implementação foi também uma dificuldade, pois devido à fase inicial de concepção do empreendimento, algumas complicações poderiam ser encontradas durante o processo, que acabariam por postergar os prazos estabelecidos. Sendo assim, as avaliações das alternativas neste critério foram estabelecidas a partir de propostas fornecidas pelas empresas participantes da licitação.

Para verificação da racionalidade do decisor foram apresentadas diversas situações hipotéticas a este, a partir das quais se pôde observar que uma boa avaliação em um critério poderia compensar um mau desempenho em outro, caracterizando assim a racionalidade compensatória. Posteriormente foi verificada a mútua independência entre os critérios, por meio da comparação par a par dos mesmos, em que a estrutura de preferência condicional de um critério, fixando o valor de um outro, é independente deste valor que foi fixado.

A partir da definição de tais características, foi possível o estabelecimento do método a ser utilizado. Foi escolhido então o FITradeoff, um método de elicitación flexível e interativo, pois além de possuir uma forte estrutura axiomática, exige um menor esforço cognitivo dos decisores, evitando inconsistências. Outro fator que favorece o uso deste método é a redução no tempo de resolução, fator imprescindível na realidade das organizações atuais, em que os gestores e executivos tem cada vez menos tempo. Tais vantagens ficaram claras durante o processo, com o uso do SAD desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento de Sistemas da Informação e Decisão - CDSID, em que, respondendo a poucas perguntas as alternativas existentes foram sendo gradativamente eliminadas até que após a quinta pergunta a solução foi encontrada. Ao fim do processo a tecnologia apontada como ótima para os fins definidos no problema foi a Claus.

Outro ponto positivo apresentado pelo método utilizado foi a possibilidade de visualização parcial dos resultados, benefício reconhecido pelo decisor, que conseguiu analisar durante o processo o desempenho das alternativas por meio de gráficos. É válido ainda ressaltar que as interações entre decisor, especialistas e analistas foram essenciais para um melhor entendimento do problema e intercâmbio de informações, levando a um aprofundamento do contexto explorado.

Desta maneira, de forma geral a construção do modelo proposto foi satisfatória e atendeu às expectativas, possibilitando estruturar de forma racional a escolha de equipamento a ser utilizado para recuperação de enxofre em refinaria do nordeste.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão feitas as considerações finais e sugestões para trabalho futuros.

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com a qualidade e questões que possam impactar de forma negativa o meio ambiente é crescente na sociedade atual. Nesse contexto, o controle das emissões oriundas dos mais diversos setores tem sido bastante debatido. O presente trabalho propôs então, a construção de um modelo de decisão multicritério para seleção de tecnologia mais adequada para recuperação de enxofre, visando uma redução nas emissões do mesmo, em refinaria do nordeste brasileiro, para atendimento às normas ambientais vigentes no país.

Para construção do modelo foi utilizado o framework de 12 etapas de De Almeida (2013) e De Almeida et al. (2015), com o objetivo de examinar o problema de maneira mais aprofundada e avaliar as possíveis alternativas disponível para tal finalidade, visando fornecer a recomendação mais adequada aos objetivos da empresa.

O trabalho apresentou a problemática pela perspectiva de apenas um decisor, e contou com o auxílio de especialistas para estabelecimentos dos objetivos bem como fornecimento dos dados utilizados no problema. Foi então definido como objetivo principal a redução da taxa de emissão de enxofre no processo de refino do petróleo, do qual derivaram alguns objetivos meio, como: minimização do tempo de execução do projeto, minimização dos custos, maior rentabilidade dos processos, maximização da taxa de recuperação de enxofre e minimização dos custos indiretos. A partir destes objetivos, foram estabelecidos cinco critérios: Custo de implementação, tempo de implementação, conhecimento técnico, eficiência máxima e rentabilidade. Como alternativas, foram considerados cinco tecnologias possíveis: Claus, SuperClaus, EuroClaus, Scott e SNOx.

Foi utilizado como método para resolução do problema, o FITradeoff (DE ALMEIDA et al., 2016), pois este atendia às características do problema e do decisor, além de se mostrar como um método de mais fácil e rápida utilização, atributos desejados na tomada de decisões dentro do âmbito organizacional. Processos muito demorados acabam se tornando inviáveis e levam à inconsistências. De maneira resumida, o modelo proposto alcançou seus objetivos

identificando a tecnologia Claus como a alternativa mais adequada às necessidades expostas no problema.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como observado no item 3.2.1, o problema foi estruturado a partir da perspectiva de apenas um decisor. Uma possibilidade para futuros trabalhos poderia ser a consideração de outros decisores no problema, visando uma decisão mais colaborativa e participativa, a fim de avaliar a problemática a partir de diferentes pontos de vista. Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se então que sejam considerados outros possíveis decisores, de maneira a agregar suas preferências fornecendo uma abordagem mais completa do problema.

Sugere-se também uma avaliação através da problemática de ordenação, o que possibilitaria uma comparação entre as alternativas existentes. Tal análise não foi realizada no projeto em questão, pois a versão utilizada para este fim ainda não estava disponibilizada. Além do fato de que uma comparação entre as alternativas não era o objetivo fim do trabalho, e sim a escolha da alternativa ótima para solucionar o problema estudado. É válido ressaltar, no entanto, que uma comparação entre as alternativas pode trazer uma maior compreensão à cerca do espaço de ações considerado.

REFERÊNCIAS

- ALANNE, K. et al. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 12, p. 1218–1226, 2007.
- ALOINI, D. et al. Technology assessment with IF-TOPSIS: An application in the advanced underwater system sector. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 131, n. June 2017, p. 38–48, 2018.
- ALVAREZ CARRILLO, PAVEL ANSELMO; ROSELLI, L. R. P.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Selecting an agricultural technology package based on the flexible and interactive tradeoff method. *Annals of Operations research*, v. 270, p. 1–16, 2018.
- ANGELIS, A.; KANAVOS, P. Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) for evaluating new medicines in Health Technology Assessment and beyond: The Advance Value Framework. *Social Science and Medicine*, v. 188, p. 137–156, 2017.
- ANGELIS, A.; LANGE, A.; KANAVOS, P. Using health technology assessment to assess the value of new medicines: results of a systematic review and expert consultation across eight European countries. *European Journal of Health Economics*, v. 19, n. 1, p. 123–152, 2018.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 15 out. 2018.
- BALLI, S.; KORUKOĞLU, S. Operating system selection using fuzzy AHP and TOPSIS methods. *Mathematical & Computational Applications*, v. 14, n. 2, p. 119–130, 2009.
- BALTUSSEN, R.; NIESSEN, L. Priority setting of health interventions: The need for multi-criteria decision analysis. *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, v. 4, p. 1–9, 2006.
- BELTON, V.; STEWART, T. Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2002.
- BHANARKAR, A. D. et al. Assessment of contribution of SO₂ and NO₂ from different sources in Jamshedpur region, India. *Atmospheric Environment*, v. 39, n. 40, p. 7745–7760, 2005.
- BRASIL, Nilo Índio do; SOUSA, Elisabeth Cristina Molina; ARAÚJO, Maria Adelina Santos (Orgs.). Processamento de Petróleo e gás: Petróleo e seus derivados, processamento primário, processo de refino, petroquímica, meio ambiente. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. , 266 p., il., gráfs. tabs. ISBN 9788521619963 (broch.).
- BRASIL. Resolução 382, de 26 de dezembro de 2006. Brasília: CONAMA, 2006.
- BRASIL. Resolução 436, de 26 de dezembro de 2011. Brasília: CONAMA, 2011.
- BÜYÜKÖZKAN, G.; GÖÇER, F.; FEYZIOĞLU, O. Cloud computing technology selection based on interval-valued intuitionistic fuzzy MCDM methods. *Soft Computing*, v. 22, n. 15, p. 5091–5114, 2018.

BYUN, H. S.; LEE, K. H. A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 26, n. 11–12, p. 1338–1347, 2005.

CAMPOS, A. F. *Indústria do petróleo: Desdobramentos e novos rumos da Reestruturação Sul-Americana dos Anos 90*. 2 ed ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

CAVALLARO, F. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, v. 34, n. 7, p. 1678–1685, 2009.

CAVALLARO, F.; ZAVADSKAS, E. K.; STREIMIKIENE, D. Concentrated solar power (CSP) hybridized systems. Ranking based on an intuitionistic fuzzy multi-criteria algorithm. *Journal of Cleaner Production*, v. 179, p. 407–416, 2018.

CHINESE, D.; NARDIN, G.; SARO, O. Multi-criteria analysis for the selection of space heating systems in an industrial building. *Energy*, v. 36, n. 1, p. 556–565, 2011.

CLO, A. *Oil Economics and Policy*. [s.l.] Kluwer Academic Publishers, 2000.

ÇOLAK, M.; KAYA, İ. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, n. August 2016, p. 840–853, 2017.

DA SILVA, F. H. R.; VIEIRA, H. S.; BENAVALLI, L. *Uso Do Método Fittradeoff Em Análise De Investimentos*. n. v, p. 4051–4060, 2017.

DE ALMEIDA, A T; ALMEIDA, J.A.; FREJ, E.A.; SILVA, R.B.; CYRENO, M.W. (2019) FITradeoff Web-based for Choice with Additive Model - Código FU-T1ENO-IT1. Programa Computacional Desenvolvido no CDSID.

DE ALMEIDA-FILHO, A. T.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. S. C. A flexible elicitation procedure for additive model scale constants. *Annals of Operations Research*, v. 259, p. 65–83, 2017.

DE ALMEIDA, A.T., CAVALCANTE, C.A.V., ALENCAR, M.H., FERREIRA, R.J.P., DE ALMEIDA-FILHO, A.T., GARCEZ, T. V. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. New York: Springer, 2015.

DE ALMEIDA, A. T. et al. A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. *European Journal of Operational Research*, v. 250, n. 1, p. 179–191, 2016.

DE ALMEIDA, A. *Processo de Decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas, 2013.

DE ALMEIDA, A. T. DE; RAMOS, F. . *Gestão da Informação na competitividade das organizações*. 2. ed. Pernambuco: Editora Universitária UFPE, 2002.

DE AZEVEDO, A. M. M. *Ciência, tecnologia e demandas ambientais: inovações nos processos*

de refino. Rio de Janeiro: [s.n.].

DEGER, L. et al. Active and uncontrolled asthma among children exposed to air stack emissions of sulphur dioxide from petroleum refineries in Montreal, Quebec: A cross-sectional study. *Canadian Respiratory Journal*, v. 19, n. 2, p. 97–102, 2012.

FAWOLE, O. G.; CAI, X. M.; MACKENZIE, A. R. Gas flaring and resultant air pollution: A review focusing on black carbon. *Environmental Pollution*, v. 216, p. 182–197, 2016.

FREJ, E. A. et al. A Multicriteria Decision Model for Supplier Selection in a Food Industry Based on FITradeoff Method. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, p. 1–9, 2017.

FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. S. C. Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. *Operational Research*, v. 19, p. 1–22, 2019.

GAO, Y. et al. Global atmospheric sulfur deposition and associated impact on nitrogen cycling in ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 1–9, 2018.

GAUTO, M. A. Petróleo S.A. Exploração, produção, refino e derivados. [s.l.] Editora Ciência Moderna, 2011.

HADDAD, B.; LIAZID, A.; FERREIRA, P. A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system. *Renewable Energy*, v. 107, p. 462–472, 2017.

HADIDI, L. A. et al. An optimization model to improve gas emission mitigation in oil refineries. *Journal of Cleaner Production*, v. 118, p. 29–36, 2016.

IMPROTA, G. et al. Use of the AHP methodology in system dynamics: Modelling and simulation for health technology assessments to determine the correct prosthesis choice for hernia diseases. *Mathematical Biosciences*, v. 299, n. June 2017, p. 19–27, 2018.

KANG, T. H. A.; JÚNIOR, A. M. DA C. S.; DE ALMEIDA, A. T. Evaluating electric power generation technologies: A multicriteria analysis based on the FITradeoff method. *Energy*, v. 165, p. 10–20, 2018.

KARIMI, A. R. et al. Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. *International Journal of Environmental Science & Technology*, v. 8, n. 2, p. 267–280, 2011.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. Decision analysis with multiple conflicting objectives: New York: Wiley & Sons, 1976.

KENESSARY, D. et al. Human health cost of hydrogen sulfide air pollution from an oil and gas Field. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, v. 24, n. 2, p. 213–216, 2017.

KIRPPU, H.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. Multicriteria evaluation of carbon-neutral heat-only production technologies for district heating. *Applied Thermal Engineering*, v. 130, p. 466–476, 2018.

MARIANO, J. B. Impactos Ambientais do Refino do Petróleo. Rio de Janeiro, 2005.

MAXIM, A. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy*, v. 65, p. 284–297, 2014.

MINABI, A. et al. Simulating ambient SO_2 dispersion patterns and assessing their health risk in a gas refinery. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 27, n. 3, p. 1197–1206, 2018.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 18 set. 2018.

MONDAL, U.; SEN, S.; SINGH, G. Advances in hydrogen sulphide utilisation: Phase transfer catalysed selective reduction of nitronaphthalene. *RSC Advances*, v. 5, n. 124, p. 102942–102952, 2015.

ODDONE, D. ANP - Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <www.anp.gov.br/images/Palestras/DecioOddone_19-04-2018-FGV.pdf>. Acesso em: 26 out. 2018.

OLIVARES, V.; ODDERSHEDE, A. Technological Options Selection to Produce Ferric Chloride using Analytic Hierarchy Process Enhanced with Fuzzy Logic. *International Conference on Computers Communications and Control*. Anais IEEE, 2018.

OMIDVARBORN, H.; BAAWAIN, M.; AL-MAMUN, A. Ambient air quality and exposure assessment study of the Gulf Cooperation Council countries: A critical review. *Science of the Total Environment*, v. 636, p. 437–448, 2018.

PEKO, I.; GJELDUM, N.; BILIĆ, B. Application of AHP, Fuzzy AHP and PROMETHEE Method in Solving Additive Manufacturing Process Selection Problem. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, v. 25, n. 2, p. 453–461, 2018.

QUELHAS, A. D. et al. Processamento de petróleo e Gás. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

RIABACKE, M.; DANIELSON, M.; EKENBERG, L. State-of-the-art prescriptive criteria weight elicitation. *Advances in Decision Sciences*, v. 2012, 2012.

ROSELLI, L. R. P.; DE ALMEIDA, A. T.; FREJ, E. A. Decision neuroscience for improving data visualization of decision support in the FITradeoff method. *Operational Research*, v. 19, p. 1–21, 2019.

ROY, B. Multicriteria methodology for decision aiding. In: *Nonconvex optimization and its applications*. New York: Springer, 1996.

SADARE, O. O.; OBAZU, F.; DARAMOLA, M. O. Biodesulfurization of Petroleum Distillates—Current Status, Opportunities and Future Challenges. *Environments*, v. 4, n. 4, p. 85, 2017.

SAN CRISTÓBAL, J. R. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The VIKOR method. *Renewable Energy*, v. 36, n. 2, p. 498–502, 2011.

ŞENGÜL, Ü. et al. Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, v. 75, p. 617–625, 2015.

SHIE, R. H.; YUAN, T. H.; CHAN, C. C. Using pollution roses to assess sulfur dioxide impacts in a township downwind of a petrochemical complex. *Journal of the Air and Waste Management Association*, v. 63, n. 6, p. 702–711, 2013.

SOLTANIEH, M. et al. A review of global gas flaring and venting and impact on the environment: Case study of Iran. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 49, p. 488–509, 2016.

STREIMIKIENE, D. et al. Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 5, p. 3302–3311, 2012.

THOKALA, P. et al. Multiple criteria decision analysis for health care decision making - An introduction: Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, v. 19, n. 1, p. 1–13, 2016.

TRIGGIA, A. A. et al. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TROLDBORG, M.; HESLOP, S.; HOUGH, R. L. Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 1173–1184, 2014.

VARJANI, S. J.; GNANSOUNOU, E.; PANDEY, A. Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms. *Chemosphere*, v. 188, p. 280–291, 2017.

VOUDRIAS, E. A. Technology selection for infectious medical waste treatment using the analytic hierarchy process. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 66, n. 7, p. 663–672, 2016.

XU, J.; ZHANG, J.; XU, Q. Plant-Wide Scheduling for Profitable Emission Reduction in Petroleum Refineries. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 57, n. 29, p. 9471–9488, 2018.

ZHANG, Z. et al. Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta. *Environmental Pollution*, v. 238, p. 452–461, 2018.