

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**GABRIEL ENSINAS VALIÑO PEDREIRA**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DO GLP COMO FONTE DE  
TRANSIÇÃO EM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Campo Grande

2023

**GABRIEL ENSINAS VALIÑO PEDREIRA**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DO GLP COMO FONTE DE  
TRANSIÇÃO EM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistema de Decisão Baseado em Computação Flexível

**ORIENTADOR:** Marcio Luiz Magri Kimpara

**CO-ORIENTADOR:** João Batista Sarmiento dos Santos Neto

Campo Grande

2023

GABRIEL ENSINAS VALIÑO PEDREIRA

## **ANÁLISE MULTICRITÉRIO DO GLP COMO FONTE DE TRANSIÇÃO EM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara, UFMS

Doutor pela Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Batista Sarmiento dos Santos Neto, UFMS

Doutor pela Universidade Federal de Pernambuco – Recife, Brasil

Profa. Dra. Carolina Lino Martins, UFMS

Doutora pela Universidade Federal de Pernambuco – Recife, Brasil

Prof. Dr. Wesley Nunes Gonçalves, UFMS

Doutor pela Universidade de São Paulo – São Carlos, Brasil

Prof. Dr. Lucas Borges Leal da Silva, UFRN

Doutor pela Universidade Federal de Pernambuco – Recife, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Edson Antônio Batista

Campo Grande, (Julho de 2023).

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, por me dar vida e condições para continuar no desenvolvimento da minha carreira e na busca pelos meus sonhos.

À minha família, por todo apoio possível prestado a mim, em especial à minha mãe que me acompanhou de perto em todos os momentos desta minha jornada, sendo meu porto seguro nas horas mais difíceis que enfrentei.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul, FUNDECT, pela provisão da bolsa de mestrado, sempre incentivando o desenvolvimento de pesquisadores no estado.

Ao Prof. Dr. João Onofre Pereira Pinto e ao Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara pela orientação no trabalho, por todo aprendizado, suporte e camaradagem ao decorrer dos estudos. Sempre que precisamos nos reunir, prontamente estiveram disponíveis, mesmo que durante os finais de semana.

Ao Prof. Dr. João Batista Sarmiento dos Santos Neto e à Profa. Dra. Carolina Lino Martins, que me acompanham desde a graduação e que me incentivaram a ingressar no mestrado e me deram todo o suporte durante o desenvolvimento da pesquisa. Sem eles, eu, com certeza, não teria chegado até aqui.

## RESUMO

A utilização do gás liquefeito de petróleo (GLP) vem crescendo conforme as mudanças legislativas quanto ao seu uso se atualizam. Sendo visto como um combustível de transição, existem interesses por projetos que estudem a viabilidade da aplicação do GLP em relação a outras fontes energéticas. Este trabalho propõe um modelo de decisão multicritério para avaliar o potencial de uso do GLP em grupos geradores de energia elétrica, ranqueando combustíveis com base nas preferências de um decisor. Para tanto, foi utilizado o método FITradeoff, que se mostrou uma ferramenta eficaz e prática para resolver diversos problemas de decisão envolvendo multicritérios. Através do Value Focused Thinking (VFT), foi possível extrair os valores de dois decisores, individualmente, e selecionar 6 critérios de avaliação, sendo eles: custo de operação, custo de investimento, custo de manutenção, troca de estoque, disponibilidade de mão de obra qualificada para manutenção corretiva e nível de emissão de CO<sub>2</sub>. Os decisores são: um empresário que deseja adquirir um gerador de energia elétrica de 150KVA para regime de *standby* e um engenheiro em geradores. Por fim, seguindo as preferências individuais de cada decisor, ambos chegaram no mesmo resultado: o diesel foi o primeiro no ranking de combustíveis para geradores, seguido do GLP e do gás natural, respectivamente. Depois de concluída a análise de sensibilidade, foi possível validar a robustez do modelo e a validação do resultado por meio de aplicação a dois decisores separadamente.

**Palavras-chave:** GLP, Gerador elétrico, Avaliação de combustível, MCDM/A, FITradeoff, VFT.

## **ABSTRACT**

The use of liquefied petroleum gas (LPG) is growing as legislative changes regarding its use are updated. Seen as a transitional fuel, there is interest in projects that study the feasibility of applying LPG compared to other energy sources. This work proposes a multicriteria decision model to assess the potential use of LPG in power generators, ranking fuels based on a decision maker's preferences. The FITradeoff method was employed, proving to be an effective and practical tool for solving various multicriteria decision problems. Through Value Focused Thinking (VFT), values were extracted from two decision makers individually, and 6 evaluation criteria were selected: operating cost, investment cost, maintenance cost, stock exchange, availability of qualified labor for corrective maintenance, and CO2 emission level. The decision makers are an entrepreneur looking to acquire a 150KVA standby power generator and an engineer in power generators. Ultimately, following each decision maker's preferences, both arrived at the same result: diesel ranked first in the fuel ranking for generators, followed by LPG and natural gas, respectively. After completing the sensitivity analysis, the model's robustness was validated, and the result was confirmed through separate application to two decision makers.

**Keywords: LPG, Electric generator, Fuel evaluation, MCDM/A, FITradeoff, VFT.**

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.1.</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.2.</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.</b>	<b>ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.</b>	<b>MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.</b>	<b>IMPORTÂNCIA DO GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.</b>	<b>AVALIAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.</b>	<b>GRUPOS GERADORES EM STANDBY.....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.</b>	<b>PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6.</b>	<b>O VALUE-FOCUSED THINKING COMO FERRAMENTA DE ESTRUTURAÇÃO DE PROBLEMAS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.7.</b>	<b>DECISÃO MULTICRITÉRIO.....</b>	<b>22</b>
<b>2.8.</b>	<b>DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DO USO DE FONTES VARIADAS DE ENERGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.9.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.</b>	<b>ESTRUTURAÇÃO DO VFT.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>ETAPA 1 – ENTREVISTA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.2.</b>	<b>ETAPA 2 – ESTRUTURAÇÃO DE VALORES .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>ETAPA 3 – CRIAR ALTERNATIVAS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1.4.</b>	<b>ETAPA 4 – AVALIAR E SELECIONAR ALTERNATIVAS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.</b>	<b>FITRADEOFF .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.</b>	<b>ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....</b>	<b>37</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.</b>	<b>OS DECISORES .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.</b>	<b>APLICAÇÃO DO VFT .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>VFT - ETAPA 1 .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>VFT - ETAPA 2 .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>VFT - ETAPA 3 E 4 .....</b>	<b>44</b>

<b>4.3.</b>	<b>APLICAÇÃO DO FITRADEOFF .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.1.</b>	<b>FITRADEOFF - ETAPA 1 .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>FITRADEOFF - ETAPA 2 .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>FITRADEOFF - ETAPA 3 .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3.4.</b>	<b>FITRADEOFF - ETAPA 4 .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.5.</b>	<b>FITRADEOFF - ETAPA 5 .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.6.</b>	<b>FITRADEOFF - ETAPA 6 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4.</b>	<b>ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4.1.</b>	<b>DISCUSSÃO SOBRE A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....</b>	<b>54</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Repartição da Oferta Interna de Energia.....	15
Figura 2 - Consumo final de fontes de energia no Brasil .....	15
Figura 3 - Relações entre o contexto de decisão e os objetivos .....	21
Figura 4 - Diagrama da Pesquisa.....	31
Figura 5 - Aplicação FITradeoff no Software .....	36
Figura 6 – Captura de tela do menu de ordenação dos critérios no software .....	47
Figura 7 - Elicitação por decomposição .....	49
Figura 8 - Diagrama de Hasse .....	51
Figura 9 – Constantes de escala do decisor empresário .....	51
Figura 10 – Constantes de escala do decisor engenheiro .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de métodos multicritério .....	27
Tabela 2 - Distribuição dos critérios .....	28
Tabela 3 – Perguntas sugeridas para identificar objetivos .....	33
Tabela 4 - Perguntas feitas o decisor .....	40
Tabela 5 - Objetivos fundamentais e meios extraídos do decisor .....	42
Tabela 6 - Descrição do Critério 4.....	43
Tabela 7 - Descrição do critério 5 .....	43
Tabela 8 - Descrição de critérios para o FITradeoff.....	45
Tabela 9 - Matriz de consequências .....	46
Tabela 10 - Ordem dos critérios pelo decisor empresário .....	47
Tabela 11 - Ordem dos critérios pelo decisor engenheiro .....	48
Tabela 12 - Escolhas do decisor empresário no processo de elicitação .....	49
Tabela 13 - Escolhas do decisor engenheiro no processo de elicitação .....	50
Tabela 14 - Primeira análise de sensibilidade do decisor empresário .....	52
Tabela 15 - Primeira análise de sensibilidade do decisor engenheiro .....	53
Tabela 16 - Segunda análise de sensibilidade do decisor empresário .....	53

## **LISTA DE ABREVIACES**

AHP - Analytic Hierarchy Process  
ECU - Unidade De Controle Eletrnico  
EUA – Estados Unidos das Américas  
GEE - Gases de Efeito Estufa  
GLP – Gás liquefeito de petróleo  
GN – Gás Natural  
GNV – Gás Natural Veicular  
GDM - Group Decision Making  
HED - Híbrido de Eletricidade E Diesel  
HEC - Híbrido de Eletricidade com gás natural Comprimido  
HYD – Célula de hidrogênio  
IFCI - Intuitionistic Fuzzy Choquet Integral  
IVIFS - Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Sets  
MCDA - Multi-Criteria Decision Analysis  
MCDM – Multi-Criteria Decision-Making  
MCDM/A – Multi-Criteria Decision-Making/Analysis  
OMS – Organização Mundial de Saúde  
PROMETHEE - Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation  
SAD - Sistema de Apoio a Decisão  
TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution  
VFT – Value Focused Thinking  
VIKOR - VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje  
WSM - Weighted Sum Method

## 1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis de transição desempenham um papel crucial na busca por uma matriz energética mais sustentável. Eles são importantes porque ajudam a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuindo assim o impacto negativo das atividades humanas no meio ambiente e na mudança climática (IPCC, 2018). Esses combustíveis oferecem uma alternativa temporária aos combustíveis fósseis convencionais, como o carvão e o petróleo, que são fontes não renováveis e altamente poluentes. Ao adotar combustíveis de transição, como o gás liquefeito de petróleo, o gás natural, o biogás, o hidrogênio e o biodiesel, pode-se diminuir significativamente a emissão de poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e partículas nocivas (WLPGA, 2018).

O gás liquefeito de petróleo (GLP) é uma mistura de gases dissolvidos no petróleo, sendo basicamente composto por propano e butano. Suas principais vantagens, segundo autores (WATSON e GOWDIE, 2000), vêm da baixa emissão de poluentes quando em combustão, chegando a uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> de 7% a 10% em relação à gasolina. Além disso, o GLP é uma fonte de energia versátil, que pode ser utilizado em diversos setores, como transporte, indústria, agricultura e residências. Ele pode substituir facilmente outros combustíveis fósseis em aplicações como aquecimento residencial e comercial, cocção de alimentos, geração de energia elétrica e combustível veicular. Sua versatilidade permite uma transição mais suave, pois não exige grandes mudanças na infraestrutura existente.

No Brasil, em 8 de fevereiro de 1991, o Congresso Nacional aprovou a Lei 8.176, que restringiu a comercialização e uso do GLP, sendo proibido seu uso em motores de qualquer tipo e outras aplicações industriais (BRASIL, 1991). Com o tempo, a lei se manteve e o GLP continuou com sua aplicação restrita ao gás de cozinha e sua produção e comercialização monopolizada por poucas empresas, o que acabou aumentando seu custo. No entanto, desde 2019, está pendente um projeto de lei que busca revogar as restrições impostas ao GLP e trazer de volta a liberdade das vastas aplicações que possui e abrir o mercado a novas empresas.

Este fato abriria a possibilidade de fabricação de novos produtos que utilizem o GLP como combustível, como um secador de sementes que (SAHA et al., 2020) utilizou como base de estudo comprovando a viabilidade técnica e financeira e o aumento da qualidade da moagem ao utilizar o GLP como energia fonte. Outro exemplo foi um gerador elétrico baseado em GLP controlado por uma unidade de controle eletrônico (ECU) que foi projetado por (ADIYASA et al., 2018) e mostrou bons resultados para geração.

Nesse contexto, são fundamentais estudos que comparem a eficiência da aplicação de GLP no Brasil enquanto combustível de transição, com outras fontes de energia como gasolina, diesel, etanol e biodiesel. Assim, torna-se relevante a utilização de metodologias que apoiem empresas e interessados na decisão de utilizar ou não o GLP, levando em consideração uma série de fatores. Nesse contexto, destacam-se os modelos de decisão multicritério (MCDM), que são utilizados onde há dificuldade em representar todos os objetivos conflitantes de uma decisão, trazendo a possibilidade de analisar seu uso, ponderando suas vantagens e desvantagens em comparação com os critérios, considerando o grau de importância para eles (DE ALMEIDA, 2013).

Portanto, este estudo busca avaliar o GLP como combustível de transição em comparação com outras fontes de energia, por meio de um método multicritério de apoio à decisão. Para tanto, será feita uma análise utilizando o procedimento flexível e interativo FITradeoff (Flexible and Interactive Tradeoff method) para problemática de ordenação, que utiliza informações parciais das preferências do decisor (DE ALMEIDA et al., 2016). O método foi escolhido por se tratar de um problema com racionalidade compensatória, por ser simples e intuitivo de aplicar, além de sua flexibilidade e robustez.

Mais especificamente, o trabalho busca avaliar combustíveis para grupos geradores de energia elétrica, uma vez que essa poderia ser uma das novas aplicações possíveis no Brasil, comparando o GLP à outras fontes alternativas disponíveis, contando com um decisor cliente e um engenheiro da área para guiar o estudo.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral realizar uma análise do GLP como combustível de transição em um gerador de energia elétrica, desenvolvendo um modelo de decisão multicritério para ordenação de fontes de energia, onde os critérios e alternativas possam ser determinados através da examinação dos valores e objetivos de um ou mais decisores.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, apresentado no tópico anterior, espera-se alcançar paralelamente os seguintes objetivos específicos:

- I. Realizar a estruturação de problema, através dos valores e objetivos dos decisores;
- II. Levantar e validar critérios que busquem representar os valores e objetivos estratégicos dos decisores;
- III. Realizar testes com aplicação do modelo a dois decisores.
- IV. Realizar análise de sensibilidade para verificar a robustez do modelo.

Para se cumprir com os objetivos específicos e geral listados, é necessário a criação de uma estrutura de trabalho, que irá elucidar e aprofundar o entendimento sobre algumas concepções. Essas concepções são tratadas em diferentes etapas deste trabalho. O próximo tópico explica a estrutura usada para construir esta pesquisa para que ela seja melhor compreendida.

## **1.2. Estrutura do trabalho**

O trabalho está estruturado em 5 capítulos 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 dos temas da matriz energética brasileira, de avaliação de combustíveis para grupo geradores de energia elétrica, das aplicações do gás liquefeito de petróleo (GLP), processos de tomada de decisão, do Pensamento Focado em Valor (VFT), decisão multicritério e sistemas de apoio a decisão. Além disso, também traz uma revisão da literatura com o mapeamento sobre métodos multicritério que fazem avaliação de fontes de energia (combustíveis).

O Capítulo III apresenta a estruturação do problema utilizando o VFT e os valores dos decisores e, posteriormente, a construção de um modelo multicritério para um problema de ordenação de combustíveis para grupos geradores de energia elétrica, com base no procedimento de FITradeoff e sua elicitação flexível.

O Capítulo IV apresenta a aplicação do VFT e a análise do FITradeoff para problemática de ordenação, com aplicações e discussões.

O Capítulo V, por fim, apresenta os principais resultados obtidos deste trabalho e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

Este tópico traz conceitos relacionados aos temas da matriz energética brasileira, de avaliações de combustíveis, processos de tomada de decisão, do VFT e de decisões multicritério. Por fim, é apresentada uma revisão de literatura com o mapeamento sobre métodos multicritério que fazem avaliação de fontes de energia (combustíveis).

### 2.1. Matriz Energética do Brasil

Previamente, é importante diferenciar entre as expressões "matriz energética" e "matriz elétrica". Esses conceitos divergem da ideia que diz que uma das duas variáveis físicas necessárias para descrever com precisão a interação – sempre recíproca – entre duas coisas ou sistemas físicos é a energia (BP, 2022). Por exemplo, é necessária energia para acender uma luz, fazer comida e em transportes. A matriz energética é o conjunto de fontes das quais essa energia é derivada. Em outras palavras, simboliza o conjunto de fontes que podem ser utilizadas para suprir a demanda de energia de uma determinada nação, estado ou região do mundo. A matriz elétrica é composta pelas fontes disponíveis apenas para geração de energia elétrica.

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) afirma que os efeitos combinados da poluição do ar ambiente e da poluição do ar doméstico estão associados a 7 milhões de mortes prematuras anualmente. Além da poluição do ar, há uma preocupação com as reservas energéticas e da expansão do consumo de energia mundial, uma vez que grande parte dos recursos não se renovam, ou seja, tendem a acabar no futuro. Por isso, há uma tendência entre os países e continentes do mundo para o desenvolvimento de geração e consumo de fontes renováveis e sustentáveis de energia. De acordo com o Balanço Energético Nacional do Brasil (EPE, 2022), a geração de energia por fontes renováveis vem crescendo anualmente, com destaque para a energia eólica. A Figura 1 mostra a parcela de cada fonte na Oferta Interna de Energia. O Brasil, em 2021, possuía 44,7% de oferta interna de energia de fontes renováveis, um valor bem expressivo se comparado ao restante do mundo em 2019, que tinha em média 14,1% de oferta por fontes renováveis (EPE, 2022). Já o consumo final, ainda possui grande participação de fontes fósseis, não renováveis. A Figura 2 mostra o consumo final de algumas fontes de energia no Brasil no ano de 2021, com a eletricidade sendo responsável por 18,7% do consumo, o diesel por 17,7%, o bagaço de cana por 10,8%, a lenha por 7,0%, o gás natural por 6,2%, o Etanol 5,9%, o GLP por 3,2%, a lixívia por 2,8%, o querosene por 1,0%, óleo combustível por 0,9% e as outras fontes representando 17,5%.

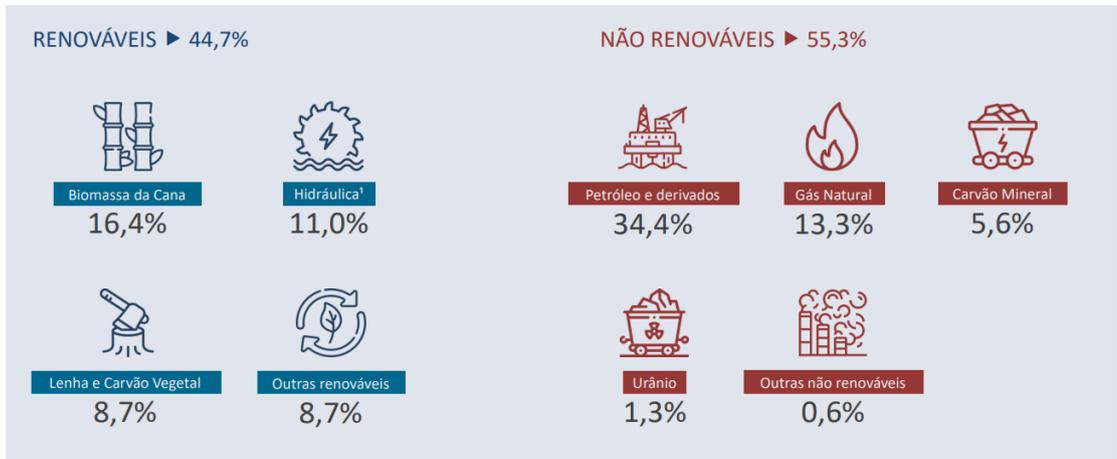


Figura 1 - Repartição da Oferta Interna de Energia

Fonte: EPE, 2022.

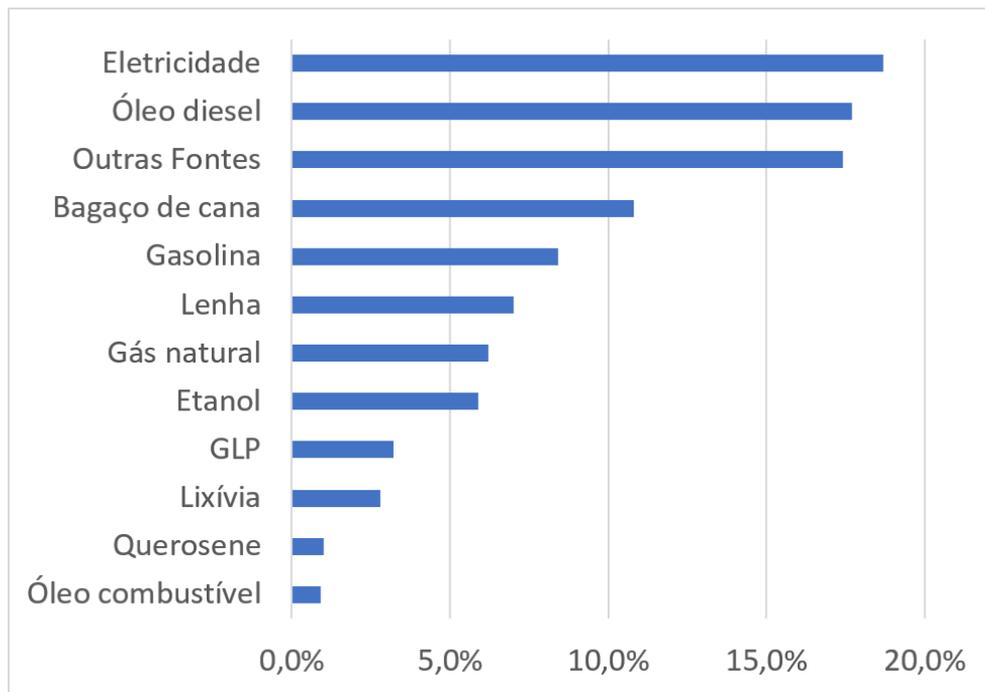


Figura 2 - Consumo final de fontes de energia no Brasil

Fonte: Adaptado de EPE, 2022.

## 2.2. Importância do Gás Liquefeito de Petróleo

O GLP, devido às propriedades e benefícios únicos do combustível em relação a outros combustíveis, tanto fósseis quanto não fósseis, está excepcionalmente bem posicionado para ajudar a equilibrar as metas ambientais, econômicas e sociais do mundo durante o longo período

de transição energética que antecede o objetivo final de se chegar a um sistema de energia totalmente baseado em fontes renováveis e limpas (OECD, 2017). Para atravessar as várias décadas que serão necessárias para que alternativas de baixo carbono com preços competitivos sejam desenvolvidas e comercializadas em grande escala, o mundo ainda precisará consumir GLP e outros combustíveis fósseis (OMS, 2016).

Para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> o mais rapidamente e com um menor custo, a próxima transição para energia de baixo carbono precisará incluir uma mudança para energia não fóssil e uma mudança temporária para fontes de energia fósseis de baixo carbono. Como o carvão, o combustível com o maior teor de carbono, e os derivados de petróleo mais pesados podem ser substituídos por GLP e gás natural, isso pode trazer reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa (OMS, 2016).

O GLP e o gás natural são os dois combustíveis com menor intensidade de carbono. Como o GLP é principalmente um subproduto do processamento de gás natural, o fornecimento de GLP aumentará de qualquer maneira com o aumento da produção de gás (OECD, 2017). O GLP quase não produz fuligem e, em comparação com a maioria dos outros combustíveis não renováveis, apresenta baixas emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados e óxidos de nitrogênio (SHAH, 2017).

Continua sendo uma dificuldade significativa fornecer energia moderna para bilhões de pessoas que vivem em países em desenvolvimento que ainda são obrigadas a usar querosene e combustíveis convencionais obsoletos e impuros. Nessas nações, aumentar o uso doméstico de GLP, um combustível limpo, eficiente e útil para cozinhar e aquecer, pode ajudar significativamente na erradicação da pobreza energética e ter efeitos positivos no meio ambiente, na saúde humana e no desenvolvimento (GHARAIIBEH et al., 2021). O ritmo e a natureza da transição energética serão fortemente influenciados pelas ações governamentais, portanto, são necessárias variadas avaliações das fontes de energia e seus impactos.

### **2.3. Avaliação de fontes de energia**

Devido à preocupação mundial com o consumo e geração de energia, as fontes de energia precisam ser analisadas minuciosamente a fim de se garantir um futuro melhor para a população, no entanto, muitas são as áreas de análise dessas fontes. Dentre elas, é importante destacar as análises de políticas governamentais (KIM et al., 2021; BELLO e HUERTA, 2007; HEPBASLI, 2003), que trazem a importância do governo nesse processo transitório de fontes

de energia e de como o incentivo nacional e internacional pode acelerar esse processo, além de trazer a relevância da conscientização da sociedade.

Outra análise que é de sumo interesse a se fazer quando falamos de fonte de energia é a análise econômica. Os autores BHARAMBE et al. (2013) avaliaram os efeitos colaterais do aumento do preço do GLP na Índia e possíveis alternativas após o governo limitar o número de cilindros subsidiados. Dentre as alternativas disponíveis, os autores sugerem o uso extensivo de fontes renováveis como a energia solar para substituir o GLP como fonte de geração de calor (aquecimento de água, cozinha, etc.). Já Isakower e Wang (2014) estudaram o ciclo dos preços da gasolina e do GLP na Austrália e constataram que os ciclos de preços do GLP na Austrália Ocidental, são muito mais longos e assimétricos do que os ciclos de preços da gasolina no mesmo mercado. Esse resultado está de acordo com a hipótese de Noel (2008) de que os ciclos se alongam e se tornam mais assimétricos quando a demanda agregada aumenta. Como a demanda de GLP tende a ser mais elástica do que a demanda de gasolina, esse resultado também é compatível com a hipótese.

Quando falamos de fontes de energia transitórias, estamos obviamente falando da troca de fontes usadas antigamente para fontes que se pretendem usar. Nesse sentido, faz-se necessário a análise comparativa de fontes, seja do seu custo, da sua performance ou de sua disponibilidade. Raslavičius et al. (2014), por exemplo, comparou o desempenho do GLP com o do GN como combustíveis transitórios para transporte. Kajiwara et al. (2002) estudou o GLP em comparação ao diesel, tanto em performance, quanto em emissão, aplicados ao sistema de injeção de motores. Alguns autores trazem, inclusive, estudos com híbridos de fontes, como GLP-Diesel, GLP-Biogás e etc, comparando suas emissões, performances e consumo (GIANG e SON, 2017; DAI et al., 2011).

Para o Brasil, uma análise que poderia vir a ser útil, assim como é nos EUA (PHILIPS et al., 2016), seria a geração de energia em regime de *standby*, que será melhor explicada no próximo tópico.

#### **2.4. Grupos Geradores em Standby**

Um gerador de reserva (em inglês, *standby*) é um sistema de eletricidade de *backup* automático, ou seja, um sistema que atua como fonte secundária de um local ou grupo de carga de energia, usualmente atuando quando a fonte primária é cortada (HICKEY, 2002). Uma chave de transferência automática detecta a perda de energia imediatamente após uma interrupção da rede elétrica, inicia o gerador e, em seguida, transfere a carga elétrica para o gerador. A chave

de transferência automatizada transfere a carga elétrica de volta para a concessionária assim que a energia da concessionária é restaurada e instrui o gerador de reserva a desligar. Em seguida, ele volta ao modo de espera e aguarda a próxima queda de energia (WHITAKER, 2006). Esse procedimento é muito importante para locais que precisam operar 24 horas por dia, como hospitais, indústrias de fluxo contínuo, etc, pois, com a ajuda do gerador em *standby*, suas operações continuarão a funcionar mesmo que o fornecimento de energia elétrica primário venha a cessar.

Os autores Philips et al. 2016, conduziram um estudo nos Estados Unidos da América para mapear a utilização dos geradores de *standby* no território do país. Eles constataram que os combustíveis mais utilizados foram: diesel, gás natural e o gás liquefeito de petróleo, sendo o diesel o mais utilizado, com 85% da fatia de equipamentos, o GN com 10% e o GLP com 4%. Curiosamente, os equipamentos a GN foram os que tiveram maior média anual de duração de geração, tendo uma média de 3449 horas (equivalente a 143 dias), o GLP vem em seguida com 274 horas (em média 11 dias) e o diesel por último com apenas 112 horas (em média 5 dias).

Mesmo que o diesel tenha se mostrado mais comum, é importante que as alternativas sejam comparadas e analisadas em contraste uma com a outra. Nwaokocha e Okezie (2016) estudaram o desempenho de um gerador elétrico de 2,5 kW movido a gasolina para possibilitar o uso do GLP como combustível alternativo. Foi avaliado o desempenho e consumo de combustível do gerador. Três situações foram utilizadas: sem carga, 139W e 750W de carga. Em cada uma delas, o consumo do combustível foi mensurado. Os resultados mostram a taxa de consumo de gasolina em 0,50 kg/h, 0,52 kg/h e 0,62 kg/h, respectivamente, enquanto a taxa de consumo de GLP foi de 0,30 kg/h, 0,32 kg/h e 0,59 kg/h. Esses valores representam redução de 40%, 38% e 4,8% no consumo de combustível por quilo de combustível. Mostrando que o GLP foi mais eficiente como fonte de energia para o gerador.

Já os autores Nwaokocha et al. (2018), conduziram um estudo de um gerador diferente, com ignição a 4 tempos, com o objetivo de análise de emissões de diferentes proporções de dois combustíveis: GLP em quilograma e gasolina em litro sob diferentes cargas. Eles analisaram a emissão de monóxido de carbono (medidor de CO) e de material particulado (PM). Os resultados revelaram que a concentração do número de partículas, monóxido de carbono (CO), aumentou à medida que a carga do motor a gasolina aumenta. Usando GLP, o nível de concentração de monóxido de carbono (CO) foi menor, redução significativa nas emissões de escape, porém, foi observado um aumento da temperatura do motor. O motor, enquanto funcionava com combustível GLP, apresentou melhor desempenho em termos de economia de

combustível, eficiência geral e características de emissão de escape significativamente melhores, em comparação com a gasolina.

Com essas características diferentes e critérios muitas vezes conflitantes, escolher o combustível ideal para um gerador é uma tarefa que demanda de muito estudo e análises, sendo necessário todo um modelo de processo de tomada de decisão. Por este motivo, o próximo tópico irá desenvolver mais aprofundadamente sobre processos de toma de decisão.

## **2.5. Processo de tomada de decisão**

O entendimento convencional da tomada de decisão individual é que uma decisão deve ser tomada entre uma gama de opções, ou mais especificamente, um procedimento que permite uma escolha entre uma gama de ações possíveis (Slade, 1994; Proctor, 1999; Reiter-Palmon e Illies, 2004; Osburn e Mumford, 2006). Portanto, adquirir, organizar, analisar e interpretar informações são etapas importantes no processo de tomada de decisão antes que a escolha entre as opções possa ser considerada. Por isso, faz sentido considerar a tomada de decisão como uma etapa do processo criativo de solução de problemas. Deve-se notar, no entanto, que a maioria das questões não tem uma única resposta ideal. Conseqüentemente, pode parecer impossível encontrar a resposta ideal. Para identificar uma alternativa que melhor atenda aos objetivos que se deseja atingir ao solucionar o problema, algo sempre deve ser negociado (Slade, 1994; Proctor, 1999; Reiter-Palmon e Illies, 2004; Osburn e Mumford, 2006).

O número de soluções potenciais para um problema que um decisor considera durante o processo é considerado um bom indicador da capacidade de resolução de problemas (Reither e Stäudel, 1985). A justificativa para isso é que um solucionador de problemas que gera inúmeras soluções normalmente considera mais ações para atingir seus objetivos. É mais provável que essa pessoa descubra técnicas eficazes mais rapidamente e esteja mais empenhada em utilizá-las. Isso os torna mais propensos a apresentar respostas alternativas. Além disso, ele ou ela fica ávido para identificar as metas certas no início do processo e mais motivado para encontrar dados novos e pertinentes. Tal pessoa também tem uma maior capacidade de reflexão sobre suas ações. Normalmente, essa pessoa pode compreender o quadro geral muito bem e não se atolar em detalhes (Slade, 1994; Proctor, 1999; Reiter-Palmon e Illies, 2004; Osburn e Mumford, 2006).

O exame de alternativas é a abordagem convencional para desenvolver critérios para análise de decisão (por exemplo, Bunn, 1984). De acordo com Keeney (1988, 1992), essa estratégia fica aquém de alcançar a eficácia ideal, uma vez que limita a atenção às escolhas

disponíveis. Este autor defende que limitar a estrutura da decisão às opções disponíveis impede a inclusão de critérios que possam transmitir os princípios do decisor central. Quando os valores para o contexto da decisão fossem estabelecidos, esses critérios se tornariam aparentes. Em conclusão, os valores do decisor devem servir como um guia ao examinar as escolhas. Nesse contexto, "valores" referem-se a metas, aspirações, objetivos, "o que é importante", "o que preocupa" e "o que satisfaz" — basicamente, o que a pessoa espera realizar com a escolha.

## **2.6. O Value-Focused Thinking como ferramenta de estruturação de problemas**

Em um problema de decisão, as alternativas são definidas como formas de atingir os objetivos do decisor. Uma vez identificados os objetivos, podem-se buscar novas alternativas que os atendam; ou seja, essa perspectiva permite ampliar o contexto da decisão. Essa abordagem é conhecida como "pensamento focado em valor" (VFT) por Keeney (1992), enquanto a abordagem tradicional é conhecida como "pensamento focado em alternativas". Esse método de abordagem foi usado para conduzir as entrevistas e para articular e organizar os dados das entrevistas. A técnica VFT simplesmente descreve o que interessa ao decisor, identificando o que é importante e como alcançá-lo. Os valores servem como conceitos guias para a avaliação (Keeney, 1992). A identificação dos objetivos torna explícitos os valores que são importantes para o decisor. Um objetivo é uma declaração do que se espera realizar (Keeney, 1992). Três características - um contexto de decisão, um objeto e uma direção de preferência - definem um objetivo. Entre outras coisas, o pensamento focado em valor deve fornecer as seguintes vantagens na tomada de decisões:

- (a) São incluídas as opções que apresentam características mais inovadoras.
- (b) Uma ampla variedade de opções deve estar incluída.
- (c) As decisões são tomadas com maior consideração aos seus efeitos de longo prazo.
- (d) São incluídas alternativas que podem não ser consideradas inicialmente.
- (e) Resultados mais favoráveis são levados em consideração.

As alternativas são definidas como formas de atingir os objetivos do decisor. Uma vez identificados os objetivos, podem-se buscar novas alternativas que os atendam; ou seja, essa perspectiva permite ampliar o contexto da decisão. Entre outras coisas, o pensamento focado em valor deve fornecer as seguintes vantagens na tomada de decisões:

(1) Crie uma lista preliminar de metas e coloque-a em um formato que todos possam entender. "Listas de desejos", "problemas e deficiências", "alternativas" e "consequências" são alguns métodos populares que podem encorajar o desenvolvimento de objetivos potenciais (Keeney, 1992). Ao fazer perguntas aos sujeitos sobre os valores da em relação aos problemas de decisão, emprega-se essas metodologias e depois transforma-se os valores dos sujeitos em uma forma universal (ou seja, articulando-os como "objetivos").

Keeney (1992) argumenta que é fundamental distinguir os vários tipos de objetivos. Estes se enquadram em três categorias: objetivos meios, objetivos fundamentais e objetivos estratégicos. Os objetivos estratégicos são aqueles que todas as organizações utilizam para ajudá-las a tomar decisões em nível estratégico e são aqueles que se relacionam com os principais objetivos do decisor. Os objetivos fundamentais são os fins que o decisor busca em um contexto de decisão; em outras palavras, esses são os objetivos que direcionam a escolha do decisor em um determinado contexto de decisão, enquanto os objetivos meios referem-se aos meios pelos quais um objetivo fundamental pode ser alcançado. A importância dos objetivos fundamentais e meios dependem do contexto de decisão ou, mais especificamente, do contexto de escolha em que são usados.

As relações entre o contexto de decisão e os objetivos são ilustradas na Figura 3.

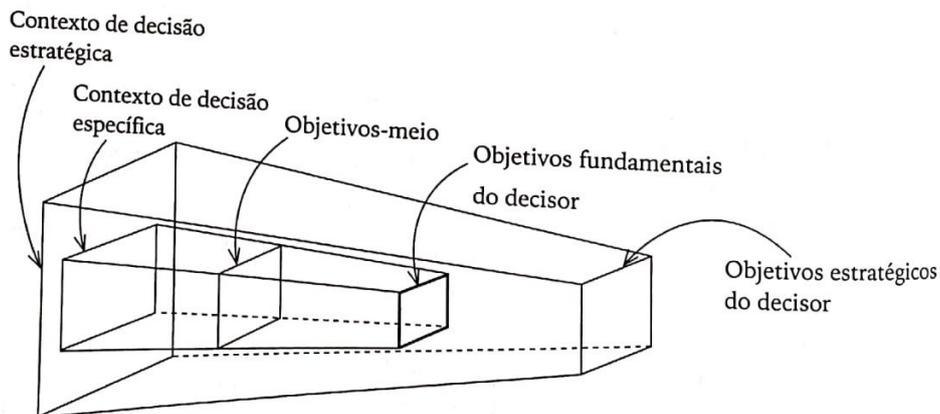


Figura 3 - Relações entre o contexto de decisão e os objetivos

Fonte: Keeney apud De Almeida et. al., 2012

O contexto de escolha geral do decisor é chamado de contexto de decisão estratégica. Refere-se a uma coleção de todas as opções viáveis. Representa os objetivos mais importantes do decisor. O contexto de decisão específico está vinculado ao problema de decisão, que está conectado aos fundamentos e meios subjacentes do decisor para um problema específico.

Segundo Keeney (1992), o propósito de todo contexto de decisão deve servir como um método para atingir o objetivo estratégico.

## **2.7. Decisão Multicritério**

O modelo de tomada de decisão envolve um processo de decisão para gerar uma única solução ou um conjunto de soluções. Recebe entradas subjetivas do problema de decisão e produz uma alternativa adequada como saída. Os modelos de tomada de decisão são classificados em dois tipos:

- a) métodos de tomada de decisão de critério único e
- b) critérios múltiplos (multicritério).

De Almeida (2013), deixa claro que em problemas de decisão multicritério, geralmente se tem critérios conflitantes, ou seja, critérios que para que um seja melhor avaliado, outro deve ser pior avaliado. Isso torna o processo de decisão ainda mais complexo e trabalhoso.

A decisão multicritério é uma área específica dos modelos de decisão que lida com problemas que envolvem múltiplos critérios ou objetivos. Nesses casos, é comum que as alternativas em análise sejam avaliadas em termos de diferentes critérios, que podem ter pesos e importâncias distintas (DE ALMEIDA, 2013). Muitos métodos de decisão multicritério (MCDM) foram criados desde a década de 1950 para ajudar os decisores com a análise e resolução de problemas de decisão. O objetivo principal dessas abordagens é identificar a melhor saída, que é formada pelas escolhas do decisor tanto para objetivos quantitativos quanto qualitativos. Essas técnicas e métodos auxiliam na análise e tomada de decisões quando há múltiplos critérios a serem considerados. Elas proporcionam uma estrutura sistemática para lidar com a complexidade dos problemas de decisão e ajudam a encontrar soluções mais informadas e fundamentadas. A escolha da técnica adequada depende do contexto do problema e dos objetivos do decisor. Numerosas publicações de MCDM, incluindo as de Figueira e Greco et al. (2005), Keeney e Raiffa (1979), Yoon e Hwang (1995) e Zeleny (1982), resumem uma variedade de técnicas.

Um problema multicritério, segundo Roy (1996), é definido pelos tipos de resultados esperados. Existem cinco problemáticas de referência definidas:

- (a) problemáticas de escolha, em um esforço para selecionar o "melhor" curso de ação, surge a questão.

(b) problemáticas de classificação, onde se busca encontrar uma classe, dentro das alternativas limitadas existentes.

(c) problemáticas de ordenação, onde é necessário apresentar um ranqueamento das possíveis ações ou alternativas.

(d) problemáticas de descrição, onde o problema é apresentado no intuito de conceder uma explicação das ações.

(e) problemáticas de portfólio, onde o problema refere-se aos desafios e questões associados à escolha e gestão de um portfólio de projetos, produtos ou investimentos.

O tipo de racionalidade do decisor em relação aos critérios para métodos multicritério também pode ser diferenciado e classificado de outra maneira. Dois argumentos podem ser levados em conta nessa situação: estratégias compensatórias e não compensatórias (ROY, 1996; DE ALMEIDA et al., 2015). Nas abordagens compensatórias, pensa-se que o desempenho inferior de uma alternativa em um critério pode ser compensado por um desempenho melhor em outro, enquanto nos métodos não compensatórios não há tentativa de compensar o desempenho de um critério no outro (DE ALMEIDA et al, 2015).

Como os problemas de decisão multicritérios possuem problemáticas e classificações diferentes, é comum que se tenha métodos diferentes para apoio à tomada de decisão. Dentre os métodos multicritérios, podemos citar o Processo Hierárquico Analítico (AHP), que como destacado por Pohekar e Ramachandran (2004), é um dos métodos mais populares na literatura. O AHP também é muito utilizado em conjunto da lógica fuzzy como nos estudos conduzidos por Alipour et al. (2017). O método ELECTRE (Eliminação e Escolha Expressando Realidade), é um método de classificação bastante conhecido, é aplicado por Beccali et al. (2003) para escolher a tecnologia de produção de energia elétrica mais adequada com base em três categorias: tecnológica, energética e ambiental e socioeconômica. Tanto os métodos acima mencionados quanto os outros métodos existentes, requerem informações completas do decisor para definir os parâmetros necessários e avaliar alternativas, e são suas preferências que irão ditar qual método pode ser encaixado no problema e qual não pode.

A principal contribuição deste trabalho é propor um modelo MCDM para avaliação de combustíveis de geração de energia elétrica que permita situações onde a informação nem sempre será completa, principalmente, no que diz respeito ao peso de cada critério, usando o método Flexível e Interativo de Tradeoff (FITradeoff) (DE ALMEIDA, 2016). Essa técnica, que se baseia em informações imperfeitas (ou parciais) e busca minimizar o trabalho cognitivo exigido do decisor ao obter suas preferências, pode ser útil no contexto da avaliação dos

combustíveis e ranqueamento entre as alternativas, O FITradeoff foi utilizado por Fossile et al. (2020) para selecionar a fonte de energia renovável mais viável para os portos brasileiros. De Macedo et al. (2018) usou o método para apoiar um problema de substituição de motor em uma indústria química, a fim de construir um plano de substituição para atender aos padrões mínimos da Lei Brasileira de Eficiência Energética.

## **2.8. Decisão multicritério para avaliação do uso de fontes variadas de energia**

Para avaliar a sustentabilidade de quatro combustíveis alternativos de aviação, incluindo refino de petróleo, síntese de Fischer-Tropsch à base de gás natural, combustível à base de algas e combustível à base de soja, o estudo conduzido por (Chen e Ren 2018) desenvolveu um modelo de avaliação de sustentabilidade multicritério. A metodologia deste estudo foi validada comparando os resultados do método proposto com o fuzzy TOPSIS, e os resultados foram confirmados por um processo de tomada de decisão multicritério baseado em programação que utilizou parcialmente dados reais para classificar os quatro combustíveis de aviação para sustentabilidade. Os resultados mostram que o método sugerido é eficaz na classificação de diferentes combustíveis de aviação para a sustentabilidade.

No artigo (Ullah et al. 2018), os autores tiveram como objetivo a escolha do combustível mais favorável para o setor de transporte rodoviário do Paquistão, uma vez que o país tem vários combustíveis gasosos disponíveis para o setor de transporte rodoviário com diferentes níveis de importância econômica, ambiental e social. Para isso, os autores avaliaram as três alternativas gasosas – gás natural comprimido, gás liquefeito de petróleo e gás natural liquefeito – usando um método de análise de decisão multicritério baseado no processo de hierarquia analítica. De acordo com os resultados, o gás natural comprimido é a melhor opção de combustível para a indústria de transporte rodoviário do Paquistão. Os resultados do modelo de decisão sugerido se mostraram cruciais para o desenvolvimento de uma política sobre o uso de vários combustíveis no setor de transporte do Paquistão, além de classificar e priorizar três tecnologias de combustível.

Carros de combustível alternativo oferecem chances de reduzir os custos de combustível e o impacto ambiental nos Estados Unidos da América (EUA). Para tanto, foi realizado um estudo pelos autores (Oztaysi et al. 2017) a fim de solucionar a questão de uma empresa do funcionalismo público nos EUA, escolhendo a tecnologia de combustível alternativo que melhor encaixaria com as preferências da empresa. De acordo com o método de tomada de decisão multicritério (MCDM) do artigo, que é baseado em conjuntos fuzzy intuicionista de

valor de intervalo (IVIFS) e dados linguísticos, o carro a gás natural de alcance estendido é o mais adequado para a empresa de serviços públicos, e com isso, o método se mostrou eficaz e confiável na resolução do problema.

Os autores (Büyükožkan et al. 2018) argumentam que a rápida expansão dos veículos automotores e o desenfreado desenvolvimento urbano inevitavelmente resultam na criação de sistemas de transporte economicamente, social e ambientalmente insustentáveis, colocando em risco não apenas a saúde pública, mas também sobrecarregando ecossistemas. No intuito de avaliar várias tecnologias de ônibus públicos como alternativas a outras formas de transporte urbano, os autores desenvolveram um modelo de decisão multicritério. O(s) combustível(s) que esses ônibus usarão levou à divisão dessas tecnologias. Oito tecnologias diferentes foram avaliadas no total, incluindo: (1) o motor diesel; (2) gás natural comprimido (GNV); (3) gás liquefeito de petróleo (GLP); (4) álcool metílico; (5) HYD (baterias que funcionam com hidrogênio e oxigênio); (6) o ônibus elétrico com baterias intercambiáveis; (7) o híbrido de eletricidade e diesel (HED); e (8) o híbrido de eletricidade com gás natural comprimido (HEC). Para tanto, é proposto um método de agregação baseado nas abordagens Group Decision Making (GDM) e Intuitionistic Fuzzy Choquet Integral (IFCI). Para definir os parâmetros do IFCI, é empregada uma técnica de identificação de medidas por comparação fuzzy pairwise. Outra abordagem multicritério que desconsidera interações é a TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), bem como a integral de Choquet 2-aditiva. São feitas comparações entre os resultados do IFCI, integral de Choquet de 2 aditivos e TOPSIS. O estudo de caso avalia o problema em questão em relação a vários critérios e sugere a adoção de combustíveis GNV, HEC e GLP para ônibus urbanos de Istambul.

## **2.9. Revisão de literatura**

Apesar de haverem estudos na literatura sobre avaliação de combustíveis utilizando modelos multicritério, ainda é preciso ir além no que diz respeito sobre análises envolvendo o uso do GLP e suas aplicações como fonte de transição para grupos geradores, uma vez que no Brasil seu uso ainda é limitado.

Com o intuito de desenvolver uma lista de possíveis critérios de avaliação de combustíveis, que servirá como sugestões aos decisores, foi conduzido um estudo exploratório-descritivo baseado em revisão de literatura para que posteriormente os resultados sejam apresentados ao decisor engenheiro da área que validará, junto ao outro decisor, quais critérios serão aceitos na aplicação desta pesquisa. É importante ressaltar que esta revisão não foi uma

revisão sistemática, devido ao seu caráter exaustivo. Os artigos para revisão foram escolhidos a partir de uma revisão de trabalhos publicados que apresentavam a avaliação de fontes de energia (especificamente, GLP) na área de pesquisa MCDM, bem como os critérios de avaliação e métodos para classificação de combustível.

Optou-se por uma amostra de 15 artigos (Anexo A). A amostra selecionada para este artigo limitou-se a artigos categorizados como "Avaliação de fontes de energia" com as palavras-chave "Análise multicritério" ou "Decisão multicritério" no banco de dados de pesquisa Web of Science e Scopus. Nesta revisão, foram definidos apenas os MCDM que foram utilizados em problemas de decisão envolvendo fontes alternativas de energia. Os títulos, resumos e palavras-chave de todos os artigos delimitados na amostra foram revisados. Foi escolhido apenas os MCDMs que já haviam sido utilizados na avaliação de fontes energéticas que incluíssem o GLP como alternativa de combustível. Artigos com foco em outros segmentos foram deixados de fora da análise. Cada artigo selecionado, após exclusão dos não adequados, foi lido e houve revisão do conteúdo do artigo. Caso não fosse possível determinar se o artigo revisado deveria ser incluído na análise, o artigo era lido na íntegra para garantir que apenas artigos relevantes para este estudo fossem escolhidos.

Aplicando o que foi mencionado na revisão, foram identificados 15 artigos para os domínios selecionados. Destes, houve uma separação inicial entre os artigos, a fim de identificar os métodos MCDM utilizados, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Dentre os métodos, destaca-se a Lógica Fuzzy, que é uma forma de cálculo proposicional em que há mais de dois valores-verdade, em que os valores-verdade das variáveis podem ser qualquer número real entre 0 (correspondente ao valor falso) e 1 (correspondente ao valor real). Dentro da revisão, a lógica Fuzzy foi usada de diferentes maneiras e também em combinação com outros métodos, assim como o VFT também pode aparecer como método de estruturação de problemas junto a outros métodos multicritérios. Também houve alta utilização do método Analytic Hierarchy Process (AHP), que consiste na decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização de seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta única de medição de desempenho. O terceiro método mais utilizado na revisão é o TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), que é uma técnica para avaliar o desempenho de alternativas por meio de sua similaridade com uma solução ideal. De acordo com esta técnica, a melhor alternativa é aquela mais próxima da solução ideal e mais distante da solução não ideal. Os métodos PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), WSM (Weighted Sum Method) e VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) acabaram com

a mesma frequência de uso na revisão, tratando dos métodos de superclassificação, soma ponderada e classificação, respectivamente.

Em seguida, foram analisados os critérios utilizados pelos autores da revisão. Nos 15 artigos, foram selecionados 24 critérios diferentes, pertencentes a 4 grupos de critérios, a saber: Técnicos: Os fatores técnicos foram avaliados com base em subcritérios como eficiência e disponibilidade de combustível;

Tabela 1 - Distribuição de métodos multicritério

Artigo No.	Autores	Métodos multicritério utilizados					
		Fuzzy	AHP	PROMETHEE	WSM	VIKOR	TOPSIS
1	Tzeng et al., 2005	x				x	x
2	Kahraman e Kaya, 2010	x	x				
3	Chang et al., 2013	x			x		
4	Streimikiene et al., 2013						x
5	Aydin e Kahraman, 2014	x	x			x	
6	Yavuz et al., 2015	x			x		
7	Mukherjee, 2017	x					x
8	Oztaysi et al., 2017	x					x
9	Sehatpour et al., 2017			x			
10	Strantzali et al, 2017			x			
11	Büyüközkan et al, 2018	x					x
12	Chen e Ren, 2018	x	x				
13	Ullah et al., 2018		x				
14	Hansson et al., 2019		x				
15	Liang et al., 2019	x	x				

Econômico: inclui critérios como custos de combustível, tarifas e investimentos. Ambiental: que leva em consideração os critérios que influenciam diretamente o meio ambiente; Social: critérios que levam em conta aspectos da sociedade, aceitação e política governamental.

A Tabela 2 lista os critérios observados pelos autores da revisão. Vale ressaltar que foram considerados apenas os critérios que apareceram em vários artigos, a fim de descartar problemas causados por critérios particularmente precisos. Além disso, alguns critérios, como "poluição do ar", que inclui CO<sub>2</sub> e outros gases que podem poluir a atmosfera, foram fundidos em um só.

Os critérios "Poluição do ar", "Fornecimento de energia", "Eficiência energética", "Custos de operação" e "Custos de implementação" foram os 5 critérios mais frequentes nos artigos de revisão, o que também demonstra a preocupação dos tomadores de decisão com o meio ambiente, problemas técnicos e econômicos que implicam a escolha de um combustível

melhor. Curiosamente, apenas 7 dos 15 artigos estavam preocupados com a aceitação social e alguns deles também com o critério de comercialização de combustível.

Tabela 2 - Distribuição dos critérios

Critérios	Aspecto em questão	Ocorrências	Ocorrências															
			Tzeng et al., 2005	Kahraman e Kaya, 2010	Chang et al., 2013	Streimikienė et al., 2013	Aydin e Kahraman, 2014	Yavuz et al., 2015	Mukherjee, 2017	Oztaysi et al., 2017	Sehatpour et al., 2017	Strantzali et al., 2017	Büyükoğuzkan et al., 2018	Chen e Ren, 2018	Ullah et al., 2018	Hansson et al., 2019	Liang et al., 2019	
Poluição do ar	Env.	14	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Fornecimento de energia	Tech.	12	x		x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	
Eficiência	Tech.	12	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	
Custo de operação	Eco.	10			x		x	x	x	x	x	x	x			x		
Custo de implantação	Eco.	9			x		x	x	x	x	x	x			x			
Custo de manutenção	Eco.	9	x		x	x	x	x	x	x	x	x						
Preço da fonte	Eco.	9			x	x	x	x			x			x	x	x	x	
Aceitação social	Social	7		x	x		x				x			x	x		x	
Bem-estar social	Social	7							x	x	x	x	x			x		
Viabilidade	Tech.	7		x	x				x			x	x		x		x	
Características do equipamento	Tech.	6	x					x	x	x				x			x	
Segurança	Social	5			x		x				x	x					x	
Espaço requerido	Social	4		x						x						x	x	
Maturidade do Mercado	Social	4							x		x					x	x	
Investimento para transição	Eco.	3	x						x		x							
Senso de conforto	Social	3	x				x				x							
Impacto laboral	Social	3		x					x							x		
Valor econômico	Eco.	3		x					x		x							
Confiabilidade	Tech.	3		x								x		x				
Políticas públicas	Social	3		x													x	x
Poluição Sonora	Social	2	x										x					
Disponibilidade de fundos	Eco.	2		x													x	
Penetração no mercado	Social	2							x		x							

Desenvolvimento no mercado secundário	Social	2	x	x
---	--------	---	---	---

---

É importante ressaltar que essa lista final de critérios, será utilizada na aplicação desta pesquisa, e será validada pelos dois decisores. Os critérios da revisão da literatura são apresentados a eles e ambos decidem quais critérios devem ser levados em consideração em nossa análise e quais não devem.

A revisão da literatura revelou uma lacuna significativa na comparação do uso do GLP como combustível para geradores de energia elétrica de *backup* e poucos estudos utilizando do método multicritério FITradeoff, com poucos artigos recentes disponíveis sobre o assunto. Essa falta de estudos comparativos enfatiza a necessidade de investigar mais a fundo o desempenho e a viabilidade do GLP nessa aplicação específica. Portanto, este trabalho propõe preencher essa lacuna e fornecer uma análise abrangente e atualizada do uso do GLP como combustível para geradores de energia elétrica de *backup* utilizando o método FITradeoff, com o objetivo de fornecer informações relevantes para a tomada de decisões e contribuir para o avanço nessa área específica de pesquisa.

### 3. METODOLOGIA

Esta pesquisa trata-se da proposição de um modelo de sistema de decisão de fontes de energia de um grupo gerador em *standby*, em conjunto com a avaliação do GLP como uma das fontes. O processo de desenvolvimento desse modelo será discutido neste capítulo.

A primeira etapa do desenvolvimento desta pesquisa foi a condução de uma revisão da literatura sobre os modelos utilizados para avaliar combustíveis. Verificou-se a necessidade de um modelo que auxiliasse os tomadores de decisão na escolha de combustíveis de grupos geradores que estivessem alinhados com os objetivos e valores individuais ou organizacionais.

Foi desenvolvido uma pesquisa de uma base conceitual abordando os conceitos necessários para agregar valor ao modelo a fim de auxiliar no seu desenvolvimento. Tecnologia da informação, produtividade, método de análise multicritério e estruturação de problemas foram alguns dos temas pesquisados. Examinou-se o melhor modelo que poderia ser sugerido após a compreensão dessas ideias e como elas poderiam beneficiar o desenvolvimento do modelo.

Seguindo a proposta de Almeida (2013) para estruturação de um modelo multicritério, foi esboçado um modelo de pesquisa (Figura 4) para avaliar o potencial do GLP em comparação a outras fontes de energia, contendo os passos que deverão ser seguidos para o planejamento, execução e implementação da metodologia proposta para este projeto. O esquema seguiu 3 fases de execução: fase preliminar; desenho e escolha do método; e finalização.

Na Fase Preliminar, destacou-se a escolha dos decisores, sendo eles: o dono de uma empresa do setor de Comércio, e um engenheiro eletricista. Após a seleção dos decisores, o método de estruturação de problema VFT foi utilizado, onde foi possível extrair dos decisores, individualmente, seus objetivos e valores relacionados ao problema, além das alternativas de combustíveis para grupos geradores. Além disso, durante a Fase Preliminar, foi realizada uma revisão bibliográfica (já apresentada no capítulo anterior), necessária para coletar critérios de avaliação dos combustíveis e os métodos/algoritmos utilizados para resolver o problema objetivo. Essa revisão serviu apenas como suporte para os decisores, que seriam responsáveis por validarem as sugestões de critérios, onde um dos decisores (que é engenheiro na área) indicaria quais critérios eram possíveis de coletar dados no presente momento.

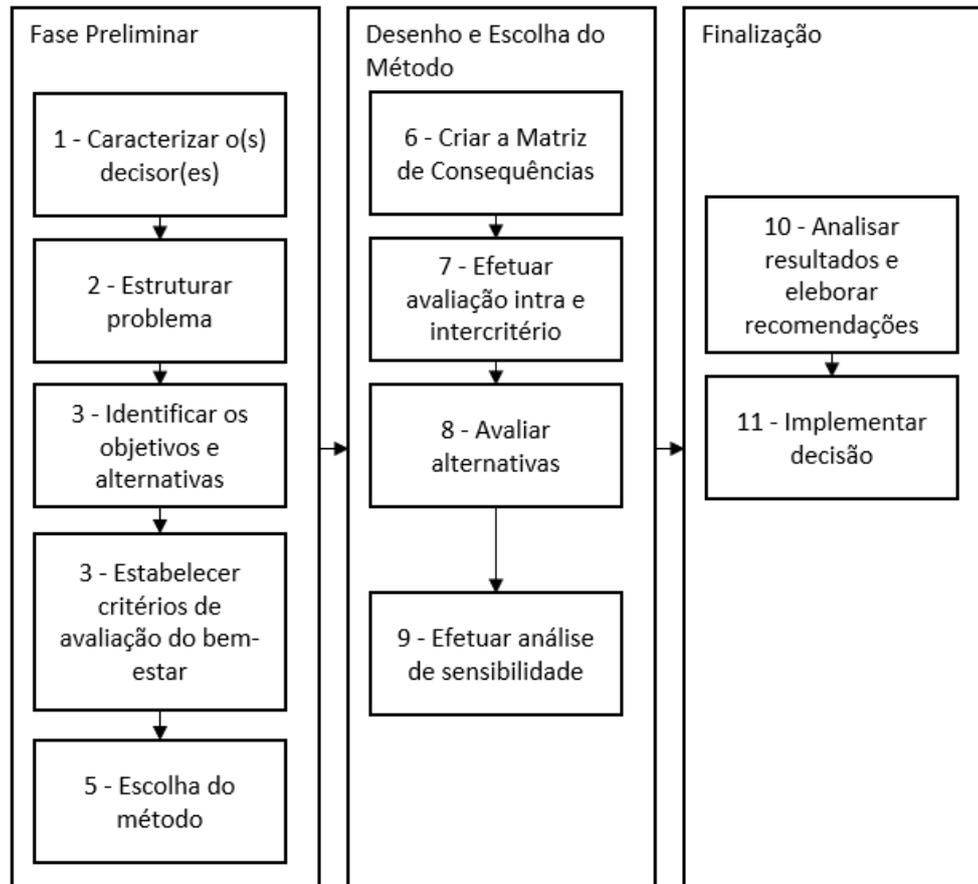


Figura 4 - Diagrama da Pesquisa.

Fonte – Adaptado de Almeida 2013.

Na etapa de Desenho e Escolhas do Método, uma modelagem do problema foi realizada, juntamente com a criação da Matriz de Consequências, usando os critérios pré-estabelecidos. Em seguida, foram realizadas simulações e avaliações. É importante ressaltar que as simulações foram feitas no software FITradeoff, utilizando o algoritmo de elicitação flexível para ordenação do problema.

A última fase resume-se à análise dos resultados da elicitação e ordenação do FITradeoff, bem como à formulação de recomendações para avaliação do modelo utilizado e, por fim, à implementação da decisão gerada pelo modelo.

Os resultados obtidos irão auxiliar os decisores em suas decisões em relação à comparação do GLP com outros combustíveis para geração de energia elétrica.

### 3.1. Estruturação do VFT

Para estruturação do VFT, 4 etapas foram desenvolvidas para aplicação no modelo proposto.

### 3.1.1. Etapa 1 – Entrevista

A primeira etapa envolve a identificação do problema, que consiste em descrever e compreender o problema, selecionar os atores decisórios e determinar os valores do(s) decisor(es) em relação ao tema em estudo. Os atores são escolhidos com base em sua acessibilidade e interesse pelo problema. Apenas um decisor será levado em consideração nessa pesquisa: um dono de uma empresa que deseja comprar um grupo gerador de energia elétrica.

Esta fase inicial do processo corresponde a uma fase de debate entre os envolvidos para que os decisores tenham conhecimento do assunto em causa e do(s) problema(s) em questão. Isso requer a presença de um facilitador, responsável por acompanhar todo o processo decisório e auxiliar os decisores na compreensão do tema, da abordagem utilizada e dos conceitos envolvidos (De ALMEIDA et al., 2012). A função do facilitador é infundir confiança e conforto ao decisor quanto ao uso do modelo, a possibilidade de rever seus valores individuais e a possibilidade de uma melhor e mais completa compreensão dos diversos pontos de vista que envolvem na tomada de decisão.

O facilitador indaga o(s) tomador(es) de decisão para pensar criticamente sobre seus valores em um esforço para identificar qualquer desejo que possa não ser imediatamente aparente para eles. Uma lista de desejos, uma comparação de por que uma alternativa é melhor que a outra, perguntas sobre os principais problemas, os efeitos das alternativas, uma lista de metas e propósitos ou, finalmente, a quantificação de metas são algumas das técnicas que Keeney (1996) afirma podem ser usadas para estimular valores e identificar objetivos.

Keeney (1996), sugere uma lista de perguntas (Tabela 3), em modelo de entrevista semiestruturada, que podem ser feitas ao decisor a fim de se extrair os valores e objetivos dele. Vale dizer que essas perguntas não são uma regra e elas devem ser adaptadas ao problema que se está trabalhando com o decisor, sendo apenas sugestões do autor do VFT.

As respostas às perguntas do facilitador conduzem a uma lista de desejos que inclui inúmeras sugestões de objetivos possíveis, incluindo valores, alternativas, critérios, restrições, etc. É fundamental salientar que pode haver redundância entre os conceitos descobertos, no entanto, a redundância neste estágio não deve ser vista como uma falha porque é muito mais simples identificar metas redundantes quando elas são especificamente listadas.

Tabela 3 – Perguntas sugeridas para identificar objetivos

<p>O que você quer? O que você valoriza? O que você deveria querer?</p> <p>Qual é alternativa perfeita, a alternativa horrível e a razoável? O que é bom ou ruim em cada uma delas?</p> <p>O que está certo ou errado com sua organização? O que necessita de ajustes?</p> <p>O que ocorreu que foi bom ou ruim? O que pode ocorrer que o preocupa?</p> <p>Quais são as suas aspirações? Quais limitações você tem?</p> <p>O que os seus concorrentes se preocupam? Daqui a algum tempo no futuro, o que preocuparia você?</p> <p>Quais são seus objetivos mais atuais? Quais são os seus valores que são absolutamente fundamentais?</p> <p>Quais objetivos você tem para seus clientes, empregados, para você mesmo? Quais objetivos ambientais, sociais, econômicos ou de saúde e segurança são importantes?</p> <p>Por que aquele objetivo é importante? Como você pode alcançá-lo? Seja específico: O que você quer dizer com esse objetivo?</p> <p>Como você mensura o atingimento de um objetivo? Por que o objetivo A é três vezes mais importante do que o objetivo B?</p>
---

Fonte: adaptado de KEENEY, 1996.

### 3.1.2. Etapa 2 – Estruturação de valores

Objetivos, alternativas, diretrizes e critérios para julgar alternativas devem ser incluídos na lista inicial. Os itens desta lista devem ser todos transformados em objetivos. Keeney (1996) afirma que uma breve declaração com um verbo e um objetivo é a melhor abordagem para expressar um objetivo. No entanto, o autor afirma que a pergunta "por que isso é importante?" deve ser colocado para cada propósito que foi identificado. O ponto principal é que há objetivos que são um dos principais fatores que influenciam o interesse das pessoas pelo tema, o que o qualifica como um objetivo fundamental. Outra possibilidade é que exista objetivos que sejam significativos pelos efeitos que terão sobre outro objetivo fundamental, tornando-se um objetivo intermediário (ESMERALDO e BELDERRAIN, 2010). Vale lembrar que é nesta etapa que se define o objetivo específico e os objetivos fundamentais e meio.

### **3.1.3. Etapa 3 – Criar Alternativas**

Concentrando-se nos valores que os tomadores de decisão mantêm, e não na avaliação das alternativas existentes, o VFT tenta encorajar o surgimento de novas alternativas. Ao fazer isso, é possível abordar o problema de escolha de um novo ângulo e criar soluções que melhor sustentem esses ideais. Keeney (1992) afirma que métodos sistemáticos e eficazes são necessários para buscar uma lógica de pensamento para realizar o processo de produção de alternativas. O decisor então considera alternativas para atingir seus objetivos usando essas informações da árvore de decisão. As opções iniciais desenvolvidas são tipicamente as mais óbvias, aquelas que já foram aplicadas em circunstâncias análogas e aquelas que já são acessíveis ao público. Portanto, antes de iniciar a etapa de avaliação, deve-se estimular a criatividade para gerar o maior número possível de alternativas.

### **3.1.4. Etapa 4 – Avaliar e Selecionar Alternativas**

Por fim, deve-se avaliar a aplicabilidade de cada alternativa criada no problema que se tem. Neste passo, é necessário verificar a viabilidade das alternativas e se elas realmente são necessárias dentro do contexto em que serão inseridas. Deve-se ter o cuidado para não selecionar um número demasiado de alternativas para que não deixe o trabalho de decisão tão exaustivo também.

## **3.2. FITradeoff**

Por ser um problema multicritério de ordenação (ranqueamento), foi escolhido o método FITradeoff para aplicação do problema. O destaque que o FITradeoff possui é o seu Sistema de Apoio a Decisão (SAD), que é de fácil acesso e aplicação, e por ser flexível, permite que o procedimento seja interrompido e finalizado a qualquer momento. Os pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) criaram a abordagem de análise de decisão multicritério FITradeoff em 2016 como avanço metodológico do método convencional do conhecido método Tradeoff (FREJ et al., 2017; LEAO NETO; FERREIRA; ALMEIDA, 2016).

A abordagem tradicional de tradeoff é a base do método FITradeoff (KEENEY e RAIFFA, 1979). No entanto, essa abordagem faz uso das ideias de informações parciais e não precisa que os decisores declarem integralmente seus pontos de vista. Em contraste com o tradeoff clássico, a técnica FITradeoff não pede ao decisor que especifique as relações de

indiferença entre as consequências, deixando o processo de cognição do decisor mais confortável. O método de elicitación flexível sugerido pelo FITradeoff tenta elicitación as preferências do decisor obtendo os valores das constantes de escala a partir de informações parciais. Atualmente, ele possui resoluções para problemáticas de escolha, ordenação, classificação e portfólio.

A constante de escala, que aproxima o valor e facilita a aplicação do modelo ao decisor, é utilizada no lugar dos pesos no FITradeoff e em muitas abordagens aditivas (FREJ et al., 2017; KEENEY e RAIFFA, 1993). No caso da problemática de ordenação, conforme demonstrado nas equações subsequentes, o método utiliza Problemas de Programação Linear para definição das constantes de escala e relações de peso das alternativas (Frej et al. 2019).

Em que, de acordo com Frej et. al (2019), (1) é a maximização do valor global ( $kivi(A)$ ) da diferença entre cada par de alternativas ( $A_j$  e  $A_k$ ); (2) é a ordenação das constantes de escala dos critérios ( $ki$ ); (3) e (4) representam os limites superiores e inferiores das constantes de escala dos critérios; (5) a normalização das constantes de escala; e, ainda, (6) a não-negatividade das constantes.

$$\begin{aligned} \text{Max } D(A_j, A_k) & & (1) \\ &= \sum_{i=1}^n k_i v_i(A_j) - \sum_{i=1}^n k_i v_i(A_k) \end{aligned}$$

s.a.:

$$k_1 > k_2 > \dots > k_n \quad (2)$$

$$k_i v_i(x'_i) > k_{i+1} \quad i = 1 \text{ a } n - 1 \quad (3)$$

$$k_i v_i(x''_i) < k_{i+1} \quad i = 1 \text{ a } n - 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (5)$$

$$k_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

A capacidade do método FITradeOff de evitar que o decisor precise fazer mudanças pela indiferença entre dois critérios é um componente chave do processo de elicitación, o que otimiza o processo de decisão (de Almeida et al. 2016).

Para aplicação do FITradeoff, foi utilizado um *software* desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento Sistemas de Informação e Decisão da UFPE (CDSID). Seis passos compõem

a aplicação do modelo FITradeoff, desde a montagem do problema até os cálculos realizados pelo *software*. A Figura 5 ilustra essas etapas com mais clareza.

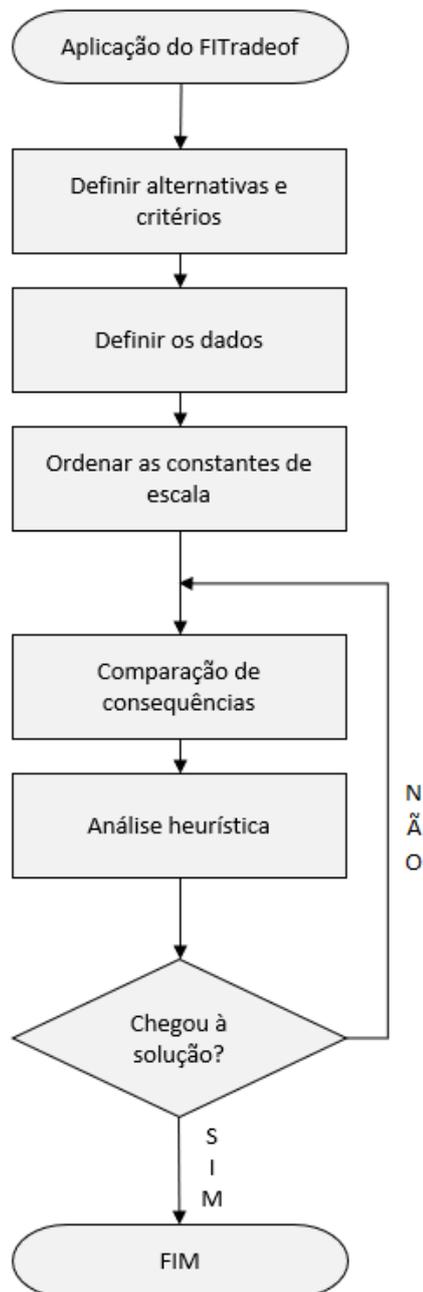


Figura 5 - Aplicação FITradeoff no Software

Os seis passos são:

1 – Determinar as alternativas e critérios. Ao abrir o *software* do FITradeoff, é necessário registrar um novo problema, neste primeiro passo, são declaradas quais as

alternativas serão utilizadas no problema e quais critérios. Ainda na declaração dos critérios, é necessário que se coloque a função do valor, podendo ser:

- Função logarítmica
- Função linear
- Função logística
- Função exponencial

Após deixar claro qual a função, deve-se declarar o tipo de escala do valor do critério, podendo ser:

- Contínua
- Discreta; neste caso, deve-se colocar quantos níveis de escala possui o valor.

2 – Determinar o valor dos critérios. Após o *software* registrar as alternativas e critérios, é necessário declarar o valor de cada critério em relação às alternativas, neste caso não será o peso dos critérios relativo às alternativas, mas sim o valor de cada critério;

3 – Ordenação dos critérios. O decisor organiza os critérios em uma ordem preferencial antes de avaliar o problema;

4 – Comparação par a par. Em uma comparação par a par, sempre são comparadas duas opções: uma que teve nota alta em um critério, mas apresentou baixo nível de preferência na etapa anterior, e outra que recebeu nota alta, mas apresentou nível moderado de preferência.

5 – Escolha entre duas situações. O programa retém as decisões de preferência do decisor a partir de sua seleção e sintetiza os dados para retirar alternativas e, se necessário, produzir novas questões de comparação até encontrar as melhores opções entre as alternativas, criando uma lista com a ordem de importância delas;

6 – Por fim o ranqueamento das alternativas é finalmente determinado pelo FITradeoff.

### **3.3. Análise de Sensibilidade**

A análise de sensibilidade é uma etapa essencial no processo de tomada de decisão, permitindo avaliar a robustez do resultado obtido pelo modelo de decisão em relação aos dados de entrada e parâmetros adotados. Essa análise envolve a consideração de incertezas nos dados de entrada, variando-os dentro de limites específicos, a fim de observar como o resultado é afetado por essas variações. O objetivo é compreender a sensibilidade do modelo em relação a dados ou parâmetros específicos (BELTON e STEWART, 2002).

Quando um resultado apresenta uma variação considerável diante de mudanças nos dados de interesse, pode indicar a necessidade de revisão ou descarte do modelo de decisão,

demandando uma reestruturação do problema. Os dados podem ser variados individualmente ou em conjunto, permitindo investigar o impacto de cada parâmetro ou dado de entrada e gerando índices de robustez para diferentes cenários. Esses índices complementam o relatório de resultados do modelo, fornecendo uma medida da sensibilidade em relação aos dados de interesse (DE ALMEIDA, 2013).

No método FITradeoff, a análise de sensibilidade ocorre após a fase de elicitação, quando a recomendação final é determinada. Por meio de simulações de Monte Carlo, são gerados diversos cenários nos quais subconjuntos de dados de entrada são variados de acordo com distribuições de probabilidade, como a distribuição uniforme, dentro de uma faixa definida (RAYCHAUDHURI, 2008). O decisor tem a flexibilidade de escolher quais dados serão variados e qual faixa de variação será aplicada. Dessa forma, é possível avaliar a sensibilidade do modelo em relação aos dados de consequência em critérios individuais ou no conjunto completo de critérios.

Os resultados da análise de sensibilidade dependem das características específicas de cada problema abordado pelo método FITradeoff. A metodologia utilizada por cada modelo que emprega esse método, como seleção, ordenação e classificação, é detalhada conforme as necessidades e peculiaridades do problema.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo será apresentado os resultados da aplicação da metodologia, previamente descrita, bem como, a discussão desses resultados e suas implicações.

### 4.1. Os decisores

Na Fase Preliminar, pôde ser definida a escolha de dois decisores, sendo eles:

- Decisor empresário: um empresário do setor de comércio que deseja adquirir um gerador de energia elétrica de 150KVA para regime *standby*;
- Decisor engenheiro: um engenheiro eletricitista, projetista de uma empresa especializada em grupos geradores. Por ser um engenheiro, sua participação cooperou no processo de identificação dos objetivos e quais fontes alternativas poderiam ser comparadas, além de quais dados estariam disponíveis para serem coletados.

Ainda na Fase Preliminar, foi realizada uma revisão bibliográfica que serviu como sugestão para escolha dos critérios de avaliação dos combustíveis, os quais foram validados pelos decisores. Vale ressaltar que o modelo é aplicado e validado individualmente com cada decisor, ou seja, não é um modelo de decisão em grupo, mas individual. Apenas os critérios e alternativas que foram validados em comum acordo dos decisores.

### 4.2. Aplicação do VFT

A aplicação do VFT foi realizada conforme o descrito no Capítulo 3, onde a estruturação do problema dispõe de 4 etapas.

#### 4.2.1. VFT - Etapa 1

Uma entrevista com os decisores foi realizada, de forma individual, usando os procedimentos descritos e adaptações das perguntas da Tabela 3, em um esforço para determinar os valores de ambos. Isso foi montado usando os métodos sugeridos por Keeney (1996). A Tabela 4 traz as perguntas feitas ao decisor, levando em conta a nossa problemática.

Os decisores foram indagados com essas questões em um esforço para se retirar os verdadeiros valores e objetivos que necessitam ser alcançados, de acordo com as respostas deles. É possível notar como as perguntas podem ser redundantes, mas como já foi dito, é mais

simples identificar um objetivo redundante do que notar a falta de objetivos ou valores do decisor (KEENEY, 2001). É por isso que os decisores são solicitados a criar uma lista de objetivos na última pergunta, mesmo que já tenham sido mencionados em perguntas anteriores. Isso garante que nenhum objetivo/valor seja negligenciado ou esquecido.

Tabela 4 - Perguntas feitas o decisor

1. Quais, você considera, as principais fontes/combustíveis de grupos geradores no Brasil?
2. Na sua opinião, o que se leva em conta / o que se valoriza, quando se decide investir em um projeto de um grupo gerador? E na escolha do combustível?
3. Quais valores (melhorias, vantagens, qualidades) a sociedade pode esperar de um gerador de energia elétrica? E negativamente, consegue enxergar algo?
4. Quais fatores são importantes para esse tipo de decisão? Por exemplo: ambientais, sociais, econômicos ou de saúde e segurança são importantes?
5. Em sua opinião, existem preocupações e desvantagens no uso de alguns combustíveis para geração de eletricidade? Quais?
6. Na sua opinião, o que seria uma alternativa excelente de combustível para grupo gerador? Quais características têm que atender?
7. Considerando um leque de opções de investimento. O que seria mais interessante ao analisar a aquisição de um grupo gerador: sua escolha, sua comparação com outros tipos ou sua avaliação? bom/ruim/excelente?
8. Considerando um gerador que opera à diesel ou gás natural hoje, você considera que seriam necessários muitos ajustes para que o mesmo equipamento pudesse funcionar com GLP?
9. Qual o objetivo específico você deseja alcançar?
10. Elabore uma lista de objetivos gerais. (Não se preocupe com a existência de redundâncias)

#### **4.2.2. VFT - Etapa 2**

Após a realização da entrevista com os decisores, foi possível extrair seus valores e preferências, isso possibilitou a construção de uma lista preliminar com os objetivos fundamentais e objetivos meios para a estruturação do problema. Os resultados da entrevista

estão presentes na Tabela 5. Dentre os objetivos enxergados, podemos destacar o custo, a emissão de gases de efeito estufa (GEE), a abrangência no mercado, a geração de resíduos e o risco de acidentes como critérios fundamentais aos decisores. Vale descrever o critério de abrangência no mercado, como um critério que visa a escolha do equipamento que não apenas seja mais disponível no mercado, como também, o equipamento que dispõe de mão de obra qualificada para realizar suas manutenções, pois, para os decisores, pouco adianta em ter um equipamento se não se tem equipe de manutenção disponível para atuar quando necessário, principalmente em manutenções corretivas.

No entanto, é importante salientar que ainda na Etapa 2 é necessário haver questionamentos a respeito de cada objetivo, a fim de que se afunile mais a quantidade de objetivos e identificar os possíveis objetivos redundantes. Para auxiliar ainda mais nas escolhas, o decisor engenheiro complementou o problema com dados e informações de muito valor e, também, foi apresentado o resultado da revisão bibliográfica, que listava os principais critérios dos artigos selecionados. Como ele é um engenheiro electricista, que trabalha numa empresa que projeta grupos geradores em regime de *standby*, ele pôde agregar com dados de equipamentos e informações de combustíveis e etc.

Após uma reuniões individuais com cada decisor, alguns objetivos foram debatidos juntos, validando se os critérios devem ser incorporados ou retirados do problema. Dentre as sugestões, o decisor empresário entendeu que alguns objetivos poderiam ser agrupados, como por exemplo: o objetivo de se preferir os equipamentos disponíveis, poderia estar agrupado ao custo do equipamento, uma vez que os equipamentos menos disponíveis possuiriam um custo maior em relação aos mais disponíveis. Porém, foi mantido o objetivo de se ter a mão de obra qualificada disponível para manutenção, pois entende-se que isso é muito relevante.

Outro objetivo que foi agrupado, foi o de necessidade de fiscalização/revisão, pois os custos disso estariam incluídos nos custos de operação, de acordo com o decisor engenheiro. Além disso, a necessidade de reabastecimento está intimamente ligada à deterioração do combustível em estoque, então este critério também foi retirado. O decisor engenheiro também contribuiu com o quesito segurança dos equipamentos e combustíveis, dizendo que todos os equipamentos são projetados para serem seguros, bem como, o seu abastecimento. O critério poderia ser mais relevante se houvesse uma coleta do histórico de acidentes envolvendo cada combustível, o que não foi possível de se realizar em tempo hábil para este trabalho. Também não foi possível encontrar os dados de todos os gases de efeito estufa (GEEs) dos equipamentos de cada combustível, limitando o critério na emissão de CO<sub>2</sub>.

Tabela 5 - Objetivos fundamentais e meios extraídos do decisor

<p>1 - Minimizar os custos</p> <p>1.1 - Preferir o equipamento mais barato</p> <p>1.2 - Minimizar o custo de operação</p> <p>1.3 - Minimizar o custo de manutenção</p> <p>1.4 - Minimizar a necessidade de fiscalização/revisão</p> <p>2 - Minimizar as emissões de gases de efeito estufa</p> <p>2.1 - Minimizar a emissão de CO<sub>2</sub></p> <p>2.2 - Minimizar a emissão de Enxofre</p> <p>2.3 - Minimizar a emissão de CO</p> <p>2.4 - Minimizar a emissão de Metano</p> <p>3 - Preferir o equipamento com maior abrangência no mercado</p> <p>3.1 - Preferir equipamento com maior disponibilidade no mercado</p> <p>3.2 - Preferir equipamento com maior disponibilidade de mão de obra especializada para manutenção</p> <p>3.3 - Minimizar o tempo para aquisição do equipamento</p> <p>4 - Minimizar o descarte de combustíveis</p> <p>4.1 - Escolher o combustível com menor deterioração em estoque</p> <p>4.2 - Minimizar a necessidade de reabastecimento</p> <p>5 - Minimizar os riscos de acidente</p> <p>5.1 - Preferir o equipamento mais seguro</p> <p>5.2 - Preferir o combustível menos inflamável</p>
---

Por fim, chegou-se à conclusão que 6 critérios seriam necessários para atingir os objetivos dos decisores, sendo eles:

- (1) Custo de operação (R\$/h – reais por hora): Critério que demonstra quanto custa para um gerador de 150KVA (de marca conhecida pelo engenheiro) operar por uma hora, cujas especificações são catalogadas pela marca (incluindo consumo) e pode ser encontrado para todas as alternativas de combustível listadas;

- (2) Custo de investimento (R\$): Também pode ser chamado de Custo de Implantação, é o valor total em reais que o cliente terá que desembolsar para implantar o gerador em sua empresa/indústria dependendo do combustível que escolher.
- (3) Custo de manutenção (R\$/ano – reais por ano): é o critério que traz o valor gasto durante o ano com manutenções preventivas e preditivas. É importante ressaltar que muitos desses valores são fixados pela regulagem do gerador e também de cada combustível.
- (4) Troca de estoque: Critério com dados discretos, de 1 a 5, conforme Tabela 6, que mostra a necessidade de descartar combustíveis mantidos em estoque e colocar novos. O decisor engenheiro sugeriu esse critério em especial, pois no Brasil existem normas que proibem o uso do diesel vendido em período maior que 3 meses com no máximo 4 meses, caso tenha aditivos, pois acaba perdendo propriedades em sua substância e isso pode acarretar problemas graves futuros.

Tabela 6 - Descrição do Critério 4

Valor	Troca de estoque	Intervalo
5	Muito frequente	1-5 meses
4	Frequente	6-11 meses
3	Ocasionalmente	12-23 meses
2	Raramente	24-36 meses
1	Nunca	

- (5) Disponibilidade de mão de obra qualificada para manutenção corretiva: Critério com dados discretos, de 1 a 5, conforme Tabela 7, que mostra a dificuldade de encontrar mão de obra qualificada para realizar a manutenção corretiva. O decisor engenheiro sugeriu esse critério em especial, pois no Brasil é muito difícil encontrar profissionais

Tabela 7 - Descrição do critério 5

Valor	Disponibilidade de mão de obra qualificada para manutenção corretiva
5	Sempre disponível
4	Disponível na maioria das vezes
3	Moderadamente disponível
2	Pouco disponível
1	Indisponível

capacitados para realizar esse tipo de trabalho especificamente para o GLP e GN, o que pode influenciar muito na escolha do equipamento mais adequado.

- (6) Emissão de CO<sub>2</sub> (tonCO<sub>2e</sub>/GWh): Quantidade em toneladas de CO<sub>2</sub> emitida por quantidade de energia gasta pelo combustível;

#### 4.2.3. VFT - Etapa 3 e 4

As Etapas 3 e 4 são relacionadas às alternativas, sendo necessária a criação de uma lista com várias alternativas possíveis e, posteriormente, a filtragem de cada alternativa para que se possa chegar numa lista final mais compacta e que atenda às preferências dos decisores. No entanto, o problema se desenhou ao redor de um grupo gerador em regime de *standby*, especificamente, um gerador que atendesse a capacidade de 150KVA, de marcas conhecidas pelo engenheiro. Esses geradores disponíveis, contemplavam apenas 3 tipos de combustíveis (alternativas), sendo eles:

- Diesel: Combustível líquido destinado especificamente para uso em um motor a diesel, também conhecido como óleo diesel. Neste tipo de motor de combustão interna, o combustível inflama sem uma vela de ignição como resultado da compressão do ar de entrada e da subsequente infusão de combustível. Portanto, as características de ignição do óleo diesel devem ser boas.
- GLP: O gás liquefeito de petróleo (GLP ou gás LP) é um gás combustível que contém uma mistura inflamável de gases de hidrocarbonetos, especificamente propano, propileno, butileno, isobutano e n-butano. Quando o GLP é usado para abastecer motores de combustão interna, geralmente é chamado de autogás ou autopropano. Em alguns países, tem sido usado desde a década de 1940 como uma alternativa à gasolina para motores de ignição por faísca.
- O gás natural (GN) é uma mistura natural de hidrocarbonetos gasosos que consiste principalmente em metano, além de várias quantidades menores de outros alcanos superiores. Normalmente, também estão presentes níveis baixos de gases residuais, como dióxido de carbono, nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e hélio. Um gerador de energia a gás natural é gerador termelétrico que queima gás natural para gerar eletricidade, seu funcionamento é bastante similar ao do gerador a GLP, e a conversão do equipamento pode ser feita de maneira prática, de acordo com o engenheiro.

Apesar da escolha às 3 alternativas, é importante destacar algumas possíveis alternativas, como o biodiesel, biomassa e a gasolina, que não foram selecionadas, devido ao fato de não ter sido encontrado equipamento que utilizasse essas alternativas como combustível.

### 4.3. Aplicação do FITradeoff

Após a estruturação do problema pelo VFT, foi possível identificar os critérios e alternativas de acordo com as preferências do decisor. Seguindo o que foi definido no Capítulo 3 de metodologia, deve-se seguir para a aplicação do problema no *software* que utiliza o método FITradeoff, para problemática de ordenação multicritério.

#### 4.3.1. FITradeoff - Etapa 1

A Primeira Etapa da aplicação do FITradeoff é o registro do problema através da definição dos critérios e alternativas. Ambos foram definidos através do VFT, então basta apenas registrar no *software* as informações preliminares. A Tabela 8 mostra como foi definido os critérios no *software* FIT tradeoff, lembrando que os critérios serão aplicados às 3 alternativas: GLP, GN e Diesel, também declaradas no *software*.

Tabela 8 - Descrição de critérios para o FITradeoff

Critérios	Tipo de Escala	Objetivo	Função
Custo de operação	Contínua	Minimização	Linear
Custo de investimento	Contínua	Minimização	Linear
Custo de manutenção	Contínua	Minimização	Linear
Troca de estoque	Discreta – 5 níveis	Minimização	Linear
Disponibilidade de mão de obra qualificada para manutenção corretiva	Discreta – 5 níveis	Maximização	Linear
Emissão de CO <sub>2</sub>	Contínua	Minimização	Linear

### 4.3.2. FITradeoff - Etapa 2

A Segunda Etapa do FITradeoff consiste na declaração dos valores dos critérios em relação às alternativas. Esses dados foram coletados com auxílio do engenheiro, que trouxe informações coletadas pelo histórico dele e de dados tabelados pelas marcas de grupos geradores de cada fonte de energia. A Tabela 9 traz a Matriz de Consequências que foi preenchida no *software*, contendo os valores de cada critério. Além disso, foram adicionadas as unidades de cada critério na tabela, para melhor entendimento do leitor.

Tabela 9 - Matriz de consequências

Critérios	Unidade	Alternativas		
		GLP	GN	Diesel
Custo de operação	R\$/h	103,75	176,9	111,2
Custo de investimento	R\$	318590	312590	115560
Custo de manutenção	R\$/ano	960	960	2440
Troca de estoque	Discreta – 5 níveis	1	1	5
Disponibilidade de mão de obra qualificada para manutenção corretiva	Discreta – 5 níveis	1	1	5
Emissão de CO <sub>2</sub>	tonCO <sub>2e</sub> /GWh	130	499	733

Vale destacar a vantagem do Diesel no custo de investimento e nos critérios de troca de estoque e disponibilidade de mão-de-obra para manutenção. No entanto, ele fica abaixo em emissão de CO<sub>2</sub> e custo de manutenção. O GLP e o GN possuem valores semelhantes em alguns critérios, porém, o GLP demonstra um custo de operação menor e uma emissão de CO<sub>2</sub> mais baixa quando comparado tanto com o GN quanto ao Diesel.

### 4.3.3. FITradeoff - Etapa 3

Conforme mencionado anteriormente, o *software* do FITradeoff executa um modelo de problema de programação linear para determinar as relações entre as opções viáveis. Na etapa 3 do modelo, a aplicação pede para que o decisor ordene os critérios, perguntando ao decisor

qual critério ele prefere de um a um, até que se forme a lista. Vale ressaltar que esta etapa foi realizada individualmente com cada decisor, para analisar o resultado de cada um. A Figura 6 mostra a tela do *software* que demonstra como é feito esse processo de escolha. A Tabela 10 mostra a ordenação do decisor empresário em relação aos critérios escolhidos e a Tabela 11 mostra a ordenação do decisor engenheiro.

Importante ressaltar que nesta etapa, o *software* apresenta valores ótimos de cada critério, para que o decisor decida entre o preferido dentre as opções par-a-par.

**Ranking of criteria scaling constants**  
By pairwise comparison  
Answer the following questions by choosing consequences A or B

Consequences

Consequence A

C1		B1:103.75
C2	W2:318589.99	B2:115660
C3	W3:2440	B3:960
C4	W4:5	B4:1
C5	W5:1	B5:5
C6	W6:733	B6:130

Worst Best

Consequence B

C1	W1:176.9	B1:103.75
C2		B2:115660
C3	W3:2440	B3:960
C4	W4:5	B4:1
C5	W5:1	B5:5
C6	W6:733	B6:130

Worst Best

W1 is the worst outcome of criterion C1  
B1 is the best outcome of criterion C1

Alternatively the ranking of scaling constants can be done by [Overall evaluation](#).

**Which consequence do you prefer?**

Consequence A  
 Consequence B

**Legend:**

- No Selection --
- C1-Custo de operação
- C2-Custo do equipamento
- C3-Custo de manutenção
- C4-Frequência da troca de combust
- C5-Disponibilidade de mão de obra
- C6-Emissão de GEE

**Chosen order of scaling constants:**

Restart OK

[Continue](#)

Figura 6 – Captura de tela do menu de ordenação dos critérios no software

Tabela 10 - Ordem dos critérios pelo decisor empresário

Ordem	Critérios
C1	Disponibilidade de mão de obra qualificada para manutenção corretiva
C2	Custo de investimento
C3	Emissão de CO <sub>2</sub>
C4	Custo de manutenção
C5	Troca de estoque

C6	Custo de operação
----	-------------------

Tabela 11 - Ordem dos critérios pelo decisor engenheiro

Ordem	Cr�terios
C1	Disponibilidade de m�o de obra qualificada para manuten�o corretiva
C2	Custo de manuten�o
C3	Troca de estoque
C4	Custo de investimento
C5	Custo de opera�o
C6	Emiss�o de CO <sub>2</sub>

#### 4.3.4. FITradeoff - Etapa 4

Na etapa 4, o decisor   inicialmente apresentado a duas consequências. A resposta a esta questão irá especificar o tipo de distribui o das constantes de escala, que podem ser sensivelmente diferentes ou aproximadamente iguais (de Almeida et al. 2016). A Figura 7 compara a consequência intermediária do critério “Disponibilidade de mão de obra qualificada para manuten o corretiva” (Consequência A) com uma consequência ótima do critério “Custo de opera o” (Consequência B).

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

Consequence A

C1	<div style="background-color: blue; height: 15px; width: 30%;"></div> X1:3
C2	W2:318589.99
C3	W3:733
C4	W4:5
C5	W5:2440
C6	W6:176.9

Consequence B

C1	<div style="background-color: red; height: 15px; width: 5%;"></div> W1:1
C2	W2:318589.99
C3	W3:733
C4	W4:5
C5	W5:2440
C6	<div style="background-color: green; height: 15px; width: 80%;"></div> B6:103.75

Figura 7 - Elicitação por decomposição

#### 4.3.5. FITradeoff - Etapa 5

Na quinta e penúltima etapa, o ciclo de comparação entre as consequências que o *software* apresenta se repete até que o algoritmo consiga encontrar todos os níveis do ranqueamento das alternativas. Esse processo de elicitación flexível deve ser inteiramente respondido pelo decisor, individualmente, assim como as etapas passada. Na Tabela 12, podemos ver as escolhas do decisor empresário frente às consequências que lhe foram apresentada no processo de elicitación flexível. A Tabela 13 mostra as escolhas do decisor engenheiro. Nas tabelas, podemos notar que o modelo apresenta valores variados de cada critério até que se encontre as melhores relações entre as alternativas.

Tabela 12 - Escolhas do decisor empresário no processo de elicitación

Ciclo	Consequência A	Consequência B	Resposta
1	3 de Disponibilidade de mão de obra qualificada	Custo de operação (103.75)	Consequência A
2	3 de Disponibilidade de mão de obra qualificada	Custo de investimento (115560)	Consequência B

3	217074.995 de Custo de investimento	Emissão de CO <sub>2</sub> (130)	Consequência B
4	431.500 de Emissão de CO <sub>2</sub>	Troca de estoque (1)	Consequência B
5	3 de Troca de estoque	Custo de manutenção (960)	Consequência B
6	1700,00 de Custo de manutenção	Custo de operação (103.75)	Consequência B
7	4 de Disponibilidade de mão de obra qualificada	Custo de investimento (115560)	Consequência B
8	166317.498 de Custo de investimento	Emissão de CO <sub>2</sub> (130)	Consequência A
9	280.750 de Emissão de CO <sub>2</sub>	Troca de estoque (1)	Consequência B
10	2 de Troca de estoque	Custo de manutenção (960)	Consequência B
11	1330,00 de Custo de manutenção	Custo de operação (103.75)	Consequência B
12	191696.246 de Custo de investimento	Emissão de CO <sub>2</sub> (130)	Consequência A

Tabela 13 - Escolhas do decisor engenheiro no processo de elicitação

Ciclo	Consequência A	Consequência B	Resposta
1	3.000 de Disponibilidade de mão de obra qualificada	Emissão de CO <sub>2</sub> (130)	Consequência A
2	3.000 de Disponibilidade de mão de obra qualificada	Custo de manutenção (960)	Consequência B
3	1700.000 de Custo de manutenção	Troca de estoque (1)	Consequência B
4	3.000 de Troca de estoque	Custo de investimento (115560)	Consequência B
5	217075.000 de Custo de investimento	Custo de operação (103.75)	Consequência B
6	140.325 de Custo de operação	Emissão de CO <sub>2</sub> (130)	Consequência A
7	4.000 de Disponibilidade de mão de obra qualificada	Custo de manutenção (960)	Consequência A
8	1330.000 de Custo de manutenção	Troca de estoque (1)	Consequência A
9	2.000 de Troca de estoque	Custo de investimento (115560)	Consequência B
10	166317.500 de Custo de investimento	Custo de operação (103.75)	Consequência A
11	158.613 de Custo de operação	Emissão de CO <sub>2</sub> (130)	Consequência A

#### 4.3.6. FITradeoff - Etapa 6

Por fim, após o decisor empresário responder 12 questões e o decisor engenheiro responder 11, o modelo apresentou a mesma ordenação com 3 níveis conforme ilustrado pelo diagrama de Hasse na Figura 8. Como resultado, foi possível verificar que o Diesel se mostrou o combustível melhor ranqueado entre as 3 alternativas listadas, seguido pelo GLP e pelo GN, respectivamente. O que demonstra que de acordo com a preferência de ambos os decisores, eles chegaram à uma mesma saída para o problema.

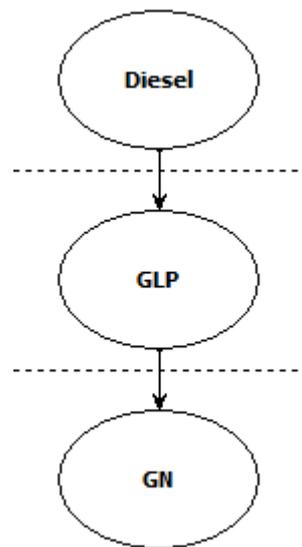


Figura 8 - Diagrama de Hasse

O intervalo das constantes de escala de cada critério foram definidas pelo software, de acordo com as respostas de cada decisor. A Figura 9 mostra o espaço de pesos dos critérios do decisor empresário e a Figura 10, os do decisor engenheiro.

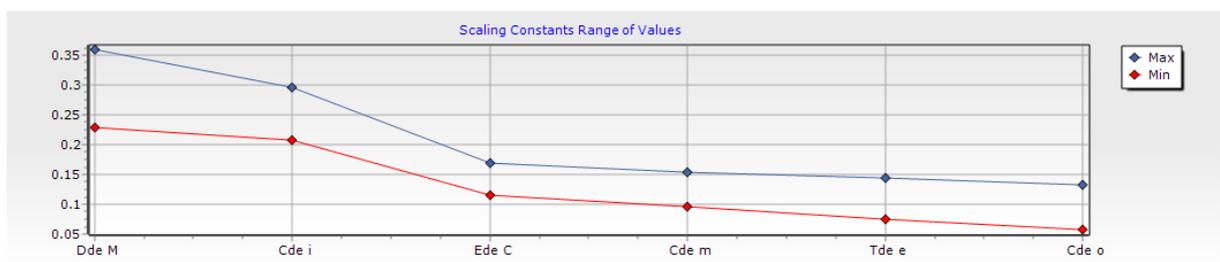


Figura 9 – Constantes de escala do decisor empresário

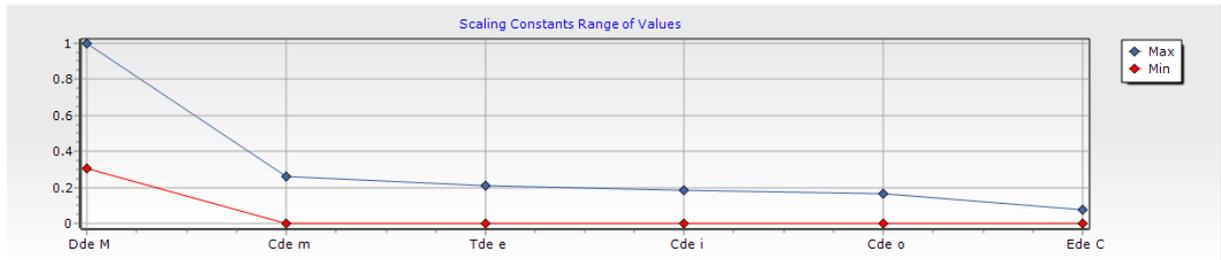


Figura 10 – Constantes de escala do decisor engenheiro

#### 4.4. Análise de sensibilidade

A fim de se ter uma ideia de como o resultado pode mudar de acordo com o impacto nas saídas do modelo diante de variações nos parâmetros de entrada e de analisar o desempenho do GLP, foi conduzida uma análise de sensibilidade para o modelo de cada decisor, que pôde ser feita ainda no *software* do FITradeoff, disponibilizada como uma ferramenta dentro da aplicação. Inicialmente, foi realizado uma análise variando todos os valores dos critérios em 5%, 10% e 15% para mais ou para menos. A Tabela 14 mostra essa primeira análise, aplicada ao modelo do decisor empresário.

Tabela 14 - Primeira análise de sensibilidade do decisor empresário

Variação	Alternativas	Posição		
		1	2	3
± 5%	GLP	0.80%	99.20%	0.00%
	GN	0.00%	0.80%	99.20%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%
± 10%	GLP	9.20%	90.80%	0.00%
	GN	0.00%	9.20%	90.80%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%
± 15%	GLP	42.40%	57.60%	0.00%
	GN	0.00%	42.40%	57.60%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%

Para ele, o modelo se mostrou muito robusto até a variação de 10% nas constantes de escala, porém, ao variarmos em 15%, o modelo mostrou uma mudança maior na colocação das alternativas GLP e GN, mas, ainda demonstrou-se ser robusto, uma vez que em 100% dos casos, o *ranking* se manteve inalterado para o Diesel.

A Tabela 15 traz os resultados da primeira análise para o decisor engenheiro. Nessa simulação, vemos que igualmente à Tabela 14, o modelo se mostrou muito robusto até a variação de 10% e robusto na de 15%, no entanto, é interessante notar que a sensibilidade do modelo do decisor engenheiro foi maior em todas as variações.

Tabela 15 - Primeira análise de sensibilidade do decisor engenheiro

Variação	Alternativas	Posição		
		1	2	3
± 5%	GLP	11.70%	88.30%	0.00%
	GN	0.00%	11.70%	88.30%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%
± 10%	GLP	15.10%	84.90%	0.00%
	GN	0.00%	15.10%	84.90%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%
± 15%	GLP	37.80%	62.20%	0.00%
	GN	4.90%	35.60%	59.50%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%

A fim de se avaliar outros cenários, decidiu-se que seria interessante analisar a sensibilidade das alternativas quanto à variação nos critérios: Disponibilidade de Mão de Obra e Custo de Investimento. O primeiro em razão de ser o critério de maior importância para ambos os decisores, e o segundo por ser um critério que demonstra um desempenho bastante discrepante entre o Diesel e o restante. Nesta segunda análise, foi possível verificar que para o decisor empresário, variando em um aumento de até 15% do critério Disponibilidade de Mão de Obra, não houve mudança alguma na colocação das alternativas, isto mostra que o modelo é pouco sensível a alterações na constante de escala desse critério. Já para a diminuição do critério Custo de Investimento, o modelo se mostrou mais sensível, conforme apresentado na Tabela 16, porém, ainda pode ser considerado robusto até uma diminuição de 15% na constante de escala deste critério.

Tabela 16 - Segunda análise de sensibilidade do decisor empresário

Variação	Alternativas	Posição		
		1	2	3
- 5%	GLP	3.10%	96.90%	0.00%
	GN	0.00%	3.10%	96.90%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%
- 10%	GLP	28.50%	71.50%	0.00%
	GN	0.00%	28.50%	71.50%
	Diesel	100.00%	0.00%	0.00%
- 15%	GLP	40.20%	59.80%	0.00%
	GN	4.90%	35.60%	59.50%
	Diesel	0.00%	40.20%	59.80%

Com o decisor engenheiro, foi possível identificar uma sensibilidade maior para os dois critérios. Ao variar em apenas 5% para mais no critério Disponibilidade de Mão-de-obra ou em reduzir 5% no critério Custo de Investimento, o modelo já demonstrou muita sensibilidade, subindo uma colocação em 100% das vezes, tanto para o GLP quanto para o GN. Já para o Diesel, ele se manteve em primeiro em 100% das vezes.

#### **4.4.1. Discussão sobre a análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade permitiu aos decisores e ao analista obter conclusões sobre a validade da saída do modelo de decisão utilizado e sobre o próprio modelo. No exemplo da primeira análise, conclui-se que, de maneira geral, o resultado é robusto, não sendo muito sensível a variações nos dados das alternativas. No entanto, é importante destacar a sensibilidade do modelo do decisor engenheiro quanto aos critérios Disponibilidade de Mão-de-obra e Custo de Investimento.

Uma alta sensibilidade em relação a um subconjunto de parâmetros pode ser desejável dependendo dos objetivos de um decisor. Por esse motivo, um resultado sensível não deve ser descartado imediatamente, mas analisado cuidadosamente pelo analista e pelo decisor para que possam chegar a uma conclusão sobre a validade do modelo.

No exemplo mencionado, considerando que a disponibilidade de mão-de-obra mais alta é aquela que representa maior importância dentre os critérios, é possível que o decisor aceite a recomendação, mesmo havendo sensibilidade, porque acredita que as alternativas com a disponibilidade de mão-de-obra mais alta devem ser tratadas com maior rigor. É importante ressaltar também que as variações nesses critérios não são tão sensíveis às variações de todos os critérios em conjunto, como demonstrado na Tabela 15, o que indica que a exigência se concentra no desempenho das alternativas. Dessa forma, mesmo com um alto grau de sensibilidade, o resultado de cada modelo pôde ser considerado adequado, sendo individualmente validado por ambos os decisores.

Esses resultados das análises, também podem indicar que, seguindo os modelos de cada um dos decisores, o GLP possui potencial para se tornar uma das melhores alternativas de combustível para grupo geradores de energia elétrica em *standby*, caso o desempenho de alguns critérios seus melhore. É esperado que com uma maior e variada participação no mercado nacional, os desempenhos nos critérios de Disponibilidade de Mão-de-obra e Custo de Investimento melhorem naturalmente.

Caso o GLP venha a se tornar uma alternativa viável no futuro, ele se tornará uma peça fundamental para a transição de combustíveis sustentáveis, podendo ter grande impacto na redução de gases de efeito estufa, incluindo a redução das emissões de poluentes atmosféricos, maior eficiência energética, diversificação da matriz energética, menor impacto ambiental (se produzido de maneira sustentável), facilidade de armazenamento e manuseio e um estímulo positivo para a indústria do GLP, criando oportunidades econômicas e de emprego.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa apresentou a análise do GLP como combustível de transição em um gerador de energia elétrica, desenvolvendo um modelo de decisão multicritério para ordenação de fontes de energia, onde os objetivos e valores de dois decisores foram extraídos utilizando o método de estruturação de problema VFT, o que possibilitou a listagem de critérios e alternativas que seriam necessários para atender aos objetivos dos decisores, ajudando a compreender a problemática e a racionalidade dos decisores. Portanto, o VFT se mostrou uma ferramenta útil e eficaz para estruturação de um problema multicritério.

Com a identificação da racionalidade e a problemática, foi possível indicar o FITradeoff para solução do problema. Passando pelas questões de ordenação e elicitação flexível, foi possível extrair do decisor as constantes de escala dos critérios e suas preferências em relação ao desempenho de um melhor critério frente ao desempenho de um pior critério. Após rodar o modelo com uma aplicação numérica, foi possível verificar que o método FITradeoff se mostrou eficaz no que se propõe. Com ele, foi possível chegar em uma recomendação final para cada um dos decisores.

De acordo com as preferências individuais dos decisores, o Diesel demonstrou ser a melhor alternativa de combustível para geradores, seguido do GLP e do GN, respectivamente. Esse resultado converge para a escolha do diesel por parte de ambos decisores, porém, uma análise de sensibilidade foi conduzida que permitiu investigar como as mudanças nos parâmetros de entrada de um modelo afetam as saídas e os resultados obtidos. Neste estudo, utilizamos a análise de sensibilidade para compreender o desempenho do GLP no modelo dos dois decisores.

Por fim, o modelo de decisão criado individualmente para cada um dos decisores se demonstrou robusto, mas com uma sensibilidade alta nos critérios de Disponibilidade de Mão-de-obra e Custo de Investimento, que podem indicar uma mudança na colocação do GLP, para primeiro lugar, caso ele tenha uma melhora no desempenho desses critérios no modelo de cada decisor. Cabe ressaltar que esse foi um modelo de decisão multicritério individual e não em grupo, no entanto, acreditamos que com o método de estruturação de problemas (VFT) e o método multicritério (FITradeoff) também se possa replicar modelos para uma decisão em grupo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do modelo com mais alternativas de combustíveis, como por exemplo: a energia solar, o biodiesel, biomassa e a gasolina e etc., para que se possa avaliar o desempenho do GLP em relação à essas alternativas e também quais

impactos ambientais, sociais e econômicos isso poderia trazer. Além disso, também é interessante realizar uma aplicação de um modelo de decisão em grupo, que possa contar com decisores de diferentes setores (ambiental, econômico e social, por exemplo) para avaliar qual seria a possível decisão para o problema e também de validar a eficácia dos métodos utilizados.

## REFERÊNCIAS

ADIYASA, I. W., FIRMANSYAH, E., CAHYADI, A. I., e KAUTSAR, A. Design of Simple ECU for LPG Fuel Injection on Conventional Generator Set. 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST). 2018.

ALIPOUR, M., ALIGHALEH, S., HAFEZI, R., e OMRANIEVARDI, M. A new hybrid decision framework for prioritizing funding allocation to Iran's energy sector. *Energy*, 121, 388–402. 2017.

BAHREMAND, A., e DE SMEDT, F. Distributed Hydrological Modeling and Sensitivity Analysis in Torysa Watershed, Slovakia. *Water Resources Management*, 22(3), 393–408. 2007.

BECCALI, M., CELLURA, M., e MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), 2063–2087. 2003.

BELLO, A., e HUERTA, E. Regulation and market power in the Spanish liquefied petroleum gas industry: Progress or failure? *Energy Policy*, 35(7), 3595–3605. 2007.

BELTON, V. e STEWART, T. J. *MULTIPLE CRITERIA DECISION ANALYSIS*. Dordrecht: Springer-Science+Business Media, B. V., 2002.

BHARAMBE, G. P., PHALKE, R. A., TANKSALE, A. N., SHAIKH, M. S., e KALE, S. A. LPG price hike in India: Awakening Renewable energy. 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. 2013.

BP. *BP Statistical Review of World Energy*, [s.l.: s.n.], 2022

BRASIL. Lei nº 8.176, de 8 de fevereiro de 1991. Define crimes contra a ordem econômica e cria o Sistema de Estoques de Combustíveis. Brasília, DF. 1991. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8176.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8176.htm). Acessado em fevereiro de 2021

BÜYÜKÖZKAN, G., FEYZIOĞLU, O., e GÖÇER, F. Selection of sustainable urban transportation alternatives using an integrated intuitionistic fuzzy Choquet integral approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 186–207. 2018.

CHEN, L., e REN, J. Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis. *Journal of Air Transport Management*, 68, 176–186. 2018.

DAI, W., QIN, C., TANG, J., LU, Z., e LI, Z. A study on the interchangeability of biogas-LPG mixed gases with biogas and LPG qualities. 2011 *International Conference on Materials for Renewable Energy e Environment*. 2011.

DE ALMEIDA, A. T., MORAIS, D. C., COSTA, A. P. C. S., ALENCAR, L. H. E DAHER, S. F. D., *Decisão em Grupo e Negociação: Métodos e Aplicações*. São Paulo: Atlas, 2012.

DE ALMEIDA, A. T. *Processo de decisão nas organizações*. São Paulo: Atlas. 2013.

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*. Springer International Publishing, 2015.

DE ALMEIDA, A.T.; Almeida, J.A.; Costa, A.P. C.S.; Almeida-Filho, A.T. A New Method for Elicitation of Criteria Weights in Additive Models: Flexible and Interactive Tradeoff. *European Journal of Operational Research*, 250(1): 179-191. 2016.

DE MACEDO, P.P., MOTA, C.M.D.M., SOLA, A.V.H. Meeting the Brazilian Energy Efficiency Law: A flexible and interactive multicriteria proposal to replace non-efficient motors. *Sustainable Cities and Society*, 41, pp. 822-832. 2018

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] *Balanco Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021, 2022*. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em novembro de 2022.

ESMERALDO, L. e BELDERRAIN, M. C. N. Métodos de Estruturação de Problemas SODA Strategic Options Development and Analysis e VFT–Value Focused Thinking em Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (AMD). In: Anais do XVI ENCITA, s.p. São José dos Campos. ITA. 2010

FOSSILE, D. K., FREJ, E. A., DA COSTA, S. E. G., DE LIMA, E. P., e DE ALMEIDA, A. T. Selecting the Most Viable Renewable Energy Source for Brazilian Ports Using the FITradeoff method. *Journal of Cleaner Production*, 121107. 2020.

FREJ, E. A., ROSELLI, L. R. P., DE ALMEIDA, J. A., e DE ALMEIDA, A. T. A Multicriteria Decision Model for Supplier Selection in a Food Industry Based on FITradeoff Method. *Mathematical Problems in Engineering*. 1–9. 2017.

FREJ, E.A., DE ALMEIDA, A.T. e COSTA, A.P.C.S. Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. *Operational Research*, 19, p. 909–931. 2019.

GHARAIBEH, B. M. Y., AWNI MUSMAR, S., AL-ZAMER, E., e AL-ZAMER, S. S. Analytical Hierarchy Process-Based Decision Making for Evaluating the Use of Pyrolytic Carbon Black as an Alternative Source of Heating in Refugee Camps in Jordan. 2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC). 2021.

HEPBASLI, A. Liquefied Petroleum Gas in Turkey's Energy Sources. *Energy Sources*, 25(5), 373–382. 2003.

HICKEY R. B. *Electrical Construction Databook*, McGraw Hill, 2002.

HILL, M.C., KAVETSKI, D., CLARK, M., YE, M., ARABI, M., LU, D., FOGLIA, L. and MEHL, S. Practical Use of Computationally Frugal Model Analysis Methods. *Groundwater*, 54: 159-170. 2016.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Special Report: Global Warming of 1.5 °C*. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

ISAKOWER, S., e WANG, Z. A comparison of regular price cycles in gasoline and liquefied petroleum gas. *Energy Economics*, 45, 445–454. 2014.

KAJIWARA, M., SUGIYAMA, K., SAGARA, M., MORI, M., GOTO, S., e ALAM, M. Performance and Emissions Characteristics of an LPG Direct Injection Diesel Engines. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2002-01-0869. 2002.

KEENEY, R. L., RAIFFA, H., e RAJALA, D. W. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(7), 403–403. doi:10.1109/tsmc.1979.4310245. 1979

KEENEY, R. L. e RAIFFA, R. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. 3. ed. London: Systems Research and Behavioral Science, 1993.

KIM, K., LEE, J., e KIM, J. Can liquefied petroleum gas vehicles join the fleet of alternative fuel vehicles? Implications of transportation policy based on market forecast and environmental impact. *Energy Policy*, 154, 112311. 2021.

GIANG, N.V.L. e SON, H.P. Experimental research on the fuel control system of an internal combustion engine using dual-fuel LPG-Diesel. In 2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE) (pp. 365-370). IEEE. 2017

GRECO S., MATARAZZO B., SŁOWIŃSKI R. Decision rule approach. In: Figueira J, Greco S, Ehrgott M (eds) Multiple criteria decision analysis: state-of-the-art surveys. Springer, New York, pp 507–562. 2005.

NOEL, M. D. Edgeworth price cycles and focal prices: computational dynamic Markov equilibria. *J. Econ. Manag. Strategy* 17 (2), 345–377. 2008.

NWAOKOCHA, C. e OKEZIE, S. A Conversion Of Petrol Generator To Enable The Use Of Liquefied Petroleum Gas (Propane). 1. 1-6. 2016

NWAOKOCHA, C., SOLOMON, G., KUYE, S., ADEALA, A., LAYENI, A., KALE, S. e OKEZIE, S. Emissions Characteristics Of LPG Retrofitted Generator. 6. 41-47. 2018.

OECD. Green Finance and Investment Promoting Clean Urban Public Transportation and Green Investment in Kazakhstan. OECD Publishing, p. 124. 2017.

OMS. Organização Mundial da Saúde: Poluição do Ar, 2022. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>. Acessado em dez/2022.

OMS. Burning opportunity: clean household energy for health, sustainable development, and wellbeing of women and children. In: World Health Organization, Geneva. 2016

OZTAYSI, B., CEVIK ONAR, S., KAHRAMAN, C., e YAVUZ, M. Multi-criteria alternative-fuel technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 128–148. 2017.

PHILIPS, J. A., WALLACE, K. E., KUDO, T. Y., e ETO, J. H. Onsite and Electric Power Backup Capabilities at Critical Infrastructure Facilities in the United States. Argonne National Laboratory. 2016.

POHEKAR, S. D., & RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. 2004.

RASLAVIČIUS, L., KERŠYS, A., MOCKUS, S., KERŠIENĖ, N., e STAREVIČIUS, M. Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513–525. 2014.

RAYCHAUDHURI, S. Introduction to Monte Carlo simulation. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, p. 91–100, 2008.

ROY, Bernard. *Multicriteria methodology for decision aiding: nonconvex optimization and its applications*. Springer US, v. 12, 1996.

SAHA, C. K., SABBIR, A. S. M. Y. B., SARKER, S., e Alam, M. M. Development and Evaluation of LPG Based Heating System for BAU-STR Dryer. 2020 ASABE Annual International Virtual Meeting, July 13-15. 2020.

SHAH, Y.T. Chemical Energy from Natural and Synthetic Gas (1st ed.). CRC Press. 2017.

SLADE, S. Goal-Based Decision Making. Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ. 1994.

ULLAH, K., HAMID, S., MIRZA, F. M., e SHAKOOR, U. Prioritizing the gaseous alternatives for the road transport sector of Pakistan: A multi criteria decision making analysis. Energy, 165, 1072–1084. 2018.

WATSON H, GOWDIE D. The systematic evaluation of twelve LP Gas fuels for emissions and fuel consumption. SAE Technical Paper. 2000.

World LPG Association (WLPGA). The role of LPG in shaping the energy transition. 2018. Disponível em: <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2018/10/The-role-of-LPG-in-shaping-the-energy-transition-2018.pdf>

WHITAKER J.C. AC Power Systems Handbook, 3ª Edição. p. 325. 2006.

YOON, K.P. e HWANG, C.L. Multiple Attribute Decision Making: An Introduction. Sage Publications, Thousand Oaks. 1995.

ZELENY, M. Multiple Criteria Decision Making. McGraw-Hill Book Company, New York. 1982.

APÊNDICE:

Lista de artigos revisados na Revisão Bibliográfica

## APÊNDICE

## Referência

- 
- Artigo 1 Tzeng, G.-H, e Opricovic, S. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- Artigo 2 Kahraman, C., e Kaya, İ. (2010). A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*, 37(9), 6270–6281.
- Artigo 3 Chang, Y.-H., Yeh, C.-H., e Chang, Y.-W. (2013). A new method selection approach for fuzzy group multicriteria decision making. *Applied Soft Computing*, 13(4), 2179–2187.
- Artigo 4 Streimikiene, D., Baležentis, T., e Baležentienė, L. (2013). Comparative assessment of road transport technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 611–618.
- Artigo 5 Aydın, S., e Kahraman, C. (2014). Vehicle selection for public transportation using an integrated multi criteria decision making approach: A case of Ankara. *Journal of Intelligent e Fuzzy Systems*, 26(5), 2467–2481.
- Artigo 6 Yavuz, M., Oztaysi, B., Cevik Onar, S., e Kahraman, C. (2015). Multi-criteria evaluation of alternative-fuel vehicles via a hierarchical hesitant fuzzy linguistic model. *Expert Systems with Applications*, 42(5), 2835–2848.
- Artigo 7 Mukherjee, S. (2017). Selection of Alternative Fuels for Sustainable Urban Transportation under Multi-criteria Intuitionistic Fuzzy Environment. *Fuzzy Information and Engineering*, 9(1), 117–135.
- Artigo 8 Oztaysi, B., Cevik Onar, S., Kahraman, C., e Yavuz, M. (2017). Multi-criteria alternative-fuel technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 128–148.
- Artigo 9 Sehatpour, M.-H., Kazemi, A., e Sehatpour, H. (2017). Evaluation of alternative fuels for light-duty vehicles in Iran using a multi-criteria approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 295–310.
- Artigo 10 Strantzali, E., Aravossis, K., e Livanos, G. A. (2017). Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a Greek island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 775–787.
- Artigo 11 Büyüközkan, G., Fezizioğlu, O., e Göçer, F. (2018). Selection of sustainable urban transportation alternatives using an integrated intuitionistic fuzzy Choquet integral approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 186–207.
- Artigo 12 Chen, L., e Ren, J. (2018). Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis. *Journal of Air Transport Management*, 68, 176–186.
- Artigo 13 Ullah, K., Hamid, S., Mirza, F. M., e Shakoor, U. (2018). Prioritizing the gaseous alternatives for the road transport sector of Pakistan: A multi criteria decision making analysis. *Energy*, 165, 1072–1084.
- Artigo 14 Hansson, J., Brynolf, S., Fridell, E., e Lehtveer, M. (2019). The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis. *Sustainability*, 12(8), 3265.
- Artigo 15 Liang, H., Ren, J., Lin, R., e Liu, Y. (2019). Alternative-fuel based vehicles for sustainable transportation: A fuzzy group decision supporting framework for sustainability prioritization. *Technological Forecasting and Social Change*, 140, 33–43.
-