



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

KELVIN EVERTON SANTOS DE MELO

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO SOBRE FONTES ALTERNATIVAS PARA A  
MATRIZ ENERGÉTICA DO APL DE GESSO PERNAMBUCANO: uma aplicação do  
PROMETHEE-ROC**

Caruaru  
2022

KELVIN EVERTON SANTOS DE MELO

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO SOBRE FONTES ALTERNATIVAS PARA A  
MATRIZ ENERGÉTICA DO APL DE GESSO PERNAMBUCANO: uma aplicação do  
PROMETHEE-ROC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para à obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente

Caruaru  
2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Nasaré Oliveira - CRB/4 - 2309

M528a      Melo, Kelvin Everton Santos de.  
              Avaliação multicritério sobre fontes alternativas para a matriz  
              energética do APL de gesso pernambucano: uma aplicação do  
              PROMETHEE-ROC. / Kelvin Everton Santos de Melo. – 2022.  
              122 f.; il.: 30 cm.

              Orientadora: Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente.

              Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA,  
              Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, 2022.  
              Inclui Referências.

              1. Gipsita (Gesso) - Calcinação. 2. Conglomerados (Empresas). 3.  
              Energia – Fontes Alternativas. 4. Processo decisório por critério múltiplo.  
              I. Clemente, Thárcylla Rebecca Negreiros (Orientadora). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.)

UFPE (CAA 2022-050)

KELVIN EVERTON SANTOS DE MELO

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO SOBRE FONTES ALTERNATIVAS PARA A  
MATRIZ ENERGÉTICA DO APL DE GESSO PERNAMBUCANO: uma aplicação do  
PROMETHEE-ROC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para à obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Aprovada em: 30/08/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profª. Dra. Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profª. Dra. Ana Paula Henriques Gusmão de Araújo Lima (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Leão e Silva Filho (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a Deus e a minha família.

## AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a Deus por me acolher sempre, me abraçar e sustentar meus passos e decisões e que chegar até aqui foram três anos tentando com momentos difíceis, mas, no entanto, necessários ao meu amadurecimento como pessoa e profissional. Quero também agradecer imensamente minha família, principalmente, meu pai Carlos, minha mãe Rosana, minha vó Arlete e meu irmão Igor que, cada qual a sua maneira, me apoiaram sempre com muito amor, carinho e cuidado durante essa jornada.

Quando encerrei meu ciclo em Maceió, antes de vir para Caruaru, confesso que tive muito receio do que me esperava, só que não imaginei encontrar pessoas incríveis de estar junto, mesmo nos tempos sombrios que a pandemia trouxe, a começar pelo meu companheiro Francisco, que andamos em dupla como apóstolos de Jesus, pois quando um fraqueja, o outro está lá pra sustentar, como também sua família, com irmãs e sobrinhos que ganhei, destacando, obviamente, minha sogra D. Arlira., e aos demais que convivem conosco nesse novo momento de nossas vidas.

Quero agradecer com louvor, minha professora orientadora, psicóloga e amiga, porque ela faz tudo, professora Thárcylla Negreiros, por me abraçar desde nosso primeiro contato até a conclusão desta importante etapa, assim como, a UFPE e aos demais professores que partilham comigo seus conhecimentos. E, por último, agradeço a FACEPE pelo apoio financeiro e, sobretudo, ao estudo, por acreditar que o esforço pelo conhecimento, se aplicado da melhor forma possível, muda vidas.

Se é do mato, amanse  
Trabalhou, descanse  
Se tem festa, dance  
Se tá longe, alcance  
Use sua chance  
Use sua chance  
(DO IT, 2004)

## RESUMO

A diversidade de insumos energéticos não renováveis e renováveis posiciona o Brasil como um dos países potencialmente aptos para realizar a transição energética que assimile de forma perene cada vez mais energias verdes, tendo em vista, uma presença significativa de 48,4% de energias renováveis na composição da matriz brasileira. Entretanto, na matriz energética do Arranjo Produtivo Local (APL) gesso pernambucano, importante Polo contendo uma cadeia produtiva de gipsita alocada no Sertão de Pernambuco, e responsável por cerca de 95% do gesso consumido no território nacional, observa-se o domínio da exploração da lenha nativa presente no processo de calcinação da gipsita para gesso, devido à existência de condicionantes culturais, econômicas e tecnológicas que inibem a participação de outras fontes. Por tal perspectiva, a utilização de um determinado insumo para fins energéticos deve se embasar no seu desempenho sobre parâmetros-chave que possam atestar sua viabilidade em comparação com demais alternativas disponíveis. Portanto, o objetivo deste trabalho consistiu em proporcionar uma análise multicritério suportada pela aplicação do método PROMETHEE-ROC para o problema de priorização das fontes de energia viáveis ao contexto de atendimento à demanda energética do APL gesso pernambucano, mediante a metodologia proposta. Como resultado, as preferências do decisor contemplaram as alternativas com melhores desempenhos nos critérios Eficiência térmica (C6), Capacidade produtiva (C4) e Consumo da fonte energética (C5), destacando o Gás Natural, o Óleo Diesel e a Energia Solar, respectivamente, como as opções para inserção na matriz energética local. Entretanto, conforme discussões realizadas acerca dos resultados encontrados, ponderações traçadas entre os cenários real e o vislumbrado através da abordagem multicritério, avaliando-se as oportunidades de reais de aplicação das fontes energéticas no Polo.

**Palavras-chave:** processo de calcinação; matriz energética; APL gesso de Pernambuco; PROMETHEE-ROC.



## ABSTRACT

The diversity of non-renewable and renewable energy inputs positions Brazil as one of the countries potentially able to carry out the energy transition that perennially assimilates more and more green energies, in view of a significant presence of 48.4% of renewable energies in the composition of the Brazilian matrix. However, in the energy matrix of the Pernambuco gypsum APL, an important Pole containing a gypsum production chain located in the Sertão of Pernambuco, and responsible for about 95% of the gypsum consumed in the national territory, there is a dominance of the exploitation of native firewood present in the process of calcination of gypsum to plaster, due to the existence of cultural, economic and technological constraints that inhibit the participation of other sources. From this perspective, the use of a given input for energy purposes must be based on its performance on key parameters that can attest to its viability compared to other available alternatives. Therefore, the objective of this work was to provide a multi-criteria analysis supported by the application of the PROMETHEE-ROC method for the problem of prioritizing viable energy sources in the context of meeting the energy demand of the Pernambuco plasterboard APL, assuming a local decision maker and company. As a result, the decision-maker's preferences contemplated the alternatives with the best performance in the criteria Thermal efficiency (C6), Productive capacity (C4) and Consumption of energy source (C5), highlighting Natural Gas, Diesel Oil and Solar Energy, respectively, as the options for insertion in the local energy matrix. However, according to discussions about the results found, weights drawn between the real scenarios and the ones envisioned in the multi-criteria approach evaluate the real opportunities of application of energy sources in the Pole.

**Keywords:** PROMETHEE-ROC; Plaster; Calcination; Energy matrix; APL plasterer of Pernambuco.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Cadeia da Gipsita e do gesso	27
Figura 2 –	Fluxograma dos processos de produção dos gessos <i>alfa</i> ( $\alpha$ ) e <i>beta</i> ( $\beta$ ) por vapor d'água	30
Figura 3 –	Faixas de temperatura da queima da gipsita	32
Figura 4 –	Região pernambucana do Sertão do Araripe	35
Figura 5 –	Fluxos de sobreclassificação (a) de entrada e (b) de saída	47
Figura 6 –	Esquemática das etapas da metodologia de pesquisa	53
Figura 7 –	Ilustração do ambiente do software <i>Visual PROMETHEE Academic</i>	56
Figura 8 –	Tipos de classificação de OCs	67
Figura 9 –	Principais fontes de biomassa	72
Figura 10 –	Produção da Extração da Vegetal e da Silvicultura no Brasil em 2020	73
Figura 11 –	Sistemas de geração de energia solar térmica e fotovoltaica	79

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Oferta Interna de Energia no Brasil em 2020 (%)	60
Gráfico 2 –	Oferta Interna de Energia no Brasil de 2011-2020 (%)	61
Gráfico 3 –	Variação do consumo de energia por fonte de 2011-2020 (%)	63
Gráfico 4 –	Geração distribuída de energia solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Principais relações de preferência para o decisor	40
Quadro 2 –	Tipos de problemática de apoio à decisão	41
Quadro 3 –	Tipos de funções de preferência	45
Quadro 4 –	Classificação dos tipos de óleo diesel	65
Quadro 5 –	Sistemas de colheita florestal	76
Quadro 6 –	Relação de critérios observados por referência bibliográfica	84
Quadro 7 –	Matriz de consequências	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Especificações dos OCs	68
Tabela 2 –	Escala dos critérios de avaliação	93
Tabela 3 –	Resultado da aplicação no software <i>Visual PROMETHEE Academic</i>	95

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis
APF	Alto Ponto de Fluidez
API	American Petroleum Institute
APL	Arranjo Produtivo Local
ATE	Alto Teor de Enxofre
BAHIAGÁS	Companhia de Gás Da Bahia
BPF	Baixo Ponto de Fluidez
BRICS	Brazil, Russia, India, China and South Africa
BTL	Biomass-To-Liquids
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento De Pessoal De Nível Superior
CCP	Coque Calcinado de Petróleo
CENBIO	Centro Nacional de Referência Em Biomassa
CETESB	Companhia Ambiental do Estado De São Paulo
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CONFINS	Contribuição Para o Financiamento da Seguridade Social
COPERGÁS	Companhia Pernambucana de Gás
CP	Coque de Petróleo
CVP	Coque Verde de Petróleo
DEA	Data Envelopment Analysis
DMA	Diesel Marítimo A
DME	Diesel Marítimo B
DOF	Documento de Origem Florestal
ELECTRE	Elimination And Choice Translating Reality
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileira S.A.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FIEPE	Federação das Indústrias De Pernambuco
GGE	Gases do Efeito Estufa
GN	Gás Natural
GNC	Gás Natural Comprimido

IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMS	Imposto Sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	International Energy Agency
IFUSP	Instituto de Física da Universidade Federal do Estado de São Paulo
IPA	Instituto Agrônômico de Pernambuco
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas E Energia
MPE	Micro e Pequenas Empresas
NIS	Negative Ideal Solution
OC	Óleo Combustível
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIE	Oferta Interna de Energia
PETROBRÁS	Petróleo Brasileiro S. A.
PIS	Positive Ideal Solution
PIS	Programa de Integração Social
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
SEBRAE	Serviço de Ciência, Brasileiro de Apoio às Micro E Pequenas Empresas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SINDUSGESSO	Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco
ROC	Rank-Order Centroid
TOPSIS	Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution
VFT	Value Focus Thinking
UNID	Unidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

a. a.	Ao ano
Ca	Cálcio
CO	Monóxido de Carbono
GW	Gigawatts
H	Hora
Kg	Kilograma
Km	Quilômetro
Km <sup>2</sup>	Quilômetro Quadrado
Mg	Magnésio
Mm <sup>2</sup> /s	Milímetro Quadrado por Segundo
Mtep	Milhões de Toneladas Equivalentes a Petróleo
MW	Megawatts
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
P	Fósforo
PW	Petawatts
S	Enxofre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre
Tep	Toneladas Equivalentes a Petróleo



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	20
1.2	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS DO TRABALHO .....	21
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
2.1	PRODUÇÃO MINERAL BRASILEIRA E A GIPSITA .....	24
2.1.1	Caracterização da Gipsita e do Gesso .....	25
2.1.2	Usos e aplicações da Gipsita e do Gesso .....	27
2.1.3	Produção do Gesso .....	29
2.2	ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE BASE MINERAL .....	33
2.2.1	Polo Gesseiro do Araripe .....	34
2.2.2	Aspectos de melhoria no uso de matrizes energéticas das PME no APL de gesso de Pernambuco .....	36
2.3	APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO .....	36
2.3.1	Relações de Preferência .....	39
2.3.2	Tipos de problema em análise de decisão .....	41
2.3.3	Métodos de Apoio à Decisão Multicritério .....	42
2.3.3.1	Família de métodos PROMETHEE .....	44
2.3.3.2	Método PROMETHEE I .....	48
2.3.3.3	Método PROMETHEE II .....	49
2.3.4	<b>ROC (Rank-Order Centroid) .....</b>	<b>50</b>
2.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	50
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>53</b>
3.1	ETAPA 1 .....	54
3.2	ETAPA 2 .....	54
3.3	ETAPA 3 .....	55
<b>4</b>	<b>ALTERNATIVAS PARA MATRIZ ENERGÉTICA DOS SISTEMA DE PRODUÇÃO DE GESSO .....</b>	<b>58</b>
4.1	FONTES DE ENERGIA E A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	58
4.2	POTENCIAIS FONTES DE ENERGIA PARA O POLO GESSEIRO DO ARARIPE ....	64
4.2.1	Óleo Diesel .....	64
4.2.2	Coque de Petróleo .....	66
4.2.3	Óleo Combustível .....	66
4.2.4	Gás Natural .....	69
4.2.5	Biomassa: Lenha, cavaco de madeira e Capim-elefante .....	71
4.2.5.1	Lenha .....	74

4.2.5.2	Cavaco de madeira .....	75
4.2.5.3	Capim-elefante .....	77
<b>4.2.6</b>	<b>Energia Solar .....</b>	<b>78</b>
4.3	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	82
<b>5</b>	<b>POTENCIAIS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA A MATRIZ ENERGÉTICA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE GESSO .....</b>	<b>83</b>
5.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESCOLHA DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO .....	83
5.2	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	90
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA A MATRIZ ENERGÉTICA SOB A PERSPECTIVA DA INDÚSTRIA DE MANUFATURA DE GESSO .....</b>	<b>92</b>
6.1	APRESENTAÇÃO DO PERFIL DO RESPONDENTE E DA EMPRESA .....	92
6.2	APRESENTAÇÃO DA MATRIZ DE CONSEQUÊNCIAS .....	93
6.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO PROMETHEE-ROC ..	94
6.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	97
6.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	100
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>102</b>
7.1	CONCLUSÕES .....	102
7.2	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E ALTERNATIVAS DE FONTES ENERGÉTICAS PARA MATRIZ DO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL (APL) DE GESSO DE PERNAMBUCO .....</b>	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A riqueza mineral do solo brasileiro visível, desde os tempos do período colonial, tornou a indústria da mineração fundamental na composição da economia brasileira. A produção de substâncias como minérios de ferro, ouro, cobre, bauxita, granito, dentre outros *commodities*, no primeiro semestre de 2021, por exemplo, apresentou uma alta de 98% em relação ao mesmo período do ano anterior, perfazendo R\$ 149 bilhões, conforme registros do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) (2021). De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), entre minerais metálicos e não-metálicos ofertados aos mercados nacional e internacional, atualmente, cerca de 80 minerais são extraídos para atender às necessidades do país e do mundo (BRASIL MME, 2021a).

Nesse contexto, destacando a atividade extrativa do minério gipsita, o Brasil assume a liderança de maior produtor da América do Sul, presente no *ranking* dos 15 maiores produtores do mundo. A gipsita é um mineral não-metálico de baixa dureza largamente encontrado na natureza que pode ser utilizada na forma natural ou calcinada. Em especial, na forma calcinada, o produto é comercialmente conhecido como gesso; resultante do processo de calcinação, no qual o beneficiamento do minério pós-extração é submetido ao cozimento gradual em fornos apropriados, originando subprodutos aplicados na construção civil e em diversas atividades industriais (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008; BRASIL MME, 2020).

Na Bacia Sedimentar do Araripe – localizada nas divisas dos estados do Ceará, Piauí e Pernambuco –, o estado de Pernambuco possui jazidas concentradas na região do Sertão do Araripe encarregadas de 90% produção de gipsita do país. Para tanto, a presença de mineradoras, indústrias calcinadoras e fabricantes de pré-moldados compõem uma cadeia produtiva em forma de Arranjo Produtivo Local (APL), reconhecida como Polo Gesseiro do Araripe, cuja governança e gestão são exercidas pelo Sindicato da Indústria do Gesso de Pernambuco – SINDUSGESSO (IPA, 2014; BRASIL MME, 2021; ITEP, 2021).

No entanto, contrapondo as potencialidades da região, o processo de calcinação necessita de muita energia, na maioria da vezes proveniente de madeira de espécies nativas retiradas da vegetação da Caatinga (IPA, 2014). Recentemente estima-se que o consumo de energia no Polo Gesseiro do Araripe alcance 211 mil toneladas equivalentes de petróleo por ano, incluindo a energia elétrica, com a lenha representando 97% dos insumos energéticos usados (BRASIL MME, 2020). De modo que, as altas demandas energéticas por lenha nativa geram alterações ao meio ambiente propensas ao processo de desertificação de áreas locais desprotegidas.

Nesse sentido, existe uma discrepância na composição da matriz energética do APL de Gesso quanto uma diversificação desbalanceada de fontes alternativas como óleos de derivados

fósseis, energia solar, e o gás natural, que juntos ainda representam 30% do consumo das indústrias locais, frente ao consumo da lenha. Portanto, tal situação revelou-se uma problemática latente cujo planejamento de medidas sustentáveis mais efetivas se tornaram uma das principais preocupações do Polo.

Nos últimos anos, estudos como de Cavalcanti et al. (2011), Oliveira e Shinohara (2014), focados no gás natural, Silva (2009), Gadelha (2010), Andrade e al. (2013) e Tanabe (2017), direcionados para fontes de biomassa, e Santos e Mendes (2018) evidenciando a energia solar, surgiram com a finalidade de alçar uma matriz energética mais limpa dentro cadeia produtiva do gesso analisando a forma como produzem, consomem e proporcionam rendimento energético durante o processo de calcinação da gipsita.

Apesar disso, para além do aspecto produtivo, o planejamento bem estruturado de transição das fontes energéticas vigentes para renováveis na composição da matriz energética do APL gesseiro pernambucano deve pautar-se, antes de tudo, em um estudo consistente na identificação das fontes alternativas de energia viáveis, considerando características tecnológicas dos fornos de calcinação, indicadores de desempenho, limitações logísticas e de oferta em tempo hábil, por vezes conflitantes entre si, como possíveis critérios de avaliação determinantes.

Por essa perspectiva, na área da Pesquisa Operacional, Roy (1996), Guglielmetti, Marins e Solomon (2003), Gomes (2012), Almeida (2013), Ayala e Frank (2013), Silva, Schramm e Carvalho (2014) e Clemente et al. (2015) destacam a existência de metodologias de análise multicritério de apoio à decisão MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*) como ferramentas práticas capazes de estruturar e analisar problemas complexos compostos de vários objetivos comumente conflitantes, e sujeito às preferência(s) do(s) tomador(es) de decisão para estudo das alternativas consideradas no processo decisório. Todavia, sem a contextualização profunda da problemática do contexto da decisão pode acarretar na escolha errada do método multicritério e, por conseguinte, resultados inválidos.

Portanto, diante do exposto, a proposta desta pesquisa se configura na estruturação e validação de um modelo de decisão cujo enfoque multicritério contribua para o apontamento das alternativas viáveis e promissoras mais indicadas às empresas do APL gesseiro pernambucano frente aos seus desempenhos nos múltiplos critérios de decisão de cunho econômico, produtivo, político, social e sustentável para atendimento às demandas de energia da cadeia produtiva de gesso da região.

Para tanto, buscou-se incorporar no modelo o método PROMETHEE-ROC (CLEMENTE, ALMEIDA, FILHO, 2015), composto por uma metodologia variante da família de métodos PROMETHEE (ALMEIDA, 2013), com vistas na avaliação por parte da figura de

um decisor de racionalidade não-compensatória com relação às fontes energéticas por comparação par a par, de tal modo que, ao fim forme-se um ranqueamento decrescente das alternativas consideradas no estudo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O Brasil se destaca por possuir uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis, chegando a 48,4% em 2020 (CNI, 2021), associadas com o recuo de 5,6% de petróleo e derivados, desde 2015, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021). Por outro lado, tal proporção não se aplica de maneira uniforme em todo território nacional. Em específico, no caso da presença majoritária de fontes não renováveis empregadas no Polo Gesseiro pernambucano do Araripe para o atendimento perene do ritmo de produção a baixo custo se confronta com o desafio de diversificação da sua matriz energética, uma vez que, a escolha por uma, ou mais energias renováveis, fomentem a promoção da sustentabilidade sem altos custos repassados ao longo da cadeia exige uma análise robusta.

O problema de priorização de fontes energéticas renováveis para composição da matriz energética do Polo Gesseiro pernambucano se caracteriza por um processo decisório multicritério, tendo em vista que, de acordo com Silva (2017), embasa-se em uma decisão permeada por critérios conflitantes sob análise das diversas formas de energia existentes no mercado nacional. Seguramente, torna-se possível a aplicação de metodologias MCDA, que propiciam análises de problemáticas de natureza complexa abordando aspectos qualitativos e/ou quantitativos; na tentativa de equacionar, da melhor forma possível, o atendimento dos múltiplos objetivos.

Desta forma, a viabilidade deste estudo se sustenta na medida em que se pretende proporcionar suscitar o desenvolvimento sustentável às possibilidades de substituição e, ou expansão, do consumo de fontes renováveis nos processos produtivos do Polo. Bem como, em termos de originalidade, este trabalho se justifica pela pluralidade de pesquisas científicas mais direcionadas as características mineralógicas e físicas da gipsita (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2008), métodos de mineração (FERREIRA, 2017), inserção de aditivos no gesso (MELO, 2013) e logística reversa (KOCHEM, 2017) cujos os estudos de viabilidade calcados em cenários de adesão de insumos energéticos verdes como o Gás Natural (OLIVEIRA; SHINOHARA, 2014), fontes de biomassa (GADELHA et al. 2012) e solar (SANTOS; MENDES, 2018), por exemplo, se desenvolveram isoladamente entre si e as fontes vigentes.

Por isso, buscando considerar relações de comparação dentro um conjunto de fontes energéticas potenciais e viáveis que estejam sujeitas a efetiva robustez dos conflitos de interesses de importâncias econômica, social e ambiental, as perspectivas de impacto deste trabalho para o APL gesso de Pernambuco centram-se em propor a modelagem e validação de um modelo de decisão multicritério de racionalidade não compensatória, ou seja, que não se permita que a desvantagem de uma das alternativas em alguns critérios seja compensada pela vantagem em outros, conforme Almeida (2013), propício aos tomadores decisão nas empresas da região, através do comparativo das alternativas entre si, de acordo com as preferências de um decisor pela problemática de ordenação.

Para isso, Silva, Schramm e Carvalho (2014) denotam que problemáticas dessa ordem podem ser trabalhadas por métodos da família PROMETHEE devido a facilidade dos decisores entenderem os conceitos e parâmetros inerentes, fato que se faz imprescindível na fluidez do processo de modelagem e aplicação de métodos multicritério. Nesse sentido, o método PROMETHEE-ROC apresenta uma grande vantagem através da técnica ROC que confere menor esforço cognitivo do decisor no momento determinação do parâmetro peso.

Além disso, para a construção e, conseqüentemente, validade deste tipo de modelo, parte-se do pressuposto que o decisor – natural do Polo – apresente racionalidade não compensatória, onde poderá expressar suas preferências na comparação de diferentes fontes de energia, inclusive alternativas renováveis viáveis e promissoras sem compensações. Para este estudo, o papel do decisor será melhor representado por um especialista da área, que não tomará a decisão, efetivamente, mas auxiliará na análise das alternativas sob sua perspectiva de gestão. Por fim, as intenções de tal modelo visam se revelar um possível instrumento de análise para construção de estratégias empresariais, ambientais e políticas para cenários futuros, onde a predominância de fontes alternativas combata, e reverta, dentro do possível, a degradação da cobertura vegetal e fauna nativas da caatinga sem plano de manejo florestal, assim como, venha corroborar positivamente numa maior eficiência produtiva gerando menores custos de produção.

## 1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS DO TRABALHO

O objetivo geral da presente pesquisa é propor um modelo de decisão para priorização das fontes energéticas renováveis promissoras e factíveis a longo prazo no atendimento ao processo de fabricação do gesso por meio da aplicação do método PROMETHEE-ROC no APL gesso de Pernambuco. Para tanto, espera-se realizar sua validação sob a ótica de um especialista natural de empresa da cadeia produtiva do gesso pertencente à região.

Com vistas ao cumprimento do objetivo geral tem-se os objetivos específicos listados a seguir:

- Apresentar os principais conceitos relacionados a cadeia produtiva, matrizes energéticas e critérios de desempenho condizentes ao APL de Gesso em Pernambucano;
- Realizar uma análise qualitativa para definir o conjunto de alternativas energéticas propícias ao APL gesseiro Pernambucano;
- Determinar os critérios de avaliação e as escalas de medida pertinentes à avaliação das fontes alternativas consideradas;
- Construir um modelo de decisão composto método multicritério PROMETHEE-ROC voltado à realidade do APL gesseiro Pernambucano;
- Validar o modelo pela aplicação mediada com especialista proveniente de empresa da região para construção do *ranking* das fontes energéticas de acordo com os desempenhos nos critérios considerados;
- Discutir os resultados obtidos considerando o aporte teórico em consonância ao contexto do universo da pesquisa, a amostra escolhida e as limitações encontradas.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Considerados os objetivos do trabalho, é oportuno apresentar estrutura. Logo, o presente estudo encontra-se organizado em sete capítulos:

- No Capítulo 1, é descrita a contextualização do estudo, dispendo a relevância, determinada pelos objetivos geral e específicos;
- No Capítulo 2 tem-se uma revisão da literatura dos temas pertinentes a produção mineral brasileira, beneficiamento para produção do gesso e do Polo Gesseiro do Araripe, os desafios referentes a sua matriz Energética no que se refere aos impactos econômico e social, assim como, aos principais Métodos e de Apoio à Decisão Multicritério, ressaltando a família de métodos *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) e técnica *Rank-Order Centroid* (ROC) como abordagens integrantes ao estudo;

- No Capítulo 3 tem-se a Metodologia compreendida por três etapas devidamente caracterizadas pelos procedimentos viáveis e indispensáveis aplicados sistematicamente para o atendimento dos objetivos propostos;
- O Capítulo 4 coloca em discussão o levantamento de fontes energéticas existentes e potenciais de inserção na matriz energética do Polo Gesseiro do Araripe de acordo com a viabilidade de corresponder as demandas energéticas do beneficiamento da gipsita;
- No Capítulo 5, realiza-se uma revisão da literatura frisando potenciais critérios de avaliação das alternativas de fontes energéticas elencadas no capítulo anterior;
- No Capítulo 6, apresenta a avaliação dos resultados obtidos mediante aplicação dos dados e informações no método PROMETHEE-ROC, contextualizados ao perfil da empresa e da figura do especialista;
- O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões, limitações, apontamentos e sugestões para potenciais trabalhos futuros.

E, por fim, são listadas as referências bibliográficas utilizadas, seguidas dos apêndices, contendo todos os documentos produzidos e utilizados para atender os procedimentos metodológicos do estudo.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo fomentam-se conceitos presentes na literatura acerca das características e desafios geográficos, tecnológicos e sociais inerentes ao beneficiamento da gipsita em gesso no Polo Gesseiro do Araripe; incluindo as definições do termo APL e da avaliação multicritério sob a perspectiva do método PROMETHEE-ROC.

### 2.1 PRODUÇÃO MINERAL BRASILEIRA E A GIPSITA

A mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar, beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los recursos econômicos e sociais (CNI, 2017). No Brasil, de acordo com Vale (2017), as atividades de pesquisa, mineração e extração de minérios no território brasileiro ocorre em função da riqueza existente e potencial observada desde a formação do país, destacando a mineração como um dos setores básicos constituintes da economia nacional.

A robustez da cadeia produtiva da mineração industrial se entrelaça com a história do Brasil – evidenciam Fernandes e Araujo (2016) – de modo que, analisando por um retrospecto histórico, o interesse na mineração pelo Estado brasileiro centrado no retorno econômico, moldaram a construção sociopolítica do país desde o Brasil Colônia, onde juntamente com o agronegócio, a mineração solidamente compunha destaque na balança comercial.

Nesse sentido, como exemplo recente dessa potência, dados consolidados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) (2021) apontam que na contramão dos efeitos negativos da pandemia da Covid-19 sob economia brasileira, o setor da mineração aumentou a produção em 15% no primeiro trimestre de 2021, em comparação ao trimestre do ano passado. Além disso, mais de 90 novos projetos ao portfólio das mineradoras, projetando um investimento aproximado de US\$ 38,0 bilhões durante o período de 2021 a 2025.

Mediante tal cenário, Santos (2019) enfatiza a gipsita como um dos minerais de expressiva relevância dentre as reservas minerais do Brasil, sendo o maior produtor da América do Sul e 14º no mundo (SANTOS, 2019). Uma vez que, por Santana (2008), as ocorrências dos principais depósitos nacionais de gipsita correlacionam-se às bacias sedimentares distribuídas pelo país como as Bacias Amazônica, do Recôncavo Baiano, ao Araripe, da Parnaíba e Potiguar. Em específico, a Bacia Sedimentar do Araripe está instalada nas divisas dos estados do Ceará, Piauí e Pernambuco, abrangendo uma extensão de 5.250 km<sup>2</sup> (SANTOS, 2019).

A gipsita é um mineral de dureza muito baixa, podendo ser riscado facilmente (IBRAM, 2021), normalmente podendo apresentar diferentes denominações. De maneira que, Sobrinho

et al. (2001) e Oliveira et al. (2012) esclarecem o uso de termos tratados na qualidade de sinônimos para caracterizá-lo em seu estado *in natura* como “gipsita”, “gipso” e “gesso”. Dado que, a denominação gipsita é reconhecidamente como a mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso é o termo mais apropriado para designar o produto calcinado (SOBRINHO et al., 2001).

A gipsita tem a propriedade de perder e recuperar a água de cristalização (SANTANA, 2008), ou seja, facilidade de perda/ganho de moléculas de água ( $H_2O$ ) na sua composição molecular ao ser submetida aos processos de aquecimento, ou, hidratação, respectivamente. Após a extração, Souza (2006) e Barbosa, Ferraz e Santos (2014) destacam que a manipulação do minério é feita por processos produtivos específicos de beneficiamento direcionados a utilização de fornos apropriados que realizam uma desidratação gradual controlada resultante na produção de gesso e subprodutos.

### 2.1.1 Caracterização da Gipsita e do Gesso

A gipsita *in natura* é um mineral constituído basicamente por sulfato de cálcio hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) (RIBEIRO, 2011), geralmente encontrado com granulação fina a média (SOBRINHO et al., 2001), compacto, normalmente associado a impurezas como óxidos metálicos (SILVA, 2013), tal que, conforme Ferrolí e Librelotto (2014), as diversas condições geológicas de cada local transformam os sedimentos originários da gipsita em diferentes tipos.

Os depósitos de gipsita são formados a partir de sedimentos de salmoura provenientes de antigos oceanos, de 100 a 200 milhões de anos atrás (FERROLI; LIBRELOTTO, 2014), provocados por uma intensa evaporação de águas salinas sob condição de clima seco, formando-se cristais, segundo Oliveira et al. (2012), e solos sob evaporação ou desidratação da anidrita (MUSEU HEINZ EBERT, 2021). Alternativamente, a gipsita também pode ser encontrada em regiões vulcânicas, especialmente, onde o calcário que sofre ação dos vapores de enxofre (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2008).

De acordo com SOBRINHO et al., (2001), OLIVEIRA et al. (2012) e IBRAM (2021), suas características visuais apresentam geralmente um aspecto translúcido, compreendendo também a existência de variedades transparentes e opacas, com tons variando do branco ao cinza, amarelo, vermelho, castanho, podendo até ser incolor; dependendo das impurezas contidas nos cristais. No caso da Bacia sedimentar do Araripe, avaliando-se o grau de pureza da gipsita, Brasil MME (2009) destaca uma expressiva concentração de sulfatos em torno de 90% a 95% e impurezas raramente ultrapassando 0,5%.

O gesso é obtido a partir da moagem e posterior calcinação do minério gipsita (AVELAR, 2012), cujo processo de calcinação é centrado na transformação termoquímica do minério gipsita por meio da desidratação, sujeitando-o a perda de 3/4 de água de cristalização até a obtenção do sulfato semi-hidratado de cálcio ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ), onde, para fins comerciais o uso do termo gesso se popularizou; explicam Baltar, Bastos e Luz (2008), Avelar (2012) e Mascaranhas (2017).

A partir da gipsita são produzidos o gesso *alfa* ( $\alpha$ ) e o gesso *beta* ( $\beta$ ), com processos de fabricação bem diferentes (OLIVEIRA et al., 2012), variando de acordo com os tipos de forno e com as características de pressão e temperatura aplicados – de acordo com Soares (2005). A seguir, seguem os três de gesso possíveis de serem obtidos com o beneficiamento da gipsita:

- Tipo A – para fabricação do gesso *alfa* ( $\alpha$ ) (OLIVEIRA et al., 2012);
- Tipo B – para fabricação do gesso *beta* ( $\beta$ ) (OLIVEIRA et al., 2012);
- Tipo C – para refugo, ou para uso como corretivo de solo, na forma de gipsita (OLIVEIRA et al., 2012).

Baltar, Bastos e Borges (2004), Baltar, Bastos e Luz (2008), Ribeiro (2011), Urbano (2013), Ferreira (2017) e Mascaranhas (2017) frisam que, nas jazidas do Araripe, em Pernambuco, são encontradas variedades mineralógicas de gipsita denominadas por: cocadinha, rapadura, *johnson*, estrelinha, selenita e alabastro, além da anidrita (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2008), todas brevemente descritas abaixo:

- **Pedra Johnson:** é a mais pura, de coloração variando de branco a creme estruturada (FERREIRA, 2017) com nódulos e estrelas;
- **Selenita:** cristais com clivagens largas, incolores e transparentes (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2008) em formas de placas – por Baltar, Bastos e Borges (2004);
- **Pedra branca ou Estrelinha:** variedade com a coloração branca; que apresenta cristais radiados em forma de estrela (FERREIRA, 2017);
- **Rapadura:** variedade estratificada que apresenta filmes milimétricos de argila verde (RIBEIRO, 2011; FERREIRA, 2017; MASCARANHAS, 2017);
- **Cocadinha:** um tipo de gipsita estratificada com raros filmes de argila verde (MASCARANHAS, 2017);
- **Alabastro:** maciça, microgranular e transparente, usada em esculturas (BALTAR, BASTOS; LUZ, 2008). Tipo que se caracteriza por apresentar problemas na calcinação devido ao seu caráter fibroso (RIBEIRO, 2011);

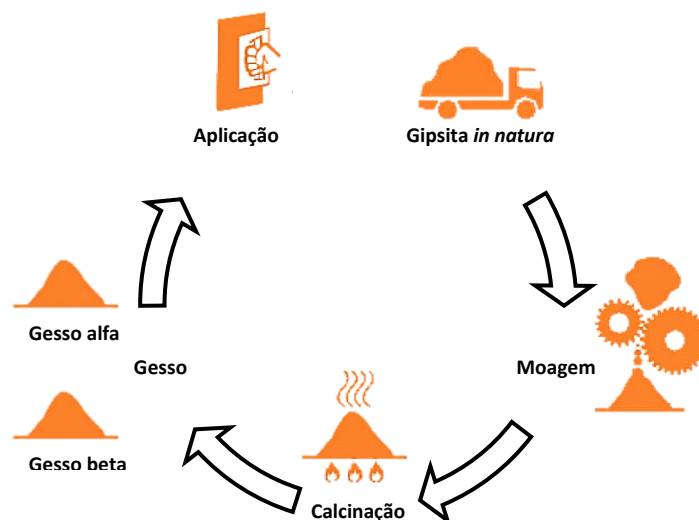
- **Anidrita ou Pedra ruim:** variedade com coloração incolor, branco, azul, violeta, cinza-escuro composta de nódulos duros (OLIVEIRA et al., 2012).

Oliveira et al. (2012) salientam que ainda existem um material caracterizado como de baixa qualidade formado pelo alto teor da mistura de alabastro e argila, conhecido na região como boró, presente no capeamento nas jazidas e minas; classificado como Tipo C, é comumente aproveitado como matéria-prima para corretivo de solos. E, a pirita, formação responsável pela presença de manchas ao longo do corpo das rochas. De modo que, juntamente com a anidrita, representam impurezas que precisam ser controladas desde exploração nas jazidas com vistas a classificação do tipo de gesso para usos e aplicações mais apropriados.

### 2.1.2 Usos e aplicações da Gipsita e do Gesso

Inicialmente pressupõe-se que o minério gipsita manufacturado tenha a exclusiva finalidade de obtenção do gesso, no entanto, após sua extração na jazida, o mineral percorre diferentes processos produtivos voltados para diversos tipos de aplicação. Em seu trabalho, Gomes (2012) pontua a versatilidade de aplicações da gipsita numa série de atividades industriais tendo em vista o melhor aproveitamento de suas características; podendo ser utilizada na forma natural ou calcinada (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2008). De maneira que, embasado nas colocações da SINDUSGESSO (2021), o sequenciamento dos macroprocessos da Cadeia Produtiva do Gesso consegue esboçar um ciclo de vida abrangente, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Cadeia da Gipsita e do gesso



Fonte: O autor (2021)

A obtenção de cada uma dessas variedades de produto requer condições específicas com relação ao tipo de gipsita, tipo de forno, condições de calcinação e tratamento posterior (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008). No gesso *alfa* ( $\alpha$ ), devido ao seu processo de produção, apresenta aplicações mais nobres, por exemplo, o gesso hospitalar, por isso, atinge preços mais elevados. Por sua vez, o gesso *beta* ( $\beta$ ), com custo de produção mais baixo, predomina no gesso de construção (BARBOSA, FERRAZ, SANTOS, 2014). Portanto, juntamente ao uso da gipsita *in natura*, as diversas finalidades comerciais são:

- **Indústria de cimento** – Na fabricação de cimento Portland, a gipsita é adicionada ao clínquer – principal componente do cimento, na proporção de 3% a 5%, com a finalidade de controlar o tempo de pega do cimento (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008);
- **Agricultura** – A gipsita moída pode ser utilizada como agente corretivo de solos ácidos, fertilizante de culturas específicas de legumes e algodão, e como condicionador dos solos, ao prolongar a retenção de água – por Baltar, Bastos, Luz (2008) e Kochem (2017);
- **Indústria cerâmica** – O gesso cerâmico é usado especialmente na produção de moldes e matrizes para o enchimento com barbotinas na produção de porcelana, cerâmica sanitária, grés, etc. (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008);
- **Indústria Química** – Pode ser utilizada como matéria-prima para a produção de enxofre, ácido sulfúrico, cimento, em ração animal e sulfato de amônio (RIBEIRO, 2011);
- **Área médico-odontológica** – Os gessos ortopédicos e odontológicos são largamente utilizados na confecção de próteses móveis (odontologia), ataduras pré-gessadas (ortopedia) e ataduras corretivas (clínicas de estética) (RIBEIRO, 2011) (MELO, 2012);
- **Indústrias de plásticos e papel** – O gesso pode ser utilizado como carga de papel (MELO, 2012);
- **Decoração** – Utilizado para a confecção de elementos decorativos como estatuetas e imagens (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008).

Complementarmente, ainda que seja uma ação vanguardista pouco usual, a reciclagem dos resíduos de gesso é alcançada quando se retroalimenta a cadeia de gesso, em especial, quando a geração de resíduos ocorre em local próximo as unidades fabris (KOCHEM, 2017). Sendo que, de acordo com Assis (2020), para o setor da construção civil, os gessos descartados, e não contaminados, igualmente conseguem ser submetidos a diversos ciclos de reciclagem

quantas vezes forem necessários sem que suas propriedades físicas e mecânicas sejam prejudicadas.

### 2.1.3 Produção do Gesso

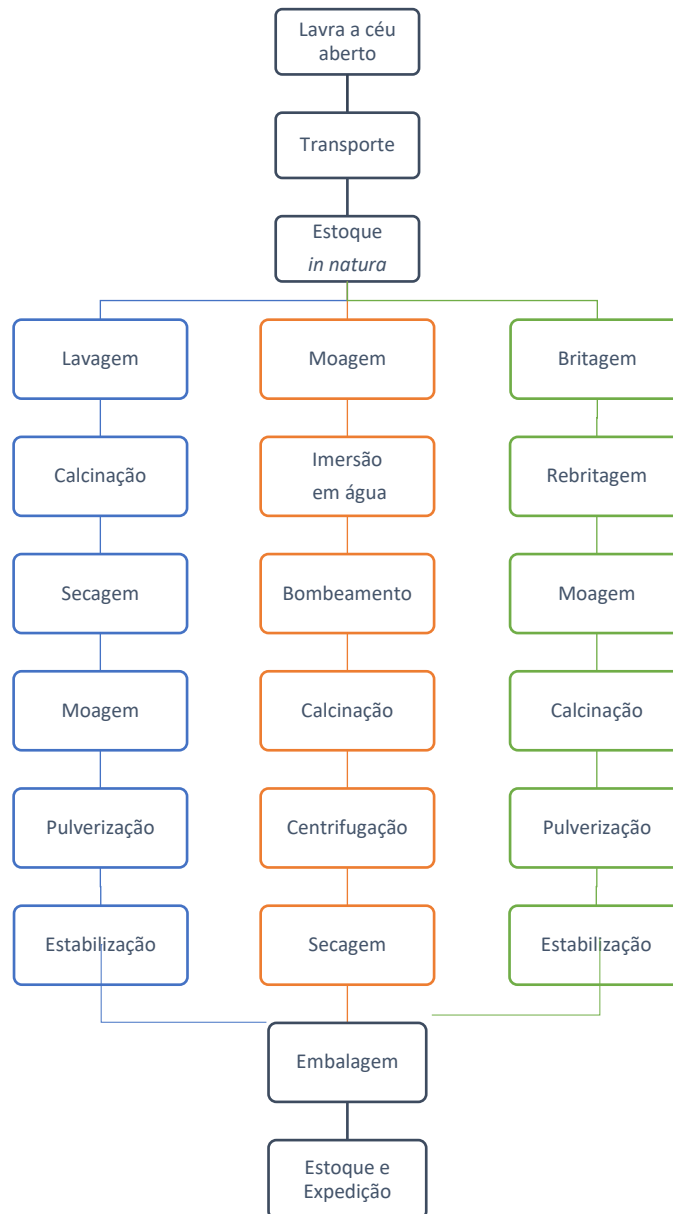
Sob a ótica de macroprocessos, Baltar, Bastos e Luz (2008), Filho (2010), Silva (2013), Urbano (2013), Bruno e Agostinho (2017), Ferreira (2017), Kochem (2017) e Mascaranhas (2017) caracterizam a manufatura do minério gipsita pelo agrupamento de diferentes operações sequencialmente dispostas e dependentes dos tipos de gesso a serem produzidos, como também do grau tecnológico empregado nas plantas industriais.

A princípio, baseando-se no escopo do beneficiamento da gipsita, a matéria-prima deve percorrer por atividades essenciais de transformações físico-químicas que promovam a diminuição granulométrica do mineral na forma de pedras, com média em torno de 40kg cada e, em seguida, submetê-la ao processo de desidratação gradual. Nesse sentido, a gestão direcionada em torno de fatores essenciais do processo produtivo como volume e frequência de produção, tempo de cozimento, controle de temperatura e a disponibilidade das fontes de matriz energética influem na qualidade dos subprodutos do gesso.

Isso porque, para a obtenção dos gessos *alfa* ( $\alpha$ ) e *beta* ( $\beta$ ), as plantas industriais proporcionam encadeamentos distintos de atividades de transformação atrelados ao aprimoramento de determinadas propriedades físico-químicas com vistas ao retorno de subprodutos próprios para as diversas finalidades em que se aplicam, principalmente, nas características de controle do tempo de pega, dureza, porosidade e maleabilidade, por exemplo.

Em função disso, o processo de calcinação decorre de diferentes técnicas de desidratação da gipsita. Ela pode ser realizada a seco sob pressão atmosférica, ou baixa pressão, no qual obtém-se o gesso *beta* ( $\beta$ ), ou, em autoclaves, sob pressão de vapor de água saturante, ou, imerso em meio líquido, ambos para obtenção do gesso *alfa* ( $\alpha$ ) (RIBEIRO, 2011), através da variação de temperatura (FERREIRA, 2017).

**Figura 2** – Fluxograma dos processos de produção dos gessos alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ) por vapor d'água



Fonte: O autor (2021)

A partir da Figura 2, observa-se o fluxograma dos processos produtivos do gesso *alfa* ( $\alpha$ ), por vapor d'água e imersão em meio líquido, e *beta* ( $\beta$ ), respectivamente. Destaca-se na cor azul, a produção do gesso alfa ( $\alpha$ ) por vapor d'água; na cor laranja, a produção do gesso alfa ( $\alpha$ ) por imersão; e na cor verde, a produção do gesso beta ( $\beta$ ).

Explicitando as etapas dos processos de produção do gesso na indústria de mineração, a princípio, o estabelecimento de uma mina de exploração advém de análises preliminares, visto que a construção de uma jazida se inicia com a *pesquisa mineral*, fase que visa à determinação das reservas disponíveis para se verificar a viabilidade técnica e econômica da exploração e requerer a concessão de lavra (FERREIRA, 2017).

Com isso, havendo a viabilidade de exploração, a preparação da mina vale-se do desmatamento, escavações, abertura de vias de acesso, remoção da vegetação e do capeamento de solo e obras como cortes e aterros; construindo, portanto, uma estrutura para desmonte, transporte e beneficiamento (FERREIRA, 2017). No passo seguinte, tem-se a extração da gipsita que pode ocorrer por meio da lavra subterrânea ou céu aberto (*open pit*) (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008; LIMA, FILHO, MISAS, 2019).

No Brasil, o **método de lavra é a céu aberto** (FERREIRA, 2017). Nele, o *layout* da jazida apresenta-se por meio de bancadas simples cuja via de acesso a cava é geralmente feita através de uma rampa única (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008) mediante frentes de lavra na forma de anfiteatros com bancadas variando em torno de 15 metros de espessura (URBANO, 2013).

O objetivo do método de lavra consiste basicamente na remoção do capeamento, da camada estéril de material argiloso com cobertura vegetal acima da bancada de gipsita (RIBEIRO, 2011) através da aplicação de escavadeiras hidráulicas sobre esteiras (SILVA, 2013) e, logo após, furos são realizados ao longo do corpo do minério para inserção de carga explosiva; comumente à base de nitrato de amônia e óleo combustível (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008).

Em seguida, a pós-detonação, avalia-se o grau de fragmentação, onde os blocos maiores são reduzidos, ou, dependendo do formato, com uma nova detonação (RIBEIRO, 2011), ou seja, um desmonte secundário (SILVA, 2013). Logo após, pelo auxílio de rompedores hidráulicos, tratores de esteira, *vagon drills* e pás mecânicas (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008), os operadores carregam os caminhões caçamba, transportando o minério para as unidades de beneficiamento de calcinação, ou, como matéria-prima levada até as fábricas de cimento, ou, para uso imediato como corretivo do solo no setor agrícola, (RIBEIRO, 2011; SILVA, 2013).

Especificamente para as unidades calcinadoras, as etapas de beneficiamento se caracterizam como processos mecânicos e físico-químicos engajados na redução da granulometria e desidratação da gipsita (FERREIRA, 2017). Para tanto, a gipsita é pesada para garantir a certificação da quantidade, além de identificação do tipo fornecido, depois, a dispõe, formando-se um estoque *in natura* a céu aberto (MASCARANHAS, 2016).

A gipsita segue para o processo de **britagem**, onde seus pedaços com tamanhos que variam de 50 a 400 mm são fragmentados a aproximadamente de 30 a 50 mm, normalmente, com a utilização de britadores de mandíbulas e moinhos de martelo (RIBEIRO, 2011) (MASCARANHAS, 2016). De forma que, o processo de **rebritagem** somente acontece como reprocesso; buscando a diminuição da gipsita para tamanhos que variem de 0mm a 5mm, ao garantir maior eficiência dos processos produtivos posteriores (MASCARANHAS, 2016).

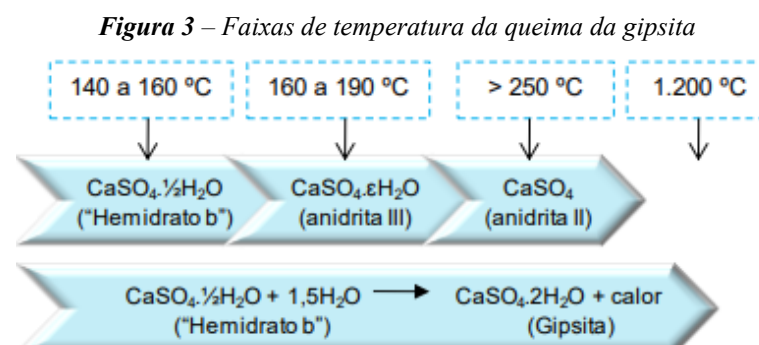


Na etapa de **moagem**, o material é moído para que se adeque a granulometria padrão as especificações da Associação Brasileira Normas Técnicas (ABNT), cuja forma de peneiramento depende da existência de plantas de calcinação com fornos de diferentes tipos, a gipsita moída pode ser peneirada em peneiras vibratórias e separadas em frações para uso na alimentação de cada tipo de forno (RIBEIRO, 2011; MASCARANHAS, 2016). Na **calcinação** ocorre a decomposição térmica da gipsita, cujo objetivo é a eliminação de parte da água de cristalização combinada a sua estrutura, para a formação do gesso, com a produção de vapor d'água (SANTOS, MENDES, 2018).

Filho (2010) descreve que no Polo Gesseiro do Araripe encontram-se vários tipos de plantas industriais definidas pelo tipo de forno de calcinação. Tal equipamento é considerado a cerne do processo de calcinação, sendo que, predomina o uso de fornos intermitentes sobre os fornos do tipo panela, marmitta horizontal (rotativa) ou vertical (estática) e o rotativo de queima indireta (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008) que variam nas dimensões e de capacidade de produção, a depender de cada fabricante (RIBEIRO, 2011). Não obstante, Ferreira (2017) e Santos e Mendes (2018) destacam a presença massiva do forno intermitente chamado de marmitta rotativo de queima indireta (barriga quente).

As plantas industriais designadas a produção do gesso *alfa* ( $\alpha$ ) se configuram por dois processos: sob pressão de vapor e aquecimento em meio líquido. No primeiro, após o processo de britagem da gipsita, alimenta-se o minério por *vagon drills* na autoclave aquecida a vapor, onde ocorre a calcinação e, em seguida, secagem do gesso, levando-o até o processo de moagem e, posteriormente, a embalagem e estocagem – segundo Filho (2010) e Urbano (2013).

Na produção em meio líquido, moe-se a gipsita, a imerge em água para a maceração, bombeia-se para um reator fechado, no qual se aquece o minério com camisa de vapor. Nele, o gesso suspenso, após a centrifugação, é secado e moído; somente depois, o deposita em um silo de estocagem para, em outro momento, levar o gesso ao processo de embalagem (FILHO, 2010; URBANO, 2013). A Figura 3 apresenta as faixas de temperatura para a queima da gipsita.



Fonte: Kochem (2017, p.28).

A gipsita é calcinada numa faixa de temperatura de 140°C a 160°C para que sua estrutura molecular perca 75% da água de cristalização (FERREIRA, 2017), de forma que sua desidratação total ocorre em temperatura acima de 180°C, resultando nas diferentes formas de anidrita (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008). A anidrita III, também conhecida como anidrita ativa ou solúvel – fase intermediária ao hemidrato e à anidrita II (KOCHEM, 2017) – é instável e ávida por água, denominada de gesso rápido, onde o tempo de pega é mais curto (MASCARANHAS, 2016) que pode absorver umidade atmosférica e passar a forma de hemidrato (gesso) (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008).

Entre 300°C e 600°C, se obtém a gipsita completamente desidratada, ou seja, anidrita II desidratada, com tempo de pega longo, denominado de gesso lento (MASCARANHAS, 2016; FERREIRA, 2017). Na faixa de 600°C e 900°C, se resulta na anidrita insolúvel, completamente inerte que não apresenta tempo de pega, sendo utilizada como carga para polímeros e tintas, pois a anidrita supercalcinada não se reidrata (RIBEIRO, 2011).

O gesso moído é encaminhado para um silo de armazenamento, no qual sua extremidade posterior possui uma máquina ensacadeira. Por ela, o gesso é finalmente embalado em sacos multifoliados de papel composto de 2 a 3 folhas, comportando de 20kg a 40kg cada (RIBEIRO, 2011; MASCARANHAS, 2016). No entanto, Ribeiro (2011) e Ferreira (2017) apontam que em algumas empresas, o gesso mantém-se acondicionado por um período de ensilamento, também chamado de estabilização, na condição de, por um lado, esfriá-lo antes do processo de embalagem e, paralelamente, preservar suas propriedades físico-químicas; vislumbrando assim, uma maior homogeneização na sua composição final.

E, se houver necessidade, o produto é moído e misturado a aditivos antes do ensacamento (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008). Do contrário, normalmente, o gesso quando sai do forno é conduzido através do elevador de canecas até um silo, onde o material é moído novamente e ensacado ainda quente (RIBEIRO, 2011), ou, alternativamente, o gesso pode ser comercializado em *Big Bags*, com capacidade de 1000kg, ou ainda podem ser embalados em sacos de rafia com 30kg, sendo destinados às pequenas empresas produtoras de artefatos nas localidades próximas às fábricas para a fabricação de placas e blocos de gesso (RIBEIRO, 2011; MASCARANHAS, 2016).

## 2.2 ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE BASE MINERAL

De acordo com o Brasil MME (2011), o termo Arranjo Produtivo Local (APL) corresponde ao aglomerado de empresas e organizações concentradas em uma mesma região

geográfica cujo intuito é criar, ou, fortalecer vínculos em prol de objetivos comuns. Segundo Aquino e Bresquiani (2005), no seu contexto mais amplo, o termo APL pode ser compreendido como sinônimo do termo *cluster*, uma vez que, este se configura um desdobramento do *cluster* original ao abrigar a participação de micro e pequenas junto a demais atores como, por exemplo, produtores de bens e insumos, fornecedores de insumos e equipamentos, prestadores de serviços, bem como entidades governamentais e organizações sociais voltados ao financiamento e capacitação (BRASIL MME, 2011, 2021b).

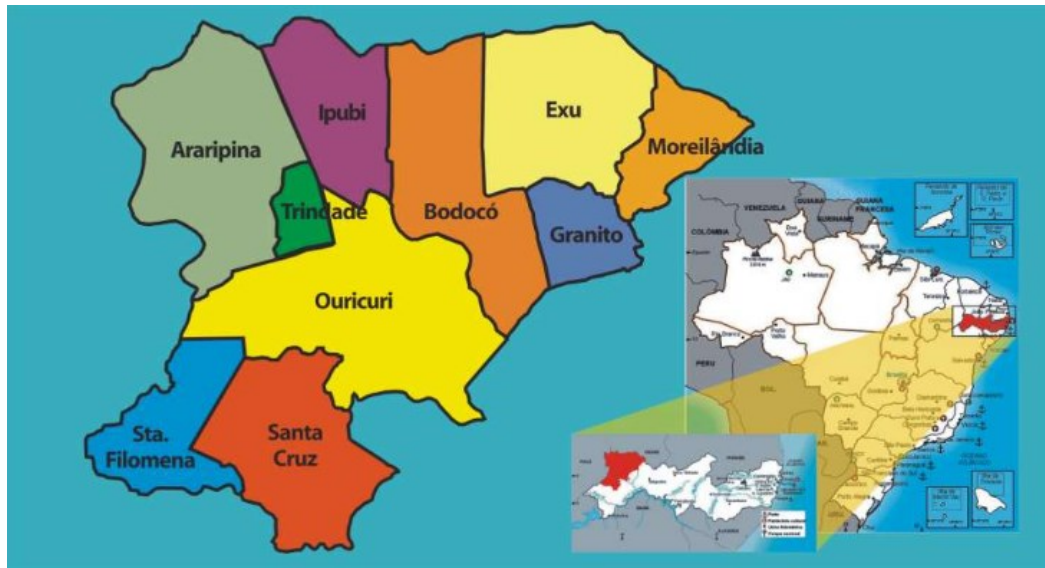
Dentre os tipos de APLs existentes no Brasil, os chamados Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral, por sua vez, podem ser entendidos como conjuntos de empreendimentos e de indivíduos, localizados em um mesmo território e atuantes uma cadeia produtiva que tenha como base a atividade extrativa e de transformação mineral (BRASIL MME, 2021b), onde as Micro e Pequenas Empresas (MPE) expressivamente representam mais de 70% das empresas de mineração do País (BRASIL MME, 2011).

O desenvolvimento dos APLs depende das relações de confiança entre os seus atores e da efetiva cooperação entre eles (AQUINO, BRESCIANI, 2005), ao longo de sua cadeia produtiva, não há uma uniformidade dos processos de transformação mineral no que compete, em destaque as MPEs, concentrando intensa mão-de-obra atrelada, em geral, com qualificação precária, além dos desafios de garantir a disponibilidade de recursos contínua de *inputs* e *outputs*, fortalecimentos da sinergia com órgãos adjacentes de apoio e o estabelecimento sistemático de indicadores de acompanhamento do setor (BRASIL MME, 2011).

### **2.2.1 Polo Gesseiro do Araripe**

Na divisa entre os estados de Piauí, Ceará e Pernambuco, a Bacia sedimentar do Araripe comporta a terceira maior reserva nacional de gipsita. Em específico, destaca-se a concentração de jazidas de exploração e empresas voltadas ao atendimento da cadeia produtiva da gipsita no Sertão Pernambucano, situadas nos municípios de Araripina, Ipubí Ouricuri, Bodocó e Trindade, onde é produzido 95% do gesso consumido em todo o Brasil (ITEP, 2021). A Figura 4 apresenta o mapa da localização do sertão do Araripe.

*Figura 4 – Região pernambucana do Sertão do Araripe*



*Fonte: IPA (2014)*

O Polo Gesso Pernambucano é composto por um expressivo conjunto de micro e pequenas empresas, se comparadas ao quantitativo dos empreendimentos de médio e grande porte, formando três grandes grupos, distribuídos em cerca de 42 minas de gipsita, 174 indústrias de calcinação e 750 indústrias de pré-moldados, faturando anualmente R\$ 1,4 bilhão; além de gerarem cerca de 13,9 mil empregos diretos e 69 mil indiretos (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008; ITEP, 2021; SANTOS, 2019; SINDUSGESSO-PE, 2021)

Ainda, o fortalecimento das relações econômicas é favorecido pelo alto grau de pureza do minério em âmbito nacional que varia entre 88% e 98%, e o posicionamento geográfico dado como epicentro de escoamento de seus produtos por encontrar-se equidistante 800km de sete capitais nordestinas: Recife, Salvador, Aracaju, Maceió, Fortaleza, João Pessoa e Natal (ITEP, 2021).

Não obstante, em parceria com o Governo do Estado Pernambucano, o Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP), Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco (SINDUSGESSO-PE), Serviço Nacional De Aprendizagem Industrial (SENAI), Serviço De Ciência, Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), Federação das Indústrias de Pernambuco (FIEPE) e Prefeituras Municipais, por exemplo, somam-se enquanto atores locais com a missão de fortalecer a gestão do setor produtivo; formando assim, de fato, o APL do Gesso pernambucano.

### **2.2.2 Aspectos de melhoria no uso de matriz energética das PME no APL de Gesso de Pernambuco**

Em contraponto as potencialidades nos contextos econômico e produtivo ímpares para o APL gesseiro, Urbano (2013) aponta que cerca de 70% das empresas de calcinação da gipsita trabalham com capacidade ociosa, como também deficiências gerenciais envolvendo a sustentabilidade e, paralelamente, a ineficiência da matriz energética local cujo contexto atual afeta diretamente a degradação do ambiente.

O Polo encontra-se afetado por dificuldades significativas relacionadas aos processos produtivos do gesso que impossibilitam seu aperfeiçoamento: a disposição inadequada de rejeitos, desmatamento, poluição sonora e visual, atraso tecnológico e, por último, a utilização de lenha como a principal fonte energética que alimenta os fornos de calcinação (LIMA, FILHO, MISAS, 2019; SANTOS; EL-DIER, 2019); onde, a eletricidade, derivados do petróleo e a biomassa (principalmente a lenha) formam a matriz energética do Polo Gesseiro do Araripe (URBANO, 2013).

Visto que, para o beneficiamento da gipsita utiliza-se essencialmente a biomassa florestal, para as empresas produtoras de gesso, as possibilidades de intervenção recaem na melhoria da utilização dos fornos de barriga quente – comum na região desde meados dos anos 90 – através da adoção de tecnologias ou melhorias que possam recuperar o calor de combustão, realizar monitoramento automatizado, promover o isolamento térmico e o uso da lenha picada (MASCARANHAS, 2016), como forma de desacelerar a relação dos altos índices de desmatamento e procura desenfreada pelo abastecimentos dos estoques de madeireiros de lenha nos estados do Piauí, Bahia, Ceará e Paraíba (SANTOS; EL-DIER, 2019).

A escolha das abordagens metodológicas envolvendo a melhoria da matriz energética no sistema de produção de gesso no APL pernambucano pode ser um processo complexo por envolver diversos critérios de avaliação e requerer suporte analítico para a indicação das alternativas mais adequadas ao contexto regional. Dessa forma, torna-se oportuna a apresentação de metodologias analíticas de apoio à decisão, como os métodos baseados em análises multicritério.

## **2.3 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO**

Tomando por base as contribuições de Machline (1977), Roy (1996), Zarghami e Szidarovszky (2011) e Gomes (2012), a tomada de decisão pode ser evidenciada nas mais diversas atividades do cotidiano, desde nas mais simples ações diárias, até aquelas conferidas

de maior grau de complexidade sob a perspectiva da ação de tomar uma decisão sempre pressupor a existência de alternativas para a solução de um problema analisado; independentemente das configurações em que se apresenta.

Machline (1977) pontua o aspecto *valor* como um elemento de observância primário ao abordar o processo de tomada da decisão; pois todo indivíduo, ou grupo, detém pontos de vista diferentes e, conseqüentemente, tenderão escolher caminhos de decisão também diferentes para o mesmo problema. Assim, geralmente, os problemas de decisão são aqueles que precisam ser resolvidos considerando-se diferentes perspectivas a serem atendidas (SANTOS, 2019), ou seja, a decisão consistirá, na maioria das vezes, no produto da interação entre um determinado conjunto de preferências de um ou mais agentes interessados, segundo Roy (1996); por essas características, a esses problemas, dá-se o nome de problema de decisão multicritério (SANTOS, 2019).

Para Gomes (2012), os métodos multicritério presentes na literatura visam a conduzir o decisor, ou grupo de decisores, para uma solução, tendo em vista a avaliação e escolha de recomendações, cursos de ações e alternativas factíveis para que de fato direcionem a tomada de decisão. De modo que, a diversidade de produções científicas existente apresenta diferentes abordagens multicritério fundadas em teorias, algoritmos e metodologias próprias apoiadas nas particularidades dos contextos de decisão e das referências culturais das correntes de pesquisa de quem as propôs.

Uma das principais vertentes de enfoque multicritério é a Escola Europeia, também conhecida como Escola Francesa, composta por metodologias Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA). A aplicação das metodologias MCDA consideram no contexto do processo decisório critérios de natureza objetiva e subjetiva para o julgamento das alternativas de solução do problema. Nesse sentido, para a estruturação de qualquer problema MCDA é necessário ter três componentes essenciais (ZARGHAMI; SZIDAROVSKY, 2011):

- **Tomador(es) de decisão:** Aquele (ou aqueles) a quem o processo decisório destina-se, e que tem (têm) o poder e a responsabilidade de ratificar uma decisão e assumir suas conseqüências (GOMES, 2012);
- **Alternativas:** Zarghami e Szidarovszky (2011) caracterizam as alternativas como possibilidades de escolha que podem ser identificadas, ou desenvolvidas, sob análise do contexto decisório a fim de delimitar um conjunto de todas as possíveis ações a serem tomadas, chamado de espaço de decisão;
- **Critérios:** Na visão de Roy (1996), os critérios compreendem atributos que servem de base para julgamentos de preferências, por parte do decisor,

relacionados à decisão, dentro de um conjunto de alternativas, se uma determinada alternativa é melhor em face as demais.

Além disso, as colocações de Roy (1996), Zarghami e Szidarovszky (2011), Gomes (2012) e Almeida (2013) ressaltam outros componentes imprescindíveis nos problemas MCDA que interseccionam os supracitados, são eles: **objetivo(s); estados da natureza e; consequências das decisões**. Visto que, a abordagem multicritério se sustenta no julgamento de valor parte do fator humano, as alternativas são avaliadas por suas consequências, que, por sua vez, estão associadas aos objetivos.

Tendo em vista que tais objetivos são a base de interesse para qualquer decisão (ALMEIDA, 2013), para cada objetivo existem consequências possíveis, ou seja, potenciais resultados do processo decisório a serem escolhidos pelo(s) decisor(es). No entanto, as consequências resultam da variabilidade dos estados da natureza. Isso porque, os estados da natureza representam as probabilidades de ocorrências futuras que influenciam um determinado conjunto de alternativas, onde cada acontecimento (estado da natureza) conhecido, muitas vezes fora do controle do decisor, poderá culminar em mais de uma consequência

De maneira que, por esse aspecto, os modelos MDCA frisam as alternativas com as consequências mais desejáveis. Para tanto, precisa-se mensurar quão vantajosa uma alternativa representa dentro de um conjunto de alternativas viáveis. Segundo Almeida (2013), a vantagem de uma alternativa poderá ser medida, analisando sua performance perante os critérios estabelecidos. Essa avaliação pode ser representada aderindo-se escalas de medida que têm o propósito de quantificar os critérios sob análise das alternativas para que estas, por sua vez, consigam ser dispostas, ou classificadas, de maneira quantitativa, ou qualitativa.

Tomando por base os autores anteriormente supracitados, podem-se observar dois tipos de escalas, a princípio (ALMEIDA, 2013). A **escala numérica**, com unidades de grandeza bem definidas, como custo, tempo etc., ou **escala verbal**, no caso de critérios qualitativos, por julgamentos de valor associados a uma escala ordinal ou cardinal previamente escolhida (GOMES, 2012). De modo que, dentro desses dois grupos, vale ressaltar quatro escalas, são elas:

- **Nominal:** Tipo de escala verbal caracterizada pelo agrupamento dos elementos em conjuntos previamente nominados. Nessa escala, no procedimento de escalonamento assume-se um conjunto de elementos, no qual se busca identificar subconjuntos mutuamente excludentes; sem a realização de operações aritméticas;

- **Ordinal:** Tipo de escala numérica, cujos elementos avaliados assumem posições ordenadas, quer seja no formato de números ordinais (1º, ..., nº), *ranking*, ou termos indicativos de ordem (Muito ruim, Ruim, Normal, Bom, Muito Bom);
- **Intervalar:** Tipo de escala numérica que representa as informações em forma de quantidade, ou seja, há a presença de cardinalidade delimitada por intervalo. Para isso, promove-se uma transformação linear positiva regida pela equação  $y = ax + b$ , com  $a > 0$ ;
- **Razão:** Tipo de escala numérica em que essa escala tem unidade e origem, representado pelo zero (0), indicando também um ponto de ausência, ou mínimo valor, onde pode-se fazer uma transformação do tipo  $y = ax$ , com  $a > 0$  (ALMEIDA, 2013).

Por último, Roy (1996) pontua que ainda dentro de um conjunto de critérios, o decisor poderá considerar alguns critérios mais importantes que outros e, em função disso, se utilizará de um **sistema de pesos** cujos valores simbolizam a importância relativa dos critérios no cumprimento dos objetivos do processo decisório.

### 2.3.1 Relações de Preferência

De acordo com Gomes (2012), torna-se necessário estabelecer certas condições que estudem as relações de preferências, ou seja, as predileções subjetivas do decisor entre duas ações potenciais. Nesse sentido, através da modelagem de preferências pode-se representar a estrutura de preferências do decisor em relação às consequências, na análise de um problema de decisão (ALMEIDA, 2013). Geralmente, essas relações são definidas por relações binárias (GOMES, 2012), visando comparar os elementos de um conjunto de consequências  $A = \{a, b, c, \dots, n\}$  (ALMEIDA, 2013; ALMEIDA et al., 2015).

Uma relação binária  $R$  sobre um conjunto  $A$  é um subconjunto do produto cartesiano  $A \times A$  (ALMEIDA, 2013). De maneira que,  $a$  e  $b$  sejam elementos contidos em  $A$ , então uma relação binária é um conjunto de pares ordenados  $(a, b)$ , podendo ser representada por  $aRb$ . Do contrário, se a relação  $R$  entre eles não se mantenha, isso pode ser representada como não( $aRb$ ). Devido a importâncias das relações binárias para modelagem das preferências de um agente de decisão, são apresentadas a seguir as propriedades clássicas de uma relação binária  $R$ , para  $\forall a, b, c \in A$  (GOMES, 2012; ALMEIDA, 2013):



- Reflexivo, se  $aRa$ ;
- Irreflexiva, se  $\text{não}(aRb)$ ;
- Simetria, se  $aRb \rightarrow bRa$ ;
- Assimetria, se  $aRb \rightarrow \text{não}(bRa)$ ;
- Transitividade, se  $aRb$  e  $bRc \rightarrow aRc$ ;
- Completa, quando  $aRb$  ou  $bRa$ .

Na modelagem de preferência, uma relação R é também denominada de relação de preferência. De maneira que, mediante a interpretação e particularidades da figura de um decisor, suas principais relações de preferência podem assumir as seguintes características – quadro 1:

*Quadro 1 – Principais relações de preferência para o decisor*

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Relações binárias</b>
Indiferença (I)	Corresponde a existência clara de razões, na visão do decisor, que justifiquem relação de equivalência entre duas alternativas, ações, ou elementos	Reflexiva [ $aIa$ ] Simétrica [ $aIb \rightarrow bIa$ ]
Preferência estrita (P)	Há existência clara de razões, na visão do decisor, que justifiquem preferência significativa em favor de uma das duas alternativas, ações, ou elementos	Assimétrica [ $aPb \rightarrow \text{não}(bPa)$ ]
Preferência fraca (Q)	Corresponde a existência de razões claras, na visão do decisor, que invalidam a relação de preferência estrita por uma das alternativas. Além disso, essas razões não expressam nem uma preferência estrita, tampouco uma indiferença entre as alternativas, ações, ou elementos	Assimétrica [ $aQb \rightarrow \text{não}(bQa)$ ]
Incomparabilidade (R)	Ausência de razões contundentes, na visão do decisor, que justifiquem qualquer uma das relações anteriores	Simétrica [ $aRb \rightarrow bRa$ ] Irreflexiva [ $\text{não}(aRa)$ ]
Não Preferência ( $\sim$ )	Corresponde à ausência de situações claras, na visão do decisor, justificáveis da preferência estrita, ou fraca, em favor de uma das alternativas	-
Preferência (J)	Corresponde à existência de razões claras, na visão do decisor, que justifiquem explicitamente uma preferência fraca, sem se preocupar o quão fraca, em favor de uma alternativa, mesmo que não exista uma diferença significativa entre as situações de preferência e indiferença	-
Sobreclassificação (S)	Corresponde à existência de razões claras, na visão do decisor, que justifiquem as situações de preferência (P), ou a preferência (J), em favor de uma alternativa, mesmo que não exista nenhuma divisão significativa entre as situações de preferência estrita, preferência fraca e indiferença	-

Fonte: Roy (1996), Gomes (2012), Almeida (2013)

Nesse contexto, considerando um conjunto  $A$  de alternativas, no qual um sistema de Relações de Preferências ou uma Estrutura de Preferências compreende relações binárias de preferência pautadas pela figura de um ator de decisão. As relações binárias são utilizadas para modelar um conjunto de preferências que tal ator tem sobre os elementos contidos em  $A$  se (ROY, 1996; ALMEIDA, 2013):

- As relações dispostas no quadro anterior podem representar as preferências do ator da decisão com respeito às alternativas em  $A$  de acordo com as definições e propriedades (ROY, 1996);
- Para cada par de elementos de  $A$ , pelo menos uma das relações dessa coleção se mantém (exaustiva);
- Para cada par de elementos de  $A$ , no máximo uma das relações se mantém, ou seja, nenhuma outra pode ser aplicada (exclusividade).

### 2.3.2 Tipos de problema em análise de decisão

Tendo em vista um conjunto de alternativas discreto  $A = \{a_1; a_2; \dots; a_n\}$ , no qual cada elemento em questão representa um curso de ação potencial para implementação do decisor buscando a resolução de uma problemática específica, no decorrer do processo de análise da decisão, o resultado pretendido em determinado problema pode ser identificado entre quatro tipos de problemáticas de referência, descritas a seguir (GOMES, 2012).

*Quadro 2 – Tipos de problemáticas de apoio à decisão*

<b>Tipos</b>	<b>Objetivo</b>
Problemática de Seleção (P. $\alpha$ )	Selecionar a melhor opção ou conjunto de alternativas
Problemática de Classificação (P. $\beta$ )	Pretende-se realizar uma triagem de alocação ou procedimento de classificação das alternativas em categorias, ou classes, pré-determinadas
Problemática de Ordenação (P. $\gamma$ )	Promover uma ordenação parcial, ou completa, das alternativas mais satisfatórias
Problemática de Descrição (P. $\delta$ )	Esclarecer a decisão por uma descrição, em linguagem apropriada, das ações e de suas consequências.

*Fonte: Roy (1996), Gomes (2012), Almeida (2013)*

Além disso, pode ser considerada a Problemática de Portfólio, que tem por objetivo escolher, do conjunto de alternativas, certo subconjunto que atenda aos objetivos, sob determinadas restrições (ALMEIDA, 2013). De maneira que, nas considerações de Roy (1996), Gomes (2012) e Almeida (2013), tais problemáticas consistem nas diversas forma de classificação do tipo de problema de decisão, ou seja, a natureza da problemática de decisão, pautada na forma como o decisor pretende realizar essa comparação das alternativas em  $A$ .

### 2.3.3 Métodos de Apoio à Decisão Multicritério

Na literatura encontram-se diversos métodos de apoio à decisão multicritério desenvolvidos para o tratamento de problemas com múltiplos objetivos. Cabendo mencionar métodos popularmente mais utilizados, com ênfase na família de métodos PROMETHEE, são eles:

- **MAUT (*Multiattribute Utility Theory*):** É um método de caráter compensatório, proposto inicialmente por Keeny e Raiffa, em 1976, pautado na representação das preferências do(s) decisor(es) através de uma função utilidade  $u$  cujo objetivo basicamente se resume em escolher as alternativas capazes de maximizarem tal função; considerando os fatores de risco e incerteza presentes no contexto da decisão (MIN, 1994; GOMES, 2012; ALMEIDA, 2013; DYER, 2016). Dessa forma, o MAUT permite tratar um problema complexo em uma simples hierarquia e avaliar subjetivamente um grande número de fatores quantitativos e qualitativos na presença de risco e incerteza (MIN, 1994; AYALA; FRANK, 2013).
- **AHP (*Analytic Hierarchy Process*):** Em linhas gerais, Ramanathan (2004), Almeida (2013), Junior et al. (2015) definem o AHP como um método multicritério compensatório de agregação aditivo focado na modelagem de preferências do decisor em uma função de valor, adotado em diversas aplicações e, em específico, se faz amplamente recorrente nos ambientes de grupos de decisão. Na década de 70, Thomas Saaty, apresentou uma abordagem estruturada capaz de classificar um conjunto de alternativas, ou escolher as melhores dentro desse conjunto. Sua estrutura metodológica decompõe o problema de decisão em problemas menores, tantas vezes quantas forem necessárias, em vários níveis, interligando, principalmente, as alternativas junto aos critérios, de modo que, se possa encontrar a melhor alternativa viável. Para isso, são estabelecidos pesos em graus de importância associados aos critérios, por comparação par a par entre as alternativas.

- **MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*):** Desenvolvido na década de 90 por Carlos Bana e Jean Claude Vasnick, fundamenta-se na mensuração do grau de preferência do tomador de decisão sobre um conjunto de alternativas, baseando-se na ponderação dos critérios e a avaliação das opções de julgamentos qualitativos sobre diferenças de atratividade, envolvendo dois elementos por vez para comparação e julgamento do decisor numa escala de seis níveis de performance. Assim, dadas duas opções, havendo uma diferença de performance, impacto, ou performance, tal déficit de atratividade deverá ser apontado como de intensidade: muita fraca, fraca, moderada, forte, muito forte, ou extrema (ALMEIDA, 2013; BANA; MEZA; OLIVEIRA, 2013; AYALA; FRANK, 2013). A seguir, os autores pontuam que o método culmina na construção de uma escala numérica representativa, gerada por programação linear, assim como, similarmente, uma escala de pesos de julgamento, ambas necessárias na representação das avaliações anteriormente qualitativas para quantitativas em escala intervalar consistente.
- **TOPSIS (*Technique for Order Performance bt Similarity to Ideal Solution*):** Lima Junior e Carpinetti (2015) o descrevem como um método utilizado para ranquear alternativas por ordem de preferência, proposto na década de 80. Para isso, calcula-se o valor de uma alternativa em função de sua distância para dois pontos: o ponto ideal, denominado PIS (Positive Ideal Solution); ou, de um ponto anti-ideal, o NIS (Negative Ideal Solution) (ALMEIDA, 2013; SANTOS, 2019). Sendo que, entende-se por ponto ideal aquela alternativa que, considerando os critérios adotados, esteja tão próxima quanto possível do PIS e o mais distante quanto possível do NIS. Assim, com suas distâncias relativas, comumente Eucleidianas, constitui-se um ordenamento decrescente das alternativas iniciado por aquela de valor mais alto, ou seja, essa alternativa se encontra mais próxima do ideal positivo comparada sua distância do ideal negativo (ALMEIDA, 2013; AYALA; FRANK, 2013; JUNIOR; CARPINETTI, 2015).
- **Família de Métodos ELECTRE (*Elimination Et Choice Translation Reality*):** Roy (1996), Siqueira e Filho (2011), Almeida (2013) e Ayala e Frank (2013) destacam que a abordagem metodológica da família ELECTRE explora o conceito de sobreclassificação, baseando-se em relações de superação dentro de um conjunto alternativas proveniente de comparações par a par entre as alternativas, seguida da exploração da relação de sobreclassificação mediante aplicação de um procedimento ou algoritmo. Nesse sentido, a família de métodos ELECTRE compreende diferentes versões propostas por diferentes estudiosos, partindo-se dos mesmos conceitos

fundamentais, mas distinguindo-se pela incorporação de diversas ferramentas que visam suprir a natureza específica de cada tipo de problemática de decisão.

### 2.3.3.1 Família de métodos PROMETHEE

Conforme as colocações de Silva, Schramm e Carvalho (2014), Brans e Smet (2016) e Papathanasiou (2018), os métodos PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) pertencem à família de métodos MCDA desenvolvidos por J. P. Brans, em parceria com demais estudiosos, embasados em relações de sobreclassificação e classificados como métodos não compensatórios. Em termos gerais, os métodos baseados em relações de sobreclassificação são classificados como métodos não compensatórios (SILVA, SCHRAMM, CARVALHO, 2014).

De maneira que, assumindo dois conjuntos de elementos, um composto de alternativas,  $A = \{a, b, b_1, \dots, b_n\}$ , e o outro de  $k$  critérios, o decisor deve estabelecer para cada critério um peso  $p_i$  que reflete a importância do critério. A partir desses pesos é obtido  $\pi(a,b)$ , o grau de sobreclassificação de  $a$  sobre  $b$ , para cada par de alternativas  $(a,b)$ , que é obtido conforme a Equação (1) (ALMEIDA, 2013).

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^k p_i P_i(a, b) \quad (1)$$

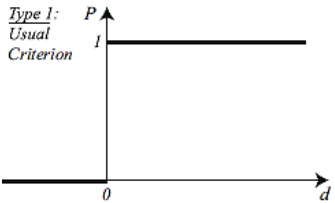
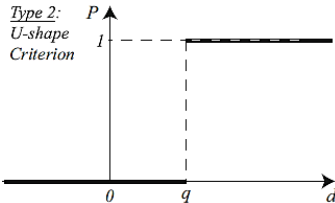
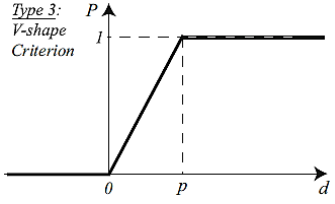
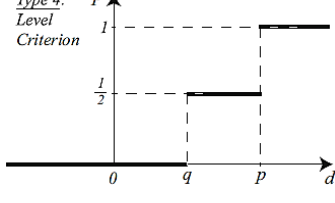
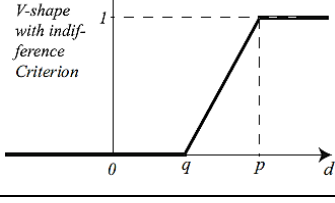
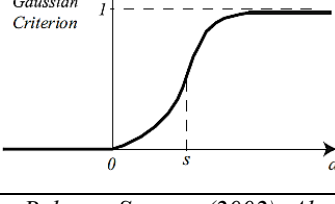
onde:  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$

O termo  $P_i(a, b)$  representa uma função de diferença dos níveis de desempenho de duas alternativas,  $a$  e  $b$ , em determinado critério  $i$ , isto é,  $[z_i(a) - z_i(b)]$ . Essa função assume valores entre 0 e 1, onde basicamente para diferenças positivas,  $z_i(a) > z_i(b)$ , o valor da função dá  $P_i(a, b) = 1$ , por outro lado, com  $z_i(a) < z_i(b)$ ,  $P_i(a, b) = 0$ . A fim de melhor modelar essa diferença, para alguns casos específicos, adotam-se limites de preferência  $p$  e  $q$  (ALMEIDA, 2013; BRANS; SMET, 2016; PAPANATHANASIOU; PLOSKAS, 2018).

Nesses casos, o tomador de decisão tem de especificar os valores de  $p$  e  $q$ . O termo  $q$  corresponde ao limite de indiferença cujo valor da função diferença abaixo dele expressa não preferência por nenhuma das duas alternativas, o que significa que o grau de preferência, enquanto que o termo  $p$ , correspondente ao limite de preferência, no qual o valor da função diferença estando acima deste, tem-se preferência absoluta por uma das duas alternativas; e, no caso de uma função gaussiana, o ponto de inflexão  $s$ , é o valor intermediário entre  $p$  e  $q$  (BELTON; STEWART, 2002; ALMEIDA, 2013; BRANS; SMET, 2016; PAPANATHANASIOU; PLOSKAS, 2018).

Na família de métodos do PROMETHEE há seis formas básicas, ou formas padrão, para a função  $P_i(a, b)$ . O decisor pode representar suas preferências usando a forma mais adequada para cada critério – conforme mostrado no quadro 3; considerando  $P_i(a, b) = d$  (BELTON; STEWART, 2002; ALMEIDA, 2013).

Quadro 3 – Tipos de funções de preferência

Critério generalizado	Definição	Parâmetros fixados
<p>Type 1: Usual Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$	Não há parâmetro a ser definido
<p>Type 2: U-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$	$q$
<p>Type 3: V-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 \leq d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	$p$
<p>Type 4: Level Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{1}{2}, & 0 \leq d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	$p, q$
<p>Type 5: V-shape with indif- ference Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d-p}{p-q}, & 0 \leq d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	$p, q$
<p>Type 6: Gaussian Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}}, & d > 0 \end{cases}$	$s$ , onde a preferência aumenta segundo uma distribuição normal

Fonte: Belton e Stewart (2002), Almeida (2013), Brans e Smet (2016) e Papathanasiou e Ploskas (2018)

Mediante análise das funções descritas, Brans e Smet (2016) colocam que a seleção dos limites de preferência torna-se uma tarefa prática, dado que permite uma maior flexibilidade na modelagem dos problemas nos quais os métodos PROMETHEE se aplicam, e caso o tomador de decisão opte pelo critério usual, os parâmetros não se fazem necessários. De acordo com Almeida (2013), a escolha de outra função  $P_i(a, b)$  deve ocorrer apenas no caso em que o decisor tenha dúvida no estabelecimento de situação de indiferença ou preferência em uma determinada faixa de valores de um dado critério (ALMEIDA, 2013).

Além disso, mais dois indicadores são utilizados que exploram as comparações por pares de alternativas em cada critério são então computados nas formas de fluxos de sobreclassificação, conforme definido nas Equações 2 e 3.

- Fluxo de Sobreclassificação de saída  $\Phi^+(a)$  da alternativa  $a$  (fluxo positivo):

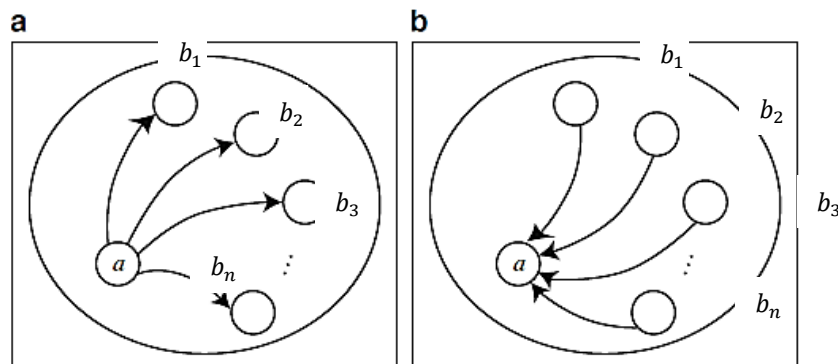
$$\Phi^+(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (2)$$

- Fluxo de Sobreclassificação de entrada  $\Phi^-(a)$  da alternativa  $a$  (fluxo negativo):

$$\Phi^-(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (3)$$

A terminologia adotada para os fluxos de sobreclassificação de entrada e saída está relacionada à representação gráfica da estrutura de preferência, onde se tem a mediada do fluxo de sobreclassificação que entra e sai de cada alternativa (ALMEIDA, 2013). Analisando os somatórios, o fluxo positivo expressa até que ponto uma determinada alternativa  $a$  supera em desempenho todas as demais alternativas consideradas quando analisadas à luz de um critério  $i$ . Enquanto que, o fluxo negativo expressa até que ponto a alternativa  $a$  é superada por todas as outras alternativas no mesmo critério, conforme Figura 5.

**Figura 5** – Fluxos de sobreclassificação (a) de entrada e (b) de saída



Fonte: Adaptado de Brans e Smet (2016)

Considerando a alternativa  $a$  comparada em pares com as demais alternativas  $(n - 1)$  do conjunto  $A$ , a obtenção dos fluxos  $\Phi^+(a)$  e  $\Phi^-(a)$  podem ser dadas pelas Equações 4 e 5.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (4)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a) \quad (5)$$

Nesse caso, o indicador fica normalizado, e independente do número de alternativas no conjunto  $A$ , mantendo esse índice na escala  $(0,1)$  (ALMEIDA, 2013). Por outro lado, Belton e Stewart (2002) frisam que os valores dos fluxos de sobreclassificação dependem do quantitativo de alternativas que compõem o conjunto  $A$  cuja relação de um par de alternativas,  $a$  e  $b$ , está sujeita a inclusão ou exclusão de uma ou mais alternativas do conjunto  $A$ .

A família de métodos PROMETHEE se divide em (CAVALVANTE; ALMEIDA, 2005):

- **PROMETHEE I** – Segundo Brans e Smet (2016), o método caracteriza-se por uma problemática de escolha, onde se estabelece uma pré-ordem parcial das alternativas;
- **PROMETHEE II** – Estabelece-se uma pré-ordem completa entre as alternativas que não permite incomparabilidades (BRANS, SMET; 2016; SANTOS, 2019);
- **PROMETHEE III** – Ampliação da noção de indiferença, tratamento probabilístico dos fluxos de preferência intervalar;
- **PROMETHEE IV** – Pré-ordem completa ou parcial. Problemática de escolha e ordenamento. Destinado as situações em que o conjunto de soluções viáveis é contínuo;
- **PROMETHEE V** – Segundo Cavalcante e Almeida (2005), Almeida (2013) e Santos (2019), após estabelecer uma ordem completa entre as alternativas com base no PROMETHEE II, são introduzidas restrições identificadas no problema para seleção de um conjunto de alternativas com otimização inteira;
- **PROMETHEE VI** – Há a construção de uma pré-ordem completa ou parcial para problemáticas de escolha e ordenamento destinadas às situações em que o decisor não consegue estabelecer um valor fixo para cada critério;
- **PROMETHEE-GAIA** – Cavalcante e Almeida (2005), Brans e Smet (2016) e Santos (2019) o descrevem como uma extensão dos resultados da metodologia PROMETHEE, através de suporte de análise gráfica e interativa.



### 2.3.3.2 Método PROMETHEE I

O procedimento de cálculo dos indicadores descritos acima através da obtenção dos fluxos positivo  $\Phi^+$  e negativo  $\Phi^-$  de sobreclassificação pode ser denominado como o método PROMETHEE I. Neste método, o tomador de decisão se defronta com a construção de duas pré-ordens parciais, onde ambos os fluxos comumente não induzem as mesmas classificações, por isso, o método PROMETHEE I advém da intersecção deles, produzindo uma pré-ordem parcial, a partir de três relações: preferência (P), indiferença (I) e incomparabilidade (R). Essas relações são descritas detalhadamente como se segue (ALMEIDA, 2013):

- $a$  é preferível a  $b$  ( $aPb$ ) se:
  - $\Phi^+(a) > \Phi^+(b)$  e  $\Phi^-(a) < \Phi^-(b)$ , ou;
  - $\Phi^+(a) = \Phi^+(b)$  e  $\Phi^-(a) < \Phi^-(b)$ , ou;
  - $\Phi^+(a) > \Phi^+(b)$  e  $\Phi^-(a) = \Phi^-(b)$ .
  
- $a$  é indiferente a  $b$  ( $aIb$ ) se:
  - $\Phi^+(a) = \Phi^+(b)$  e  $\Phi^-(a) = \Phi^-(b)$
  
- $a$  é incomparável a  $b$  ( $aRb$ ) se:
  - $\Phi^+(a) > \Phi^+(b)$  e  $\Phi^-(a) > \Phi^-(b)$ , ou;
  - $\Phi^+(a) < \Phi^+(b)$  e  $\Phi^-(a) < \Phi^-(b)$ .

Sobre as relações explanadas anteriormente, Brans e Smet (2016) e Papathanasiou e Ploskas (2018) denotam sucintamente o comportamento destas relações. Na relação de preferência, quando uma alternativa  $a$  é preferível em relação a alternativa  $b$ , há um desempenho mais significativo de  $a$  associado a uma menor fraqueza de  $a$  em relação a  $b$ . Para quando os fluxos positivo e negativo são iguais, as alternativas  $a$  e  $b$  são consideradas indiferentes; por fim, os fluxos de sobreclassificação podem produzir valores conflitantes, no momento em que o melhor desempenho de uma das alternativas estiver associado a uma menor fraqueza da outra, sendo assim, consideradas duas alternativas incomparáveis entre si.

### 2.3.3.3 Método PROMETHEE II

O tomador de decisão muitas vezes requer visualizar um *ranking* completo das alternativas, para tanto, o método PROMETHEE II resulta no fluxo líquido  $\Phi(a)$ , considerando a Equação 6 (BRANS; SMET, 2016).

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (6)$$

De modo que, as alternativas são organizadas em ordem decrescente, estabelecendo uma pré-ordem completa, onde quando maior for o fluxo líquido, melhor a alternativa, a partir das seguintes relações (ALMEIDA, 2013; BRANS; SMET, 2016; PAPATHANASIOU; PLOSKAS, 2018).

- $a$  é preferível a  $b$  ( $aPb$ ) se:  $\Phi(a) > \Phi(b)$
- $a$  é indiferente a  $b$  ( $aIb$ ) se:  $\Phi(a) = \Phi(b)$

No caso do PROMETHEE II, como o fluxo líquido da alternativa resulta da unificação dos fluxos de sobreclassificação precedentes, não existem situações de incomparabilidade. No entanto, os autores supracitados alertam que embora o PROMETHEE II seja amplamente recorrente nas aplicações em diversas áreas, recomenda-se analisar as alternativas no PROMETHEE I, uma vez que, o *ranking* completo do PROMETHEE II camufla possíveis relações de incomparabilidade dentro do conjunto de alternativas. Nesse sentido, o *ranking* completo é fácil de usar, mas a análise das incomparabilidades, muitas vezes, ajuda a finalizar uma decisão adequada (PAPATHANASIOU; PLOSKAS, 2018).

Segundo Clemente, Almeida e Filho (2015), a representação das preferências do(s) tomador(es) de decisão dentro da estrutura de contexto de decisão multicritério nos pesos atribuídos ao conjunto de critérios, tanto quanto o estabelecimento das alternativas e dos critérios de avaliação, necessita de informações consistentes capazes de serem traduzidas em valores representativos com exatidão. No entanto, muitas vezes a definição de valores submetem ao (s) decisor (es) um grande esforço cognitivo na mensuração dos graus de importância desses itens.

Tal situação pode incutir em erros de avaliação mediante a atribuição de pesos que geralmente não refletem o efeito desejado para determinados atributos em face de outros. Para isso, Kunsch (2019) destaca a adesão de diversas técnicas de atribuição de pesos substitutos nas metodologias MCDA em situações nas quais a ordenação dos critérios, ou atributos, conseguem

facilmente caracterizar seus níveis de importância para o decisor, ao invés de atribuir sistematicamente pesos, mesmo quando o decisor se revele incapaz. Nesse sentido, uma das abordagens pertinentes mais divulgadas na literatura é a metodologia *Rank-Order Centroid* (ROC).

### 2.3.4 ROC (*Rank-Order Centroid*)

Proposta por Barron (1992), o cálculo dos pesos ROC reflete o centroide do simplex  $S_n$  pela ordenação dos critérios. O simplex basicamente pode ser definido como uma figura geométrica limitada por vértices comumente utilizado para solução de problemas de programação linear, onde os pesos ROC são calculados a partir dos vértices do simplex  $S_n = w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n$ , delimitado por  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  (KUNSCH, 2019).

Para definir o peso centroide para cada critério, toma-se  $S_n$  como o espaço viável de pesos no qual realiza-se as médias das coordenadas referentes aos vértices que definem o centroide. Em geral, para  $i$ -ésimo item a fórmula do método ROC pode ser descrita da seguinte maneira (MUSSOI, 2013; KUNSCH, 2019; MOTA, ALMEIDA, 2020):

$$w_i(ROC) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^i \frac{1}{j} \quad (7)$$

Para sua utilização, esse método assume como informação primária a ordenação de um conjunto de itens, do mais ao menos importante, pela ótica do (s) decisor (es), uma vez que, não haja demais informações quantitativas, a abordagem ROC produz uma estimativa dos pesos por meio da atribuição de valores para cada posição dos critérios no ordenamento definido. Assim, assume-se  $n$  como o número de critérios, e  $j = 1, 2, \dots, n$  é a posição dos critérios no ordenamento. Dessa forma, pode-se assumir que todos são uniformemente distribuídos no simplex, identificando assim, seu centroide contendo a informação de todos os pesos possíveis (MUSSOI, 2013; (ROSZKAWSKA, 2013; CLEMENTE; ALMEIDA; FILHO, 2015)

## 2.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Sob análise da revisão bibliográfica no que diz respeito à contextualização da produção mineral brasileira, destaca-se a exploração do minério gipsita para atender as diversas aplicações de seus subprodutos nos mercados nacional e internacional, especialmente, o gesso, cujo o Brasil é o maior produtor Sul-americano e 14º na escala mundial. Para tanto, percebe-se a responsabilidade estratégica da Bacia sedimentar do Araripe, representada pela cadeia

produtiva do Polo gesso pernambucano, atuante na forma de um APL de base mineral no sustento de 95% da demanda nacional.

Paralelamente, a literatura descreve a Cadeia de produção do gesso composta por macroprocessos que etapas de exploração e beneficiamento do minério gipsita até o escoamento do produto final. Em especial, nos processos produtivos inerentes as transformações físico-químicas, as plantas de calcinação ganham destaque devido ao cozimento do minério em faixas de temperatura acondicionado em diferentes tipos de fornos que, por sua vez, solicitam constantemente por energia térmica proveniente de diferentes fontes de energia capazes de garantir a eficiência do processo

No entanto, analisando-se a dinâmica da cadeia produtiva do APL gesso Pernambucano, a bibliografia lista a delicada situação de composição da matriz energética apoiada, principalmente, pela exploração da lenha nativa como insumo energético encontrado nas indústrias de calcinação. Tal situação reside na dualidade de balancear a sustentabilidade numa exploração sem viés predatório do bioma da região com a necessidade de garantia da segurança energética as atividades industriais, atualmente garantida pela lenha.

Nesse cenário, um caminho plausível seria examinar as potencialidades de energias alternativas mais sustentáveis condizentes à realidade do Polo. Apesar disso, não é uma tarefa fácil sintetizar a extensão das (in) viabilidades e impactos socioambientais dessas fontes, visto que, faz-se necessário transpor, ao menos, as principais implicações correlacionadas do processo de calcinação em parâmetros de análise.

Assim, no intento de realizar essa análise robusta, as ferramentas metodológicas de abordagem multicritério podem fazer jus na tratativa de apontamento dentro de um conjunto de alternativas daquelas com melhor performance mediante relações de preferência. Para isso, as partes envolvidas, nesse caso, seriam representadas por decisores inseridos nas questões ligadas ao Polo. Nesse sentido, dentre diversas abordagens MCDA, a aplicação de uma ferramenta combinando o método PROMETHEE II junto a técnica de elicitação de pesos ROC, no método PROMETHEE-ROC, conseguiria retornar uma ordenação única – agregando as preferências de um decisor específico – de todas as alternativas energéticas possíveis de serem aderidas na matriz energética do APL gesso pernambucano.

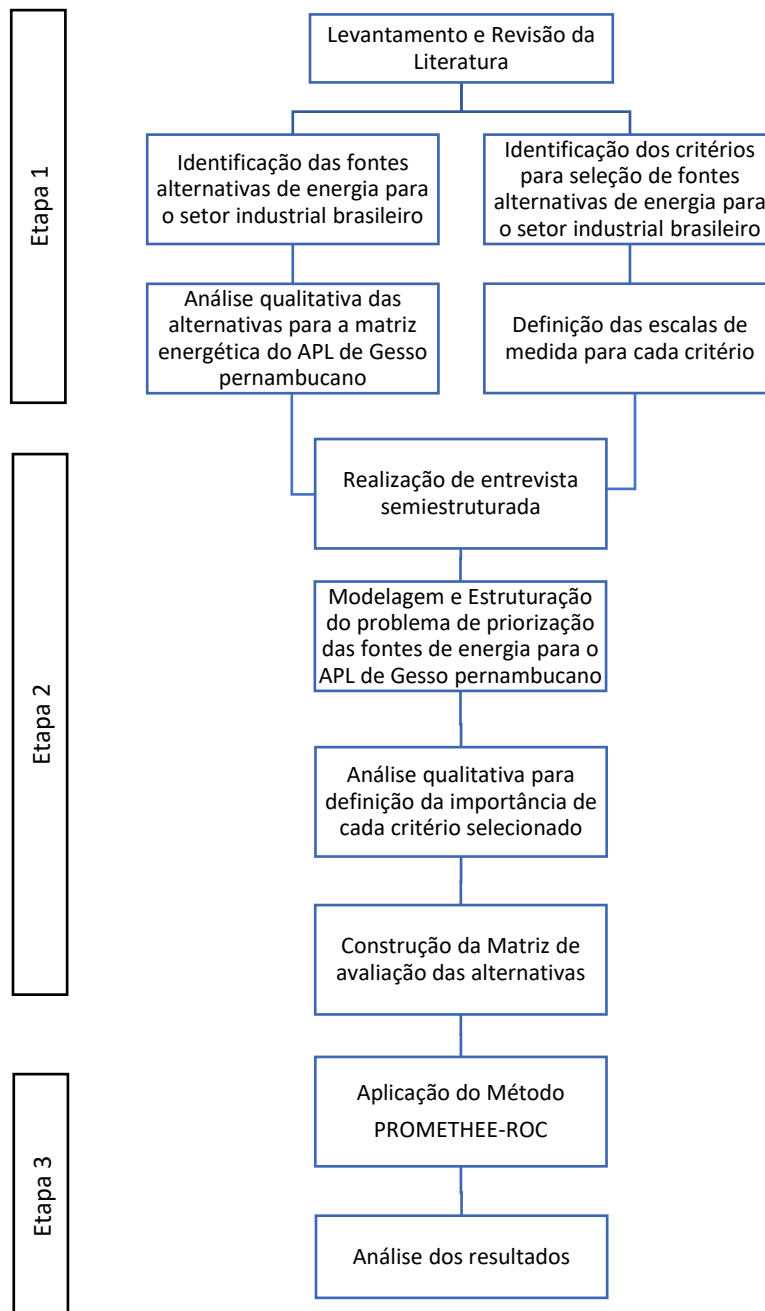
Tendo em vista que, na literatura existem lacunas de estudo envolvendo metodologias estruturadas centradas em análises multicritério no apoio das problemáticas do Polo. Portanto, a contribuição adicional deste trabalho seria proporcionar uma abordagem multicritério, objetivando centralizar as implicações dos múltiplos fatores para introdução de insumos energéticos alternativos mais propícios de serem inseridos na matriz energética; prospectando,

dessa maneira, servir de referência para estudos de projetos, políticas públicas e ações localizadas que venham acentuar o impacto ambiental ao bioma nativo.

### 3 METODOLOGIA

Para o devido tratamento da problematização apresentada na seção anterior, o desenvolvimento do presente estudo transcorre por três etapas distintas, subsequentes e complementares, visando proporcionar uma avaliação estruturada das alternativas de matriz energética ao Polo Gesseiro de Pernambuco apoiada na utilização do método multicritério. A figura 4 apresenta as etapas desenvolvidas para o estudo.

**Figura 6** – Esquemática das etapas da metodologia de pesquisa



Fonte: O autor (2021)

De modo que, embasadas na figura 4, as etapas, assim como, suas respectivas ações, são descritas detalhadamente a seguir.

### 3.1 ETAPA 1

A primeira etapa compreende ao todo cinco atividades. Inicialmente, a primeira ação envolve um **levantamento e revisão da literatura** vigente, permitindo respaldo teórico acerca do tema, assim como, da problemática evidenciada pela pesquisa, através do processo de análise de trabalhos acadêmicos nacionais e internacionais e livros contidos nas bases *Web of Science* e de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sites institucionais e documentos de órgãos governamentais, empresas e sindicatos provenientes do setor mineral, produzidos entre 2000 e 2021, com o intuito de identificar as fontes alternativas de energia presentes no setor industrial brasileiro.

Logo após das informações coletadas, proporciona-se uma análise qualitativa calcada no destaque das alternativas conduzida pela **identificação das fontes alternativas energéticas viáveis** ao APL de gesso pernambucano. Paralelamente, outra ação consiste no **estabelecimento do conjunto de critérios** para a seleção de tais fontes alternativas e a definição das medidas de escala para cada critério. Para tanto, as pesquisas bibliográficas foram realizadas sumariamente em ambiente virtual recorrendo ao uso de palavras-chave, por exemplo: gipsita, gesso, Araripe, calcinação, forno, matriz energética, *mining industry*, *plaster*, *gypsum* e *calcination*.

### 3.2 ETAPA 2

Nessa etapa, a partir da análise qualitativa praticada na etapa anterior, evidenciando as potenciais alternativas de matriz energética, critérios de avaliação e medidas de escala alicerçadas no referencial teórico levantado, a ação subsequente centrou-se na elaboração de questionamentos pertinentes as dimensões de viabilidade de inserção, disponibilidade e eficiência das fontes energéticas no APL gesseiro pernambucano materializados em um roteiro de questões pertinentes aos objetivos geral e específicos do estudo.

Posto isto, para validade do modelo de decisão composto pelo suporte do método PROMETHEE-ROC decorre de amostra do universo de estudo, esta podendo ser representada por um(a) profissional experiente dentro da cadeia produtiva do gesso, da região do sertão pernambucano do Araripe, que assume a função de especialista, no papel de decisor dentro do contexto da abordagem MDCA, uma vez que, os resultados do método não serão aplicados de

fato na empresa da qual o profissional utiliza como referência para pesquisa. Assim, por meio da aplicação de uma **entrevista semiestruturada** condicionada por um diálogo orgânico de perguntas de caráter exploratório junto ao entrevistado, buscou-se agregar a visão particular do profissional na análise de associações, tendências, cruzamento e descarte das informações apresentadas.

Logo, conduziu-se a **modelagem e estruturação do problema** quanto a priorização das fontes de energia e da importância de cada critério selecionado através do preenchimento da **matriz de avaliação** das alternativas de fontes energéticas *versus* critérios de avaliação; realizada de acordo com medidas de escala para cada critério. Para finalização da construção da matriz de avaliação, o especialista atribuiu funções de preferência e os objetivos de maximizá-las, ou minimizá-las, para cada um dos critérios de acordo com preceitos impostos pelo método PROMETHEE II. E, por último, visando a aplicação do método ROC para obtenção dos pesos de cada critério, o especialista ordenou os critérios de avaliação do mais ao menos importante.

### 3.3 ETAPA 3

A última etapa correspondeu a **aplicação do método PROMETHEE-ROC**. De modo que, para o cálculo dos pesos por meio da abordagem ROC observou-se a ordenação dos critérios. E, depois de se estabelecer os dados e informações agregados a matriz de avaliação, a aplicação do método PROMETHEE II foi auxiliada pelo *software* Visual PROMETHEE Academic (versão 1.4), onde a migração dos dados para o ambiente do *software* é solicitada acatando o *layout* explicitado na figura 5.

O *software* gratuito sem fins acadêmicos foi desenvolvido pela empresa *VPSolutions* sobre supervisão dos professores Jean-Pierre Brans e Bertrand Mareschal, estes últimos autores do método PROMETHEE. Portanto, o conjunto de dados são divididos em quatro grupos, sendo: *Bertrand*, *Preferences*, *Statistics* e *Evaluations*.

- **Bertrand** – Representa a denominação dos critérios de avaliação. Na linha *Unit*, são descritas as unidades de medida para cada critério e, a linha *Cluster/Group*, os símbolos geométricos correspondem a possibilidade de editá-los para categorizar os critérios em grupos, se necessário;
- **Preferences** – Na linha Min/Max, compreende os objetivos de minimizar, ou maximizar, cada critério elencado. Em *Weight*, contém os pesos admitidos da aplicação da abordagem ROC e, na linha *Preference Fn.* estabelece-se as funções de preferência



a cada um dos critérios. Ademais, a função *Theresholders* indica se os dados dos limites de *Indifference* e *Preference*, ou seja, indiferença e preferência para cada critério, serão assumidos em caráter absoluto, ou, por porcentagem;

- **Statistics** – No terceiro grupo, o próprio *software* calcula dados estatísticos gerais acerca dos valores de desempenho da matriz de avaliação, expressando os valores mínimo (*Minimum*) e máximo (*Maximum*), média (*Average*) e o desvio padrão (*Standard Dev.*) por cada critério;
- **Evaluations** – Nesta última parte, a primeira coluna – tracejo de cor verde – nominam-se todas as alternativas a serem avaliadas e, por sua vez, cada linha correspondente constam as células com os valores atribuídos pelo decisor para cada critério.

**Figura 7** – Ilustração do ambiente do *software Visual PROMETHEE Academic*

	Price	Power	Consumption	Habitability	Comfort	
<b>Bertrand</b>						
Unit	k€	kW	L/100km	5-point	5-point	
Cluster/Group	●	◆	●	■	■	
<b>Preferences</b>						
Min/Max	min	max	min	max	max	
Weight	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Preference Fn.	V-shape	Linear	V-shape	Level	Level	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	5	n/a	1,0	0,5	
- P: Preference	€ 15,000	30	2,0	2,5	2,5	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
<b>Statistics</b>						
Minimum	€ 15,000	50	7,0	1,0	1,0	
Maximum	€ 38,000	110	9,0	5,0	5,0	
Average	€ 28,083	83	8,2	3,2	3,0	
Standard Dev.	€ 7,407	18	0,7	1,3	1,3	
<b>Evaluations</b>						
<input checked="" type="checkbox"/>	Tourism B	€ 25,500	85	7,0	good	average
<input checked="" type="checkbox"/>	Luxury 1	€ 38,000	90	8,5	good	very good
<input checked="" type="checkbox"/>	Tourism A	€ 26,000	75	8,0	average	average
<input checked="" type="checkbox"/>	Luxury 2	€ 35,000	85	9,0	very good	good
<input checked="" type="checkbox"/>	Economic	€ 15,000	50	7,5	bad	very bad
<input checked="" type="checkbox"/>	Sport	€ 29,000	110	9,0	very bad	bad

Fonte: *Visual PROMETHEE Academic* (2013)

Após o preenchimento do conjunto de dados no ambiente do *software* e do retorno dos resultados, promove-se uma análise dos resultados no que se refere a listagem das alternativas – *ranking* de ordenação – de acordo com o desempenho das matrizes energéticas consideradas

apropriadas ao APL de gesso pernambucano, como também, produzir discussões envolvendo os aspectos da relevância, limitações e prospecções para trabalhos futuros.

## 4 ALTERNATIVAS PARA A MATRIZ ENERGÉTICA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE GESSO

Neste capítulo, será apresentada uma breve caracterização a respeito da Matriz Energética Brasileira, as fontes energéticas não-renováveis e renováveis que a compõe, buscando destacar as alternativas existentes e potenciais referentes aos aspectos sociais, políticos, ambientais, logísticos e geográficos para o atendimento do sistema de produção do Polo Gesseiro do Araripe dentro do contexto do estado de Pernambuco; e, por fim, as considerações gerais pertinentes.

### 4.1 FONTES DE ENERGIA E A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

De acordo com Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileira S.A.) (2022), ainda que a palavra energia comumente seja aplicada de forma coloquial para vários contextos do cotidiano, seu significado técnico-científico caracteriza-se como a percepção de um potencial inato capaz de executar um trabalho, ou ação. Nesse sentido, a energia pode ser obtida a partir da transformação de variados recursos, que podem ter origens diversas, onde essas transformações podem ser controladas (ELETROBRÁS, 2022; EPE, 2022).

Factualmente, ao longo dos séculos, Farias e Sellitto (2011) pontuam que a humanidade evoluiu à medida que explorava novos recursos como fontes energéticas quando os utilizava em processos de utilização e/ou conversão de energia – o fogo; tração animal; moinhos de ventos; lenha; carvão mineral; petróleo e radiação solar, por exemplo – diretamente voltados aos processos de manutenção à vida.

Numa escala nacional, para Lima (2017), esse conjunto de fontes formam uma matriz energética, ou seja, simboliza a composição de todas as fontes energéticas exploradas, transformadas, transportadas e disponibilizadas para uso final de um país (LIMA, 2017). Nesse sentido, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2022) esclarece que os termos ‘matriz energética’ e ‘matriz elétrica’ não se configuram sinônimos, pois uma matriz elétrica constitui-se do conjunto de fontes energéticas disponíveis para geração de energia elétrica.

De acordo com EPE (2022), o aglomerado de diferentes fontes energéticas constituídas ao longo da história pode ser dividido em dois grandes grupos: não renováveis e renováveis. As fontes de energia não renováveis são consideradas finitas ou esgotáveis. Para a maioria delas, a reposição na natureza é muito lenta, pois resulta de um processo de milhões de anos sob condições específicas de temperatura e pressão. São exemplos de fontes não renováveis de energia: petróleo carvão mineral, gás natural e nuclear (EPE, 2022).

Além disso, Dematte et al. (2016), Farias e Sellitto (2018) e EPE (2022) caracterizam as fontes de geração de energia renováveis como consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades podem ser repostadas constantemente ao serem utilizadas de forma espontânea, ou sob ação humana, na natureza, além disso, são denominadas energias limpas, pois substancialmente emitem menos gases de efeito estufa (GEE) que as fontes fósseis, por exemplo: Sistemas eólicos; fotovoltaicos; usinas de incineração de resíduos e biomassa, além de pequenas usinas de hidroelétricas (DEMATTE et al., 2016).

Na visão dos autores supracitados, nota-se que a constituição de uma matriz energética por diferentes fontes reflete o desenvolvimento socioeconômico de um país, tendo em vista fatores como a disponibilidade de recursos, interesses comerciais, domínio de tecnologias e a preservação do meio ambiente levaram a diferentes escolhas para sua composição (FARIAS; SELLITTO; 2011). A Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*) (2022) e o Instituto de Pesquisa Estatística Aplicada (IPEA) (2022) ressaltam que o cenário peculiar e desafiador da matriz energética brasileira resiste aos contrapontos históricos dos fortes níveis consumo de energia aliados uma grande densidade populacional de mais de 210 milhões de habitantes pautada pela diversidade e abundância de fontes de energia.

De acordo com o mais recente Relatório do Balanço Energético Nacional 2021 – ano base 2020 – publicado pela EPE (2021), a Oferta Interna de Energia (OIE), que representa o quantitativo energético colocado à disposição para movimentar a economia em 2020, foi de 287,6 milhões toneladas de equivalentes de petróleo (Mtep), mostrando um recuo de 2,2% em relação a 2019, resultante dos efeitos da pandemia do COVID-19<sup>1</sup>. No entanto, o avanço representativo das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica, concomitante a participação da biomassa de cana e o biodiesel, asseguraram disponibilidade de energia ao país em níveis satisfatórios em relação resto do mundo. Além disso, tal situação atípica, também inibiu a participação das fontes não renováveis em cerca de 5,6% de petróleo e derivados.

No gráfico 1 tem-se a participação das fontes não renováveis e renováveis na composição da matriz energética brasileira no ano de 2020, observando-se uma proporção significativa de 48,4% das fontes renováveis, contra apenas 12,2% nos países da OCDE<sup>2</sup> e de 14,9%, na média mundial (BRASIL MME, 2021c). Sendo que, as três fontes mais participativas compreendem o Petróleo e seus derivados, responsáveis por mais de um terço da energia no país (33,1%), seguido da energia proveniente dos Derivados cana-de-açúcar (19,1%) e hidrelétrica (12,6%).

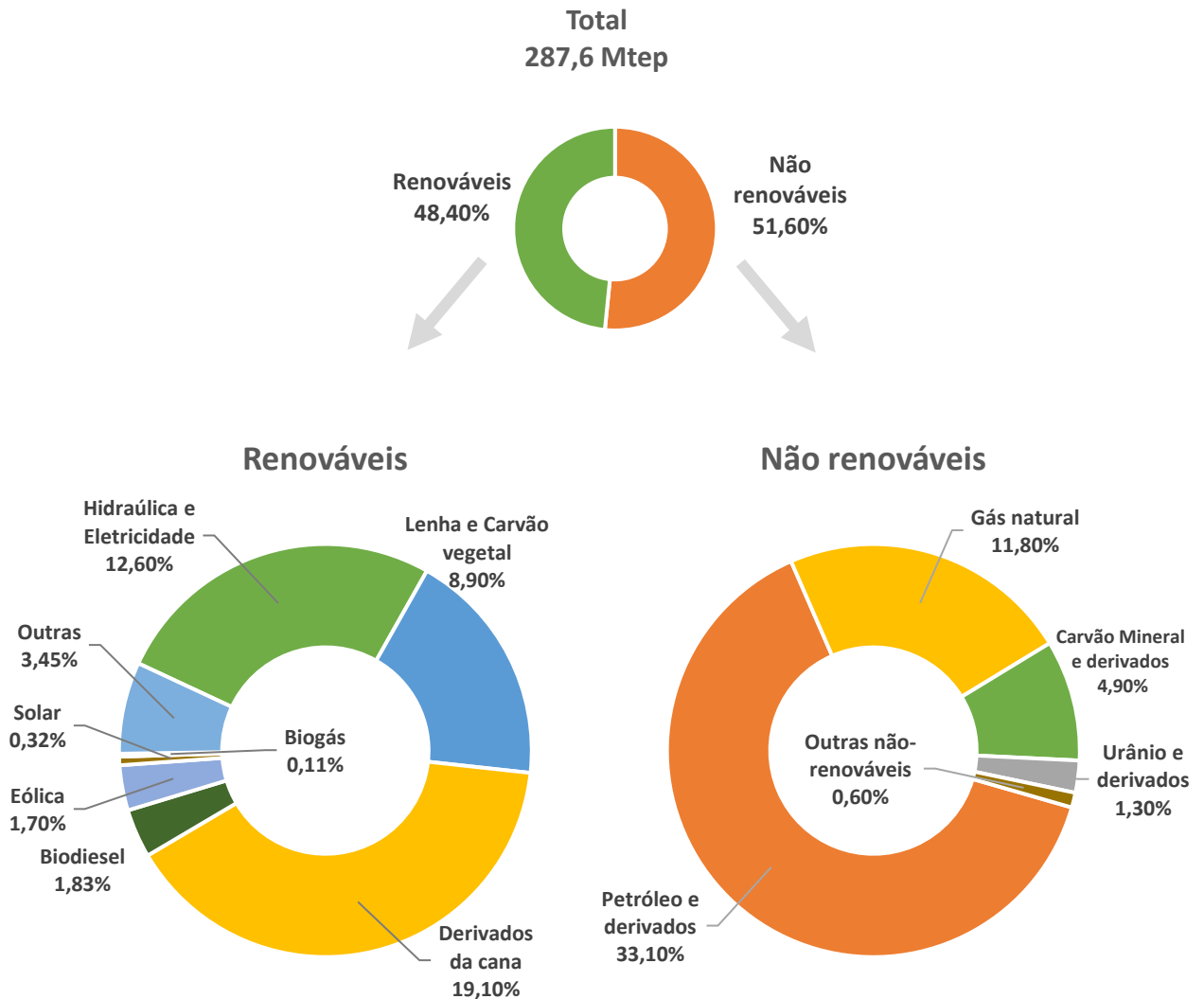
---

<sup>1</sup> Coronavirus Disease 2019 (COVID-19).

<sup>2</sup> Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) constituída com o objetivo de estabelecer políticas de desenvolvimento socioeconômico entre seus países membros e outros países. Atualmente, a entidade possui 38 países membros como: Principais países europeus, Estados Unidos, Canadá, Japão, Coreia do Sul, Chile, Colômbia, México, Costa Rica, Austrália, Nova Zelândia, Israel e Turquia.

Por outro lado, dentre as fontes de energias renováveis, a Lixívia (3,31%), Biodiesel (1,83%), Eólica (1,70%), Solar (0,32%), Biogás (0,11%) e Outras<sup>3</sup> (0,42%), juntas representam 7,7%, menor que a Lenha e Carvão vegetal (8,90%).

Gráfico 1 – Oferta Interna de Energia no Brasil em 2020 (%)



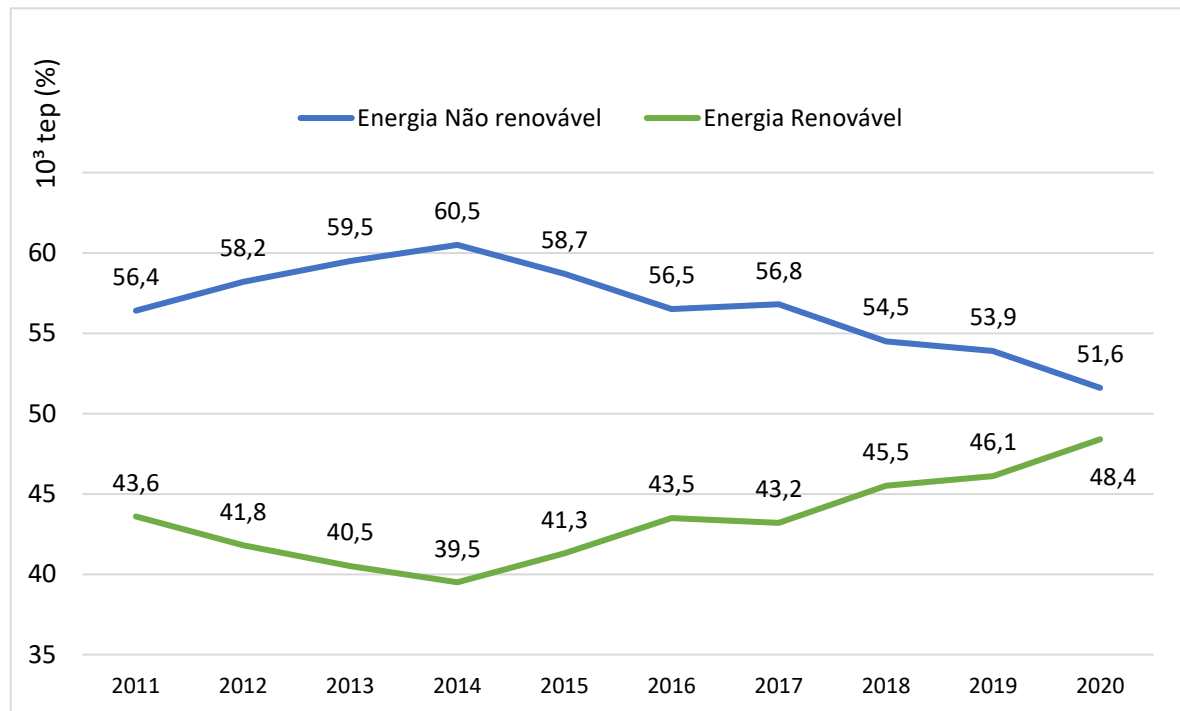
Fonte: EPE (2021).

De acordo com Brasil MME (2021c), de 2019 para 2020, a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira: Etanol (+0,5%); Derivados da cana-de-açúcar (+0,5%); Biodiesel (+0,2%) e a Energia solar (+0,3%). Enquanto que, a Energia hidráulica recuou (-0,8%) e a Lenha/carvão vegetal (-0,5%). Considerando os níveis de OIE para os últimos dez anos, o gráfico 2 demonstra uma redução da participação das energias renováveis

<sup>3</sup> Compreende o Gás industrial de carvão vegetal (0,0308%) e outras biomassas (0,39%), incluindo Casca de arroz, Capim-elefante e Óleo vegetal.

na matriz energética entre 2011 e 2014 devido à queda da oferta hidráulica (EPE, 2021). E, somente a partir de 2015, as fontes renováveis retomaram uma trajetória ascendente impulsionada substancialmente pelas maiores ofertas dos derivados de cana-de-açúcar, eólica e biodiesel. Ainda assim, o recuo paulatino das fontes não renováveis dentro do intervalo de 2011 a 2020 proporcionou um aumento de 4,8% das fontes renováveis.

Gráfico 2 – Oferta Interna de Energia no Brasil de 2011-2020 (%)



Fonte: EPE (2021).

Nos últimos dez anos, no período de 2011 a 2020, os níveis de participação na matriz energética brasileira oscilaram em favor das fontes renováveis. Nas fontes não renováveis, o Petróleo e derivados (-5,9%) retraíram mais significativamente, e em seguida, o Carvão mineral (-0,8%) e Urânio (-0,2%). Por outro lado, mesmo que no geral, as fontes renováveis tenham alçado maior contribuição na OIE, seus comportamentos ao longo do período verteram-se em participações difusas, ou seja, algumas fontes regrediram, como a Energia hidráulica (-2,1%) e Lenha e carvão vegetal (-0,7%), e outras, aumentaram sua disponibilidade ao mercado nacional; são elas, os Derivados de cana-de-açúcar (+3,4%), a Energia eólica (+1,6%), solar (+0,32) e Outras<sup>4</sup> fontes renováveis (+2,2%).

Por sua vez, examinando o consumo nacional de energia em 2020, da ordem de 254,6 Mtep, por setor, foram sobretudo os setores industrial (32,1%) e de transportes (31,2%), os

<sup>4</sup> Representa o Biodiesel, Gás industrial de carvão vegetal e outras biomassas como casca de arroz, capim-elefante e óleo vegetal.

maiores consumidores, respondendo por aproximadamente 63% do consumo, depois os setores energético (11,2%), residencial (10,8%) e agropecuário (5,1%), este último tendo ultrapassado o setor de serviços (4,7%) e, por fim, para fins não energéticos (4,9%). Aliás, os efeitos das medidas restritivas para o combate da COVID-19 influenciaram o comportamento do consumidor brasileiro e, por conseguinte, proporcionaram uma variação do consumo de energia no mesmo período aos setores da economia; tendo assim, a indústria (+3,9%), residencial (+3,4%) e agropecuário (+3%), os únicos setores que expressaram aumento, ao passo que, os setores Energético (-4,1%), de Transportes (-6,4%) e Serviços (-9,5%), por exemplo.

Cabe ressaltar no setor da indústria, a variação de consumo dos seus respectivos subsegmentos, destacando-se um aumento no consumo dos segmentos de Alimentos e bebidas (+26,9%) e Cimento (+9,4%), ambos impulsionados pela produção das matérias-primas de açúcar e clínquer, respectivamente, mas, havendo decréscimos nos segmentos de Cerâmica (-11,45), Mineração e pelotização (-11,5%), Química (-12,6%) e Têxtil (-13%). Além de que, o consumo de energia no setor industrial brasileiro teve 63% de renovabilidade<sup>5</sup> assumida pelas energias renováveis, graças às reduções de uso do Carvão mineral (-4,9%), Gás natural (-13,3%), e crescimento do Bagaço de cana (+37,2%) e Lixívia (+5,4%) na sua matriz energética.

Ademais, percebe-se uma variação decenal referente ao último período, de 2011 a 2020, na grande maioria das energias renováveis e não renováveis, apresentando-se um cenário favorável à maior atuação das fontes renováveis no setor industrial. De acordo com o gráfico 3, o diferencial percentual das participações das fontes na matriz energética industrial brasileira, de modo que, com exceção da Lenha (+0,6%), as energias não renováveis diminuíram em consumo. Houve uma retração mais considerável por parte do Gás natural (-2,4%), seguido do Óleo combustível (-1,6%) e Coque de carvão mineral (-0,9%) e, em menor proporção, o Carvão mineral (-0,2%), o Gás de coqueria (-0,2%) e Outras energias não renováveis <sup>6</sup>(-0,1%). Por outro lado, as energias renováveis provenientes do Bagaço da cana (+2,9%), Eletricidade (+0,4%) e Outras fontes renováveis <sup>7</sup>(+2,9%) foram mais consumidas.

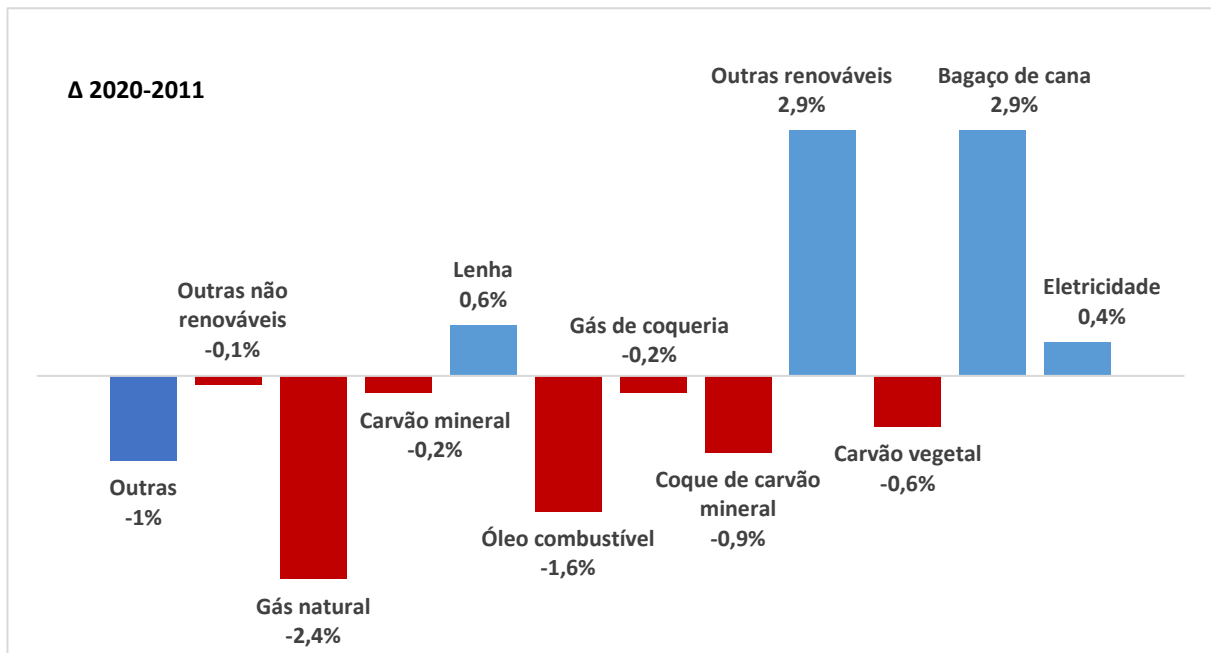
---

<sup>5</sup> Índice referente à razão entre a quantidade de energia renovável em relação à energia total.

<sup>6</sup> Nafta, Alcatrão, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), Óleo diesel e querosene.

<sup>7</sup> Gás industrial de carvão vegetal e outras biomassas, incluindo Casca de arroz, Capim-elefante e Óleo vegetal

Gráfico 3 – Variação do consumo de energia por fonte de 2011-2020 (%)



Fonte: EPE (2021).

Analisando-se o potencial energético brasileiro a longo prazo, dentro do ponto de vista socioeconômico, tem-se o mais recente estudo do IPEA (2021a) destacando o bloco econômico de países dos BRICS (*Brazil, Russia, India, China and South Africa*)<sup>8</sup>, onde juntos tinham elevada participação no consumo de energia, em 2019, 38% do total, onde, um progresso considerável no processo de transição energética do Brasil, apresentava já 45% de participação de fontes renováveis, em contrapartida dos demais países do bloco, cujas matrizes energéticas são concentradas na utilização de combustíveis fósseis: África do Sul (97%), Rússia (94%), Índia (92%) e China (87%) (IPEA, 2021b).

Além disso, o IPEA (2021a) destaca que a evolução dos avanços do processo de transição energética no Brasil depende da implantação de programas e políticas públicas de modo concomitante, promova uma retomada de crescimento econômico, elevando a disponibilidade de energia, mantendo a renovabilidade de sua matriz. Visto que, devido intensa exploração de petróleo e gás natural, sobretudo, na região do pré-sal, que possivelmente alcançará 77% da produção nacional de óleo em 2029, mantendo os derivados de petróleo fontes cruciais, como também, da necessidade de altos investimentos em infraestrutura para expansão do gás natural em regiões distantes e, ainda baixa inserção tecnológica que atualize formas de armazenamento de energia mais eficientes.

<sup>8</sup> Termo acrônimo utilizado para nomear o grupo de países emergentes formado pelo Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul



Diante disso, segundo o Plano Decenal de Expansão da Energia (PDE2031), Brasil MME (2022d) toma as prerrogativas sociodemográficas e da economia mundial dos últimos acontecimentos para sinalizar que as fontes renováveis poderão figurar um crescimento médio anual de 2,9% na próxima década, com perspectiva de firmar 48% de participação de energias renováveis na matriz energética brasileira, caso haja investimentos na ordem de mais de R\$ 3,2 trilhões, tendo ainda R\$2,7 trilhões destinados ao petróleo, gás natural e biocombustíveis. De maneira que, propicie um crescimento médio de 6,7% ao ano na oferta pela soma da energia eólica, solar, biodiesel e lixívia, como também na oferta de gás natural, com 14% de participação, e a redução do petróleo e seus derivados, para 30%.

## 4.2 POTENCIAIS FONTES DE ENERGIA PARA O POLO GESSEIRO DO ARARIPE

Nas subseções seguintes busca-se contextualizar as implicações do uso das fontes energéticas não renováveis e renováveis viáveis sob os enfoques social, ambiental, logístico e político ao atendimento da demanda energética do Polo gesseiro Pernambucano.

### 4.2.1 Óleo Diesel

O **Óleo Diesel (OD)** é o produto mais abundante obtido a partir do refino do petróleo no estado líquido de centenas de compostos químicos. Sua composição química apresenta, majoritariamente, hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos, que podem ser parafínicos, naftênicos ou aromáticos e, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio. Sendo que as proporções destas diferentes classes de hidrocarbonetos no diesel definirão sua qualidade. Além disso, termos gerais, é um produto inflamável, com nível médio de toxicidade, pouco volátil, sem material em suspensão, límpido, com cheiro forte e característico (CNT, 2012; SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012; ANP, 2020; PETROBRÁS, 2022a).

No Brasil, o OD pode ser comercializado como de usos rodoviário, não rodoviário e marítimo, sendo combustível para motores de combustão interna e ignição por compressão (motores do ciclo diesel) em diversas aplicações, principalmente em veículos automotores para transporte de cargas e passageiros, pequenas embarcações marítimas, na indústria, na geração de energia, em máquinas agrícolas, máquinas de grande porte e locomotivas e aplicações estacionárias, geradores elétricos, por exemplo (CNT, 2012; ANP, 2020; PETROBRÁS, 2022a).

Desde a lei nº 11.097/ 2005, a alavancagem da produção de diesel no Brasil deu-se com a adição do biodiesel – proveniente da manufatura da soja, sebo bovino e demais óleos – como

um dos mais significativos aditivos ao diesel, em detrimento da diminuição dos teores de enxofre. Desde então, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) pode variar o teor de 6% a 15% de biodiesel na mistura, visando salvaguardar os interesses dos consumidores quanto ao preço, qualidade e oferta dos produtos motivado pelo interesse público (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012; VERDÉLIO, 2021).

Para atender às diversas aplicações do produto, vários tipos de OD são encontrados no mercado. De modo que, no território nacional a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no que tange a adição de biodiesel, classifica o *óleo diesel A*, como produto final sem a adição de biodiesel e, *óleo diesel B*, com adição de biodiesel.

Além disso, o teor de enxofre é adotado e reconhecido mundialmente como indicador do tipo de OD e da boa qualidade do produto, quanto menor o teor de enxofre, melhor, pois diminui as emissões de óxidos de enxofre e material particulado, além de perdurar a vida útil dos motores de combustão. Portanto, os tipos de óleo diesel comercializados no Brasil são diferenciados basicamente pelos teores máximos de enxofre: S-10 (10 mg/kg), S-500 (500 mg/kg) e S-1800 (1800 mg/kg) – ver quadro 4 (ANP, 2020; CETESB, 2020; PETROBRÁS, 2022a).

**Quadro 4 – Classificação dos tipos de óleo diesel**

Uso	Óleo Diesel	Teor de enxofre	Unid	Aplicações
Rodoviário	A	S10	mg/kg	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veículos automotivos;</li> <li>▪ Máquinas agrícolas;</li> <li>▪ Máquinas de construção;</li> <li>▪ Máquinas industriais</li> </ul>
	B	S500		
Não Rodoviário	-	S1800		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mineração a céu aberto;</li> <li>▪ Transporte ferroviário;</li> <li>▪ Geração de energia elétrica</li> </ul>
Marítimo	DMA (Diesel Marítimo A) DMB (Diesel Marítimo B)	-		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Destinado a atender as embarcações</li> </ul>

Fonte: ANP (2020) e Petrobrás (2022a)

No Polo Gesseiro do Araripe, o óleo diesel representa em torno de 5% na matriz energética da região. Suas aplicações são percebidas no acionamento de equipamentos movidos ao óleo diesel durante as operações de lavra nas minas e, em maior grau, no beneficiamento do minério gipsita através da demanda energética pelos fornos igualmente movidos por motores a

diesel; no consumo de 1.000 litros de óleo diesel para 1,56 toneladas de gipsita beneficiada (MME, 2009).

#### 4.2.2 Coque de Petróleo

Segundo Petrobrás (2022a), o **Coque de Petróleo (CP)** é um combustível sólido de origem fóssil derivado do processo de craqueamento térmico (também conhecido como pirólise, refere-se a quebra de um composto químico em moléculas menores) para o refino do petróleo, contendo um elevado teor de carbono acima de 87%, acompanhado de pequenas concentrações de nitrogênio, enxofre, níquel, vanádio e outros metais pesados; sendo utilizado como combustível em usinas de energia e plantas industriais (ANDREWS; LATTANZIO, 2013; COQUE VERDE, 2018; JARDINE; BARROS, 2021).

O CP possui diferentes formas oriundas dos tipos de processos químico-físicos aos quais é submetido. Na sua forma primária, o Coque Verde de Petróleo (CVP) compreende um material de características porosa, de cor negra e no formato de pequenos grânulos. O termo “verde” refere-se ao estágio do seu processo de produção, significando que o material ainda se encontra no seu estado virgem, alheio a qualquer processo químico-físico (COQUE VERDE, 2018; GOLDEN ENERGY, 2022; PETROBRÁS, 2022b).

Outra forma bem conhecida é o Coque Calcinado de Petróleo (CCP), produto derivado da queima do coque verde de petróleo. Para ser originado, passa por um processo de calcinação em fornos rotativos, submetido a altas temperaturas, entre 1000 °C a 1300 °C, que devido a exposição ao calor, a decomposição química do material serve de combustível fornecendo energia térmica liberada dentro do forno (MACARRI, 2019; GOLDEN ENERGY, 2022).

Por esse motivo, os autores supracitados destacam o processo de calcinação como uma das principais aplicações industriais de beneficiamento. Em específico, Campos et al (2018) assumem o CP como uma das fontes energéticas por vezes recorrentes para a calcinação da gipsita na região do Polo gesseiro do Araripe. No entanto, apesar de algumas calcinadoras optarem por ele, dióxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>) provenientes de sua combustão quando combinado com vapor de água, produz compostos que amplificam a corrosão de superfícies metálicas, o que reduz a vida útil dos fornos (FRANÇA, 2016; MELO; NEGREIROS, 2021).

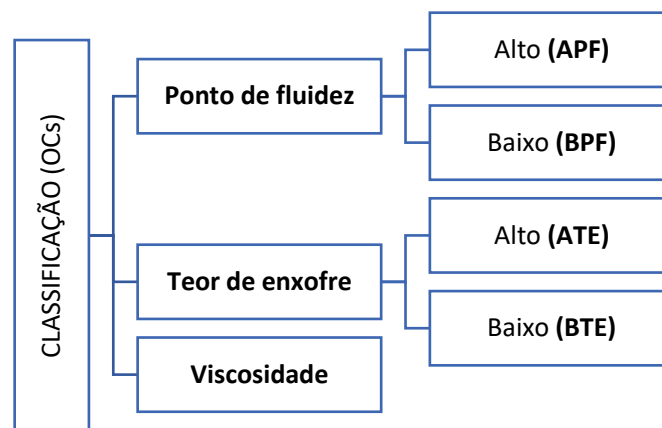
#### 4.2.3 Óleo Combustível

O **Óleo Combustível (OC)** é um subproduto derivado do processo de refino da parte remanescente – frações “mais pesadas” da composição – do petróleo, sendo também

denominado de OC pesado, ou OC residual, conforme Petrobrás (2022a). Em termos característicos, a composição química do OC pode ser considerada complexa, depende da composição do próprio petróleo, dos métodos de destilação e misturas com demais compostos realizados nas refinarias.

No geral, os OCs possuem cadeias longas de hidrocarbonetos e pequenas concentrações de elementos como o enxofre, nitrogênio e oxigênio. Devido as variações em sua composição, existem vários tipos de OC – ver figura 8. Bizzo (2003) explicita que as especificações básicas para categorizar os óleos combustíveis habitualmente incluem os fatores viscosidade, o ponto de fluidez e o teor de enxofre. A viscosidade representa a resistência ao escoamento que o óleo apresenta sob determinada temperatura, de modo que, quanto mais viscoso, mais grosso será o OC (BERTULANI, 2009).

*Figura 8 – Tipos de classificação dos OCs*



*Fonte: O autor (2021)*

O Ponto de Fluidez representa a menor temperatura na qual o óleo consegue fluir e, por último, os OCs de baixa concentração são melhor aproveitados, tendo em vista que, havendo a combustão de óleos com alto teor de enxofre poderá corroer partes metálicas dos equipamentos que promovem sua queima devido a formação de ácido sulfúrico; além dos gases contaminantes lançados na atmosfera (NBR 11349, 2009; ANP, 2016; CARVALHO, 2018).

Historicamente, até 1987, eram comercializados quatro tipos de OCs de petróleo: BPF (Baixo Ponto de Fluidez), APF (Alto Ponto de Fluidez), Óleo 4 e BTE (Baixo Teor de Enxofre). De 1987 até 2016, vigorou a classificação dos óleos residuais em dois grupos, A e B. No grupo A, continha os OCs com alto teor de enxofre e, no grupo B, os óleos de baixo teor de enxofre. Ainda assim, cada um destes grupos era dividido em 9 tipos de óleos, de acordo com o nível de viscosidade, variando do menos viscoso (1) ao mais viscoso (9).

Atualmente, a Resolução ANP N°3, de 2016, revitalizou a classificação oficial dos OCs focada numa nova representação alfanumérica, aliando as propriedades de teores de enxofre a

viscosidade, alocando-os ainda em dois grupos, A e B, onde quanto mais elevado o número indicativo no óleo, mais elevadas são as temperaturas para propiciar fluidez durante as atividades de armazenagem, manuseio e queima: OCA1; OCA2; OCB1 e OCB2, por exemplo, conforme tabela 1. De modo que, a ANP (2016) somente autoriza a comercialização de OCs com teor de enxofre na faixa de 1% a 3% de sua massa total. Entretanto, aos OCs com teores de viscosidade e enxofre superiores aos grupos A e B no quadro abaixo – denominados OC3 – são comercializados mediante ofício encaminhado previamente para a ANP.

*Tabela 1 – Especificações dos OCs*

Característica	Unid	Tipo			
		OCA1	OCA2	OCB1	OCB2
Viscosidade	mm <sup>2</sup> /s	620	960	620	960
Enxofre	% massa	2,5	2,5	1	1

*Fonte: ANP (2016)*

Os OCs também podem ser classificados de acordo com o ponto de fluidez em óleos de Baixo Ponto de Fluidez (BPF) e Alto Ponto de Fluidez (APF). No caso do óleo BPF, ele é considerado um material denso, composto de frações pesadas de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos, olefínicos e asfáltênicos, entre outros; necessitando de um aquecimento prévio a fim de aumentar seu ponto de fluidez e, por sua vez, atingir seu ponto de fulgor para haver uma queima eficiente (MENINO, FERREIRA, 2017; FISPQ BR, 2019).

De acordo com os autores supracitados, os fins comerciais do óleo BPF compreendem sua aplicação nas indústrias para geração de calor direcionada ao aquecimento de fornos, caldeiras e motores de combustão interna. Porém, no contexto das calcinadoras do polo gesseiro do Araripe, Urbano (2013), França (2016), Campos et al. (2018) e Santos (2019) destacam nos fornos do tipo marmitta vertical e marmitta rotativo, o emprego do óleo BPF como combustível fóssil alternativo em detrimento ao alto consumo de lenha nativa.

Entretanto, a maior parte das calcinadoras não dispõe de um sistema eficiente que capte os gases e poeiras. Visto que, do ponto de vista ambiental, sua queima expelle gases de combustão contaminantes em níveis altamente poluentes como material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), entre outros (ARAÚJO, MARTINS, 2011; FISPQ BR, 2019; PETROBRÁS, 2019).

Os riscos dos óxidos metálicos resultantes da queima condicionam a longo prazo ação corrosiva, como também, sua fuligem pode ocasionar o entupimento, ou encrustar-se nas

tubulações, rotores das bombas e demais equipamentos; exigindo, dessa maneira, manutenção frequente de suas plantas industriais (PETROBRÁS, 2019).

Além disso, soma-se a possibilidade os riscos de contaminação do solo, e ambientes aquáticos, por meio de vazamentos e derramamentos que expõem águas superficiais, mananciais e, conseqüentemente, os animais e demais seres vivos locais. Ainda assim, o risco de toxicidade por inalação, contato ou ingestão, por parte dos operadores diretos e indiretos. (FISPQ BR, 2019; PETROBRÁS, 2019).

#### 4.2.4 Gás Natural

De acordo com *American Petroleum Institute* (API, 2022), o **Gás Natural (GN)** é um combustível gasoso de origem fóssil composto de hidrocarbonetos resultante da decomposição orgânica de animais, vegetais e microrganismos ao longo dos milhares de anos em reservatórios profundos no subsolo. Nas condições normais atmosféricas de pressão e temperatura, a composição química do GN incorpora a presença de quatro gases naturais: etano ( $C_2H_6$ ), butano ( $C_4H_{10}$ ), propano ( $C_3H_8$ ) e, abundantes teores de metano ( $CH_4$ ). O GN pode ser classificado em duas categorias, associado e não associado (HOLLANDA et al., 2014; ANP, 2020; BAHIA GÁS, 2022; NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022)

O gás associado corresponde aquele que se encontra dissolvido no petróleo, ou sob a forma de uma capa de gás nos reservatórios geológicos. Enquanto que, o gás não associado é aquele que está livre do petróleo e da água, ou seja, separado em camadas dentro do reservatório. No Brasil, o GN produzido é majoritariamente de origem associada ao petróleo e se destina a diversos mercados de consumo. Isso porque devido às suas propriedades físico-químicas e à contínua evolução tecnológica tanto de extração, como também na manipulação do combustível, o GN pode ser utilizado em diversos segmentos da atividade econômica (HOLLANDA et al., 2014; ANP, 2022; PETROBRÁS, 2022c).

Na indústria, o GN como fonte energética para o fornecimento de calor nos processos industriais (HOLLANDA et al., 2014; ANP, 2022; ECYCLE, 2022; NATURGY, 2022; PETROBRÁS, 2022c), como:

- Indústria de vidros – modelagem, solda e acabamento;
- Indústria cerâmica – queima e secagem;
- Indústria de papel e celulose – secagem;
- Indústria cerâmica – queima e secagem;
- Indústria siderúrgica – fundição, corte e solda e;

- Indústria alimentícia – secagem de grãos, higienização e cocção de alimentos.

Em termos comparativos, Cavalcanti et al. (2011), ANP (2022), Copergás (2022) e NATURGY (2022) apontam que as vantagens do uso industrial do GN geram menor impacto ambiental frente aos demais combustíveis fósseis, à medida que proporciona uma eficiência de troca térmica mais uniforme; uma vez que não necessita de aquecimento antes da combustão. Nesse sentido, estudos de caso, modelagens matemáticas e protótipos em fornos de calcinação rotativos de contato direto com o material a ser beneficiado nos estudos de Benachour et al. (2004), Oliveira e Shinohara (2014), França (2016) e Copergás (2022) sedimentaram a presença gradual do GN em plantas industriais brasileiras de celulose, cal, cimento e gesso.

Para o caso do Polo gesseiro do Araripe, cerca de 680km da capital Recife, a princípio, Oliveira e Shinohara (2014), Melo e Clemente (2021), Copergás (2022) e Sindugesso (2022) identificam a logística de transporte do GN um fator restritivo nos possíveis cenários de alta demanda. Como também, em menor grau, os fatores de consumo, a confiabilidade, os custos adicionais, a redefinição de infraestrutura das plantas industriais e o preço como questões estratégicas paralelas à barreira logística do GN que inibem uma maior aderência de consumo por parte das empresas locais.

Nesse sentido, os esforços para interiorização do GN no estado de Pernambuco iniciaram em 2009, viabilizado pelas parcerias da Copergás com o Governo do Estado, Prefeituras e representantes do setor industrial, ativando uma Rede de Distribuição de Gás Natural (RGDN) de 120 km que ligou a capital Recife ao município de Caruaru, beneficiando pelo trajeto cidades de Moreno, Pombos, Vitória de Santo Antão, Sairé, Chã-Grande, Gravatá e Bezerros. Em 2016, a rede de distribuição aumentou 53 km ligando Caruaru a cidade de Belo Jardim.

Recentemente, no último trimestre de 2021, a Copergás (2022) inaugurou duas novas RGDN, nas cidades de Garanhuns e Petrolina (30km), voltadas ao fortalecimento da interiorização do GN. Em ambas, as malhas dutoviárias locais foram construídas para atender, principalmente, clientes industriais, comerciais e residenciais dessas regiões. Assim, na parceria firmada da companhia com a *New Fortress Energy* – importante empresa do setor – o gás é transportado para as cidades em estado líquido através de caminhões refrigerados. Em seguida, nas redes locais, o GN é gaseificado e distribuído pelos dutos municipais.

No caso do Polo Gesseiro do Araripe, o acesso ao GN pelas poucas indústrias que o utilizam chegou em 2011 como projeto piloto de iniciativa do governo estadual, perfazendo o consumo projeto de 30 mil m<sup>3</sup>, ainda hoje apresenta extrema dependência da distribuição terceirizada por caminhões abastecidos no RGDN de Caruaru com o GNC. Porém, em 2021, em visita recente ao Polo, na cidade de Araripina, a Copergás manifestou o interesse em montar

uma usina de GN para abastecer cerca de dez indústrias num raio de 5km (OLIVEIRA; SHINOHARA, 2014; FIEPE, 2021; COPERGÁS, 2022).

No entanto, atualmente, a Copergás (2022) analisa a viabilidade da interiorização do GN para a região do Sertão do Araripe, visando o município de Araripina, por meio de rede dutoviária local similar as cidades anteriores. Para isso, no último trimestre de 2021, um estudo promovido conjuntamente com a SINDUSGESSO, tem o intuito de observar o consumo piloto do GN de uma empresa presente no APL durante o beneficiamento da gipsita, assim como, o levantamento dos custos inerentes, venha resultar num modelo de negócios que possa gerar incentivos futuros de maior demanda do gás.

#### **4.2.5 Biomassa: Lenha, Cavaco de madeira e Capim-elefante**

O termo biomassa é utilizado para denominar todo material orgânico não fóssil – de origem vegetal ou animal – que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui todas as vegetações aquáticas e terrestres, árvores, madeira de reflorestamento, óleos vegetais, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e, outros tipos de restos industriais, que tem o objetivo primário a produção de energia (VIDAL; HORA, 2011; MARAFON et al., 2016; IBÁ, 2017; RANGEL et al, 2018; IEE USP; 2022).

Os principais usos da biomassa como insumo energético são a produção de biocombustíveis sólidos para geração de energia térmica (carvão e resíduos agrofloretais), biocombustíveis líquidos (álcool combustível, biodiesel e *Biomass-to-Liquids* (BTL)) e na geração de energia elétrica. Para tanto, o aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio de diferentes processos de conversão como combustão direta, processos termoquímicos ou biológicos (VIDAL; HORA, 2011; IBÁ, 2017; RANGEL et al, 2018; IEE USP, 2022).

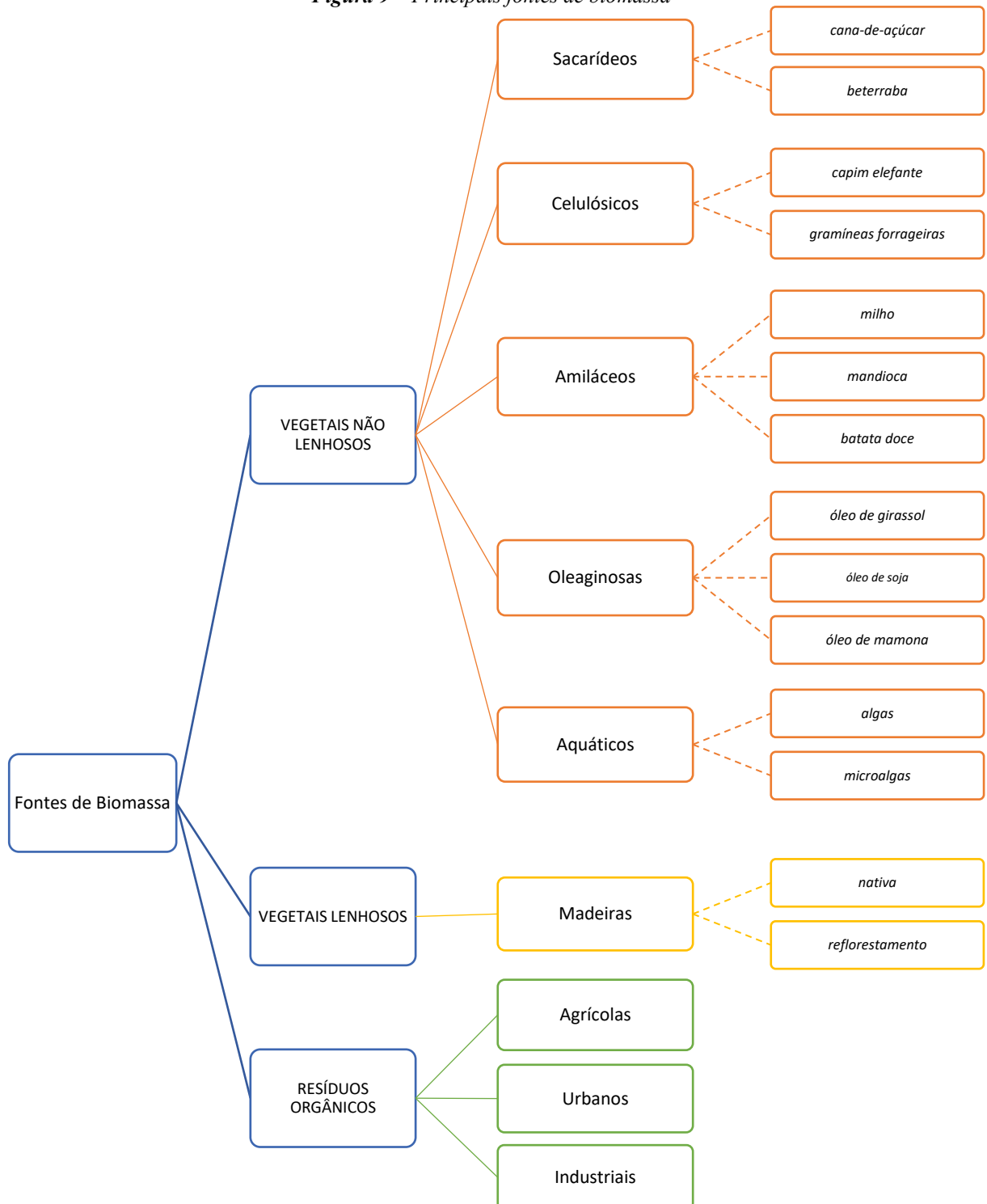
Devido tais implicações, de maneira geral, diferentes classificações procuraram categorizar os tipos de biomassa pelas suas características, origens, processos e tecnologias de beneficiamento não conseguiram englobar todos os aspectos conceituais. Segundo Vidal e Hora (2011) e Marafon et al (2016) uma classificação pertinente seria proposta pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (Cenbio), na qual classifica a biomassa em dois grandes grupos: *biomassa tradicional*, composta essencialmente pela lenha e resíduos naturais e *biomassa moderna*, produzida a partir de processos tecnológicos avançados e eficientes como os cultivos dedicados de espécies, tais como florestas plantadas.

Em outra abordagem, o Cenbio rearranja os principais tipos de biomassa em três categorias: vegetais lenhosos; vegetais não-lenhosos e; resíduos orgânicos. Por sua vez,



acompanhadas de suas respectivas subclassificações, conforme dispostas na figura 10 (CENBIO, 2010; VIDAL; HORA, 2011; MARAFON et al., 2016).

**Figura 9 – Principais fontes de biomassa**



Fonte: IEE USP (2022)

- Vegetais não lenhosos – são tipicamente produzidos de cultivos sazonais classificados de acordo com sua substância de armazenamento de energia, podendo ser de sacarídeos, celulósicos, amiláceos e aquáticos (CENBIO, 2010);

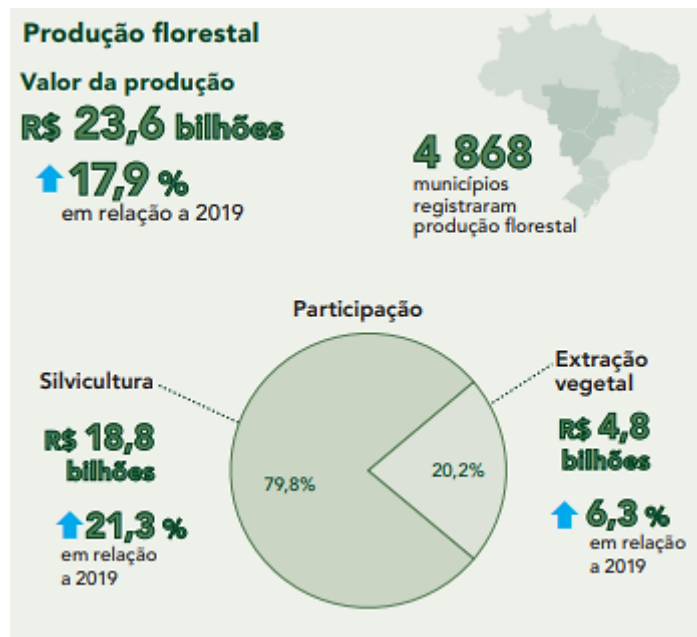
- Vegetais lenhosos – são capazes de produzirem madeira como material de suporte por meio de florestas nativas ou plantadas (IEE USP, 2022);
- Resíduos orgânicos – consistem nos subprodutos de atividades agrícolas, agropecuárias, agroindustriais e urbanas (IEE USP, 2022).

A oferta de biomassa no Brasil tem um potencial enorme devido a extensão do país bem como suas características de cunho tropical, contendo área agricultável extensa, boa incidência solar, clima e agroindústria consolidada. Atualmente, na matriz energética brasileira, o bagaço da cana – vegetal não lenhoso – como principal representante de biomassa empregado para geração de energia renovável. No geral, a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (2017) salienta que as principais fontes de biomassa brasileira utilizadas são os subprodutos dos vegetais lenhosos convertidos na forma de lenha, carvão mineral e, em menor proporção, os pellets de madeira (RANGEL et al., 2018).

No processo de incentivos fiscais ao reflorestamento do Brasil, desde os anos 60 associados aos investimentos do setor industrial, a Silvicultura dedicou-se ao desenvolvimento de povoamento florestal, desempenhando o papel de manejo sustentável de florestas plantadas através da aplicação de estudos prévios soluções naturais ou artificiais, buscando melhor apropriar-se da exploração e manejo de biomassa. De maneira que, um dos acompanhamentos oficiais que tratam do setor florestal com maior atenção consiste na pesquisa *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)*, divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) desde 1986 (CGEE, 2015; IBGE, 2020; IBÁ, 2021).

O PEVS reúne informações referentes a quantidades e valor de produção florestal acumulados dos processos de exploração dos recursos vegetais nativos e plantados. Em 2020, no seu levantamento mais recente, 4.868 municípios brasileiros apontaram produção florestal totalizada num valor de produção R\$23,6 bilhões, 17,9% acrescido em relação a 2019, cujo montante justifica-se pela participação dos segmentos de Extração Vegetal – que produz produtos extrativos lenhosos, alimentícios, ceras, oleaginosos, dentre outros – e da Silvicultura – produzindo artigos de madeira em tora para papel e celulose, e outras finalidades, como lenha, carvão vegetal e produtos extrativos não lenhosos como açaí, erva-mate e castanha-do-pará - ver Figura 10.

*Figura 10 – Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura no Brasil em 2020*



Fonte: IBGE (2020)

#### 4.2.5.1 Lenha

A **lenha**, por sua vez, é considerada a fonte mais antiga de utilização da biomassa através dos processos de queima direta, pela combustão, de pirólise – também chamado de carbonização – que gera o carvão vegetal e, por meio de processamento mecânico de corte, ou trituração da madeira, produzindo toras e cavaco (madeira picada); obtida por meio de florestas nativas, ou de reflorestamento, constituídas de espécies frutíferas, ou exóticas. As lenhas frutíferas compreendem lenhas permitidas por lei para venda originária de quaisquer árvores frutíferas. Já nas áreas reflorestadas ocorre o plantio de mudas de espécies exóticas, como Eucalipto, Pinus, Acácia negra e Teca, e nativas como Araucária, Seringueira e a Paricá (VIDAL; HORA, 2011; SANCHES, 2015; MARAFON, 2016; BARROS, 2021).

De acordo com o Boletim Nacional de Informações Florestais – SNIF 2021 – apresentado pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB) – o valor da produção da silvicultura supera o segmento de extração vegetal desde o ano 2000. Em 2020, a área plantada do Brasil configurou mais de 9,6 milhões de hectares, sendo que 77,3% desse total corresponde a plantações de Eucalipto, 19% nas plantações de Pinus e 3,7% em outras espécies, onde a região Sudeste se consolidou como a maior área de florestas plantadas, tendo o estado de Minas Gerais como líder nacional com 2,1 milhões de hectares (MARAFON, 2016; IBÁ, 2021; IBGE, 2020; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2021).

#### 4.2.5.2 Cavaco de madeira

A biomassa lenhosa aproveitada na forma de **cavacos de madeira** conquistou ao longo dos anos presença significativa na matriz energética brasileira como uma medida alternativa do aproveitamento da lenha com fins energéticos, principalmente, proveniente da silvicultura. Como mencionado anteriormente, a lenha picada, também conhecida como cavaco, ou ainda, estilhas de madeira, obtidas através do corte, picagem ou trituração da madeira com a manutenção de sua forma bruta, resíduos florestais das operações de corte na floresta como cascas, ponteiros, galhos e ramos, assim como, na forma de resíduos industriais oriundos das etapas de beneficiamento de indústrias e serrarias; e do reaproveitamento de madeira previamente descartada (VIDAL; HORA, 2011; POTENCIAL FLORESTAL, 2022).

A capacidade energética do cavaco de madeira, ou seja, do seu poder calorífico, depende essencialmente da sua composição química e umidade. Em indústrias que utilizam como matéria-prima a madeira em forma de cavacos, o conhecimento da umidade é um importante parâmetro de qualidade dos mesmos (AMARAL, 2018). Por isso, os cavacos de madeira ideais ao setor industrial representam aqueles com baixa umidade, logo, quanto mais umidade, demanda-se mais biomassa na geração de energia dentro das câmaras de combustão de caldeiras e fornos. De maneira que, baseando-se nas colocações de Silva (2016), Amaral (2018) e Potencial Florestal (2022), sua classificação é dada da seguinte forma:

- **Tipo 1** – Provém da trituração de galhos, folhas, cascas e copas, e até mesmo, de árvores inteiras cuja composição de diferentes sedimentos da árvore corrobora numa variação de umidade em até 50%; fato que prejudica seu valor no mercado;
- **Tipo 2** – Madeira em dimensões menores, proveniente de resíduos gerados em serrarias. E, apesar de conter umidade variável, numa faixa de 40% a 50%;
- **Tipo 3** – Advém da trituração das partes mais nobres da árvore, toras sem ramos, casca e folhas, passa por um processo de secagem longo, entre 4 e 6 meses, a fim de equalizar sua taxa de umidade abaixo de 30%.

Além disso, Lippel (2014) e Soares (2016) pontuam que a granulometria do cavaco pode influenciar na liberação de energia durante seu processo de queima, tendo em vista que, o tamanho uniforme auxilia no fluxo de alimentação da câmara de combustão por uma previsão mais assertiva da quantidade de biomassa demandada, onde para cenários que apresentem cavacos de dimensões muito grandes, estes atravancam seu fluxo, ocasionando, porventura,

entupimento do sistema de alimentação e, por outro lado, tamanhos bem pequenos são consumidos rapidamente; proporcionando déficit de calor indesejado.

Nesse contexto, o tipo de maquinário e suas respectivas funções de velocidade, ângulo de corte e propriedades das espécies como dureza, teor de umidade e presença de contaminantes, por exemplo, configuram-se muitos dos fatores justificáveis na produção de uma distribuição granulométrica menos homogênea do cavaco de madeira. Em contrapartida, Marques (2010) aponta que as empresas produtoras buscam inovar cada vez mais no processo de produção, com ênfase na mecanização de corte e processamento da biomassa florestal.

A incorporação de tecnologias de mecanização na colheita florestal aprimorou a cadeia produtiva de cavacos no que tange a concentração das principais operações de beneficiamento das árvores em duas situações; durante e pós-colheita florestal. De tal modo que, Marques (2010) engloba a classificação da colheita florestal, proposta por Machado (2006), tipificadas no quadro 5 em sistemas pertencentes aos modelos de produção de cavacos vigentes no Brasil, são eles:

**Quadro 5 – Sistemas de Colheita Florestal**

<b>Sistema</b>	<b>Descrição</b>
Toras curtas ( <i>Cut-to-length</i> )	A árvore é processada no local de derrubada, sendo extraída para margem da estrada, ou pátio temporário em forma de pequenas toras, com menos de seis metros de comprimento, onde são processadas
Toras compridas ( <i>Tree-length</i> )	A árvore é semi-processada por meio das operações de desganhamento e destopamento, ambas no local de sua derrubada, levada para margem da estrada, ou pátio temporário, contendo mais de seis metros de comprimento, onde são processadas
Árvores inteiras ( <i>full-tree</i> )	A árvore é cortada por completo, sem raízes, levada para margem da estrada, ou pátio temporário, onde é processada
Árvores completas ( <i>whole-tree</i> )	A árvore é arrancada com partes de suas raízes e levada para margem da estrada, ou pátio temporário, para processamento
Cavaqueamento ( <i>Chipping</i> )	A árvore é derrubada e processada no próprio local, sendo levada em formas de cavacos para um pátio de estocagem ou diretamente para indústria

Fonte: Morais (2006), Marques (2010), Batista e Abreu (2020), Corradi (2021).

A natureza do sistema de cavaqueamento interfere diretamente no custo final de operação, e na flexibilização operacional de abastecimento das indústrias, no contexto de alocação da produção no campo. Haja vista que, possibilita o transporte da matéria-prima que será utilizada no processo produtivo, sem a necessidade de processamento no pátio da fábrica, como os demais sistemas. Apesar disso, as dimensões dos cavacos dificultam na utilização da capacidade de carga dos veículos para transporte. A densidade do material é baixa exigindo veículos de

transporte com maior capacidade volumétrica para atingir o peso máximo legalmente permitido (MARQUES, 2010; ARAÚJO, 2019; CORRADI, 2021).

Nas condições estudadas por Nascimento (2007), Urbano (2013), Borges (2015), Mascaranhas (2016) e Benetti (2017), o comparativo na utilização do cavaco em detrimento do consumo de lenha para fins energéticos configura uma ótima opção, tanto economicamente, apresentando custo de produção inferior, quanto dos pontos de vista ambiental e consumo energético, devido uma alimentação regrada da demanda de combustão conjuntamente com as dimensões menores de sua própria estrutura física e molecular ainda mais reativa propicia um material com propriedades de queima bem mais eficiente que a tora de lenha; resultando na redução de 15% do consumo de biomassa. No entanto, a eficiência térmica nos fornos apresenta-se sensível à variabilidade de umidade da lenha, podendo apresentar eficiência variável de 30% a 40% na forma de toras, e de 22% a 42%, na forma de cavaco (URBANO, 2013; MASCARANHAS, 2016; MELO; NEGREIROS, 2021).

#### 4.2.5.3 Capim-elefante

Para além das florestas energéticas, as gramíneas forrageiras também figuram dentre os principais tipos de biomassa voltados a demanda energética, tendo em vista a facilidade de cultivo e colheita de suas espécies. Nesse sentido, o capim-elefante é, reconhecidamente, uma das gramíneas forrageiras de mais alto potencial produtivo. A espécie adapta-se muito bem às condições de clima e solo de praticamente todo o Brasil, contendo elevados teores de fibras, e à possibilidade de execução de múltiplos cortes anuais que a reforçam como excelente alternativa de cultivo dedicada à produção de biomassa para fins energéticos (CHIES, 2015; MARAFON et al., 2016).

No entanto, Santos et al. (2015) advertem que o cultivo de gramíneas forrageiras depende de diversos fatores que podem interferir diretamente na sua produção em larga escala. Em específico, no caso do capim-elefante, tem-se uma planta forrageira estacional que entre 70% a 80% de sua produção acontece em época chuvosa e, durante a época seca, sua produção decai devido uma baixa tolerância aos períodos de pouca umidade, sobretudo, contendo uma alta eficiência fotossintética; proporcionando múltiplas colheitas anuais concentradas num curto ciclo de produção de 4 a 6 meses (MARAFON et al., 2016).

Segundo Marafon et al. (2016), Tanabe (2017) e Pedroso (2018), dos poucos, mas, significativos estudos na literatura visam endossar aspectos centrados na viabilidade, otimização do processo de cultivo e manejo da produção, melhoria genética e fertilização através de análises de capacidade, variabilidade de cultura de diferentes espécies, química

molecular e poder calorífico, por exemplo. Além disso, algumas pesquisas concentram-se na análise econômica, custo de produção e custo final da energia final produzida diretamente correlacionadas ao impacto socioeconômico nas regiões que já o utilizam, assim como, de implantação para futuras localidades.

Os estudos de Santos et al. (2011), Santos (2013) e Santos et al. (2015) evidenciam o capim-elefante como biomassa alternativa para produção no Polo Gesseiro do Araripe, fornecendo energia térmica no processo de calcinação da gipsita. Porém, para que a adesão dessa nova cultura em larga escala seja assimilada na região, o fomento de pesquisas quanto ao equilíbrio dos níveis de inserção de água e nutrientes a planta seja pautado no déficit nutricional do solo. Nesse contexto, os autores supracitados expõem que a acidez no solo da Chapada do Araripe limita o estabelecimento da produção do capim-elefante provém da presença tóxica de Alumínio e baixíssimas concentrações de Manganês (Mg), Cálcio (Ca) e Fósforo (P).

Para atingir níveis de produtividade satisfatórios, Santos (2011), De Andrade et al. (2016) e Melo e Negreiros (2021) citam a necessidade da prática de *gessagem* como tratamento, utilizando-se do gesso aplicado para corrigir a acidez do solo, a fim de equalizar as concentrações de *Mg*, *Ca* e *P*. Desta forma, Andrade et al. (2016) pontua que o uso do gesso produzido na própria região do Araripe pode potencializar o crescimento da biomassa, podendo corroborar num ciclo de manejo do capim-elefante aproveitado como fonte energética durante o beneficiamento da gipsita do próprio Polo, onde em testes emulando o ritmo do processo de calcinação, que após 1,5 h abastecendo o forno na proporção de 360 kg de capim, é possível produzir 264 kg de gesso (SANTOS; NEGREIROS, 2021).

#### **4.2.6 Energia solar**

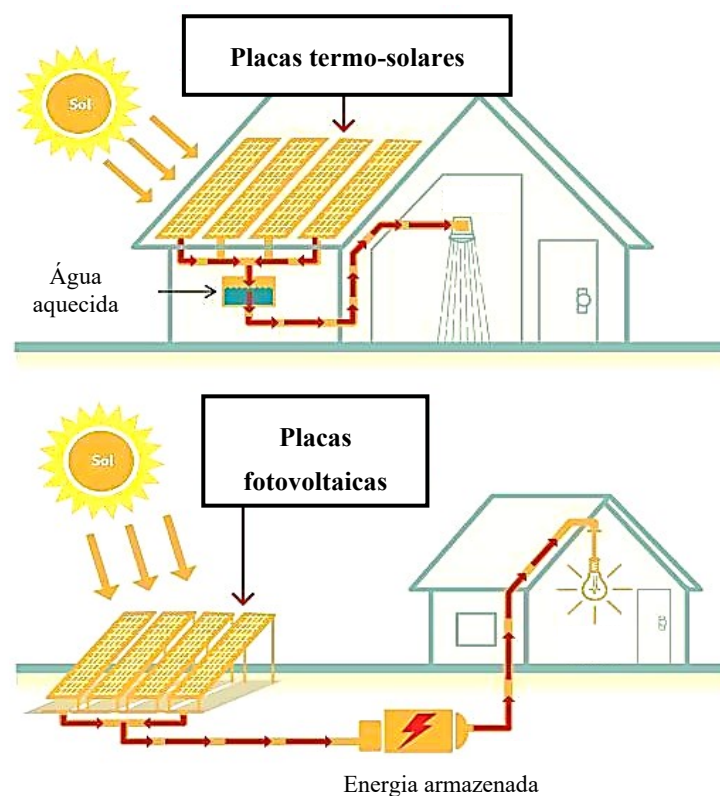
Empresa de Pesquisa Energética (2022) define a energia solar como uma fonte de energia primária inesgotável proveniente da radiação solar que pode ser aproveitada nas formas de luz, ou de calor dos raios solares, por meio da aplicação de tecnologias utilizadas para convertê-la em energia. O sol produz energia através do fenômeno chamado de fusão nuclear. De acordo com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) (2015), uma fusão nuclear ocorre quando dois núcleos de átomos se combinam, formando um único núcleo mais leve que a soma das massas dos núcleos iniciais. Isso porque durante a reação parte da massa perdida se converte em energia.

O sol pode ser considerado um reator à fusão nuclear operando a cerca de 100.000.000 a uma distância média da Terra de aproximadamente 150.000.000 km (GUERRA; YOUSSEF, 2011). De modo geral, mesmo que parte da energia solar se disperse no caminho do espaço até

a Terra, a grandiosidade do potencial energético solar é percebida quando a alta atmosfera terrestre recebe uma exposição média de 174 petawatts (PW), equivalente  $10^{15}$  watts, dos quais, aproximadamente, somente 30% são refletidos ao espaço. Apesar disso, NeoSolar (2022) aponta que diversos fatores devem ser considerados à medida que se procura explorá-la enquanto alternativa energética, especialmente, a localização geográfica onde se prospecta instalar sistemas de captação da energia do sol; visto que existe uma incidência desigual dos raios solares por todas as regiões do planeta.

Para o aproveitamento da energia da radiação solar existem diferentes tecnologias de conversão voltadas para finalidades distintas classificadas – segundo Portal Solar (2022) – em três tipos de energia solar: fotovoltaica, térmica e heliotérmica. Na figura 12, EcoDebate (2014) ilustra, para fins didáticos, os sistemas de geração de energia solar térmica e fotovoltaica.

*Figura 11 – Sistemas de geração de energia solar térmica e fotovoltaica*



*Fonte: Adaptado de EcoDebate (2014).*

No esquema de funcionamento dos sistemas de **energia solar térmica** se beneficiam do solar para aquecer líquidos – água ou óleo –, por meio de equipamentos concentradores da radiação solar. De acordo com Rosa (2021), o calor captado ferve esse líquido, se transformando em vapor que gira uma turbina responsável por abastecer geradores; assim, produzindo eletricidade. Guerra e Youssef (2011), Almeida et al. (2015), Rosa (2021) e Portal



Solar (2022) caracterizam os sistemas de **energia solar fotovoltaica** por se utilizarem painéis, ou placas solares, compostos por células fotovoltaicas feitas a partir de materiais – como silício – produzem o efeito fotovoltaico de captação de partículas de energia presentes na luz solar – fótons – para geração de eletricidade diretamente.

Além disso, o funcionamento de um sistema de energia solar fotovoltaico pode funcionar de três formas, instalando o sistema conectado à rede elétrica (*on-grid*), isolado ou autônomo (*off-grid*) e, por fim, híbrido. A **energia heliotérmica** – ou energia termossolar – é produzida através de um sistema de espelhos refletores parabólicos para concentrar radiação solar numa região de tubos na qual um fluido termal é superaquecido para produção de vapor. O vapor é, então, utilizado geralmente em turbinas que geram energia elétrica (GUERRA; YOUSSEF, 2011; NEOSOLAR, 2022)

A energia solar é considerada uma das fontes renováveis dotada de um enorme impacto benéfico destacado por se tratar de uma energia limpa, de instalação e manutenção simples e longa vida útil, onde a poluição proveniente da fabricação dos equipamentos necessários para a construção dos painéis solares é controlável. Além disso, a energia solar gera uma economia de até 95% no gasto total com energia elétrica (IFUSP, 2015; SANCHES, 2015; INTELBRAS, 2021; ECYCLE, 2022).

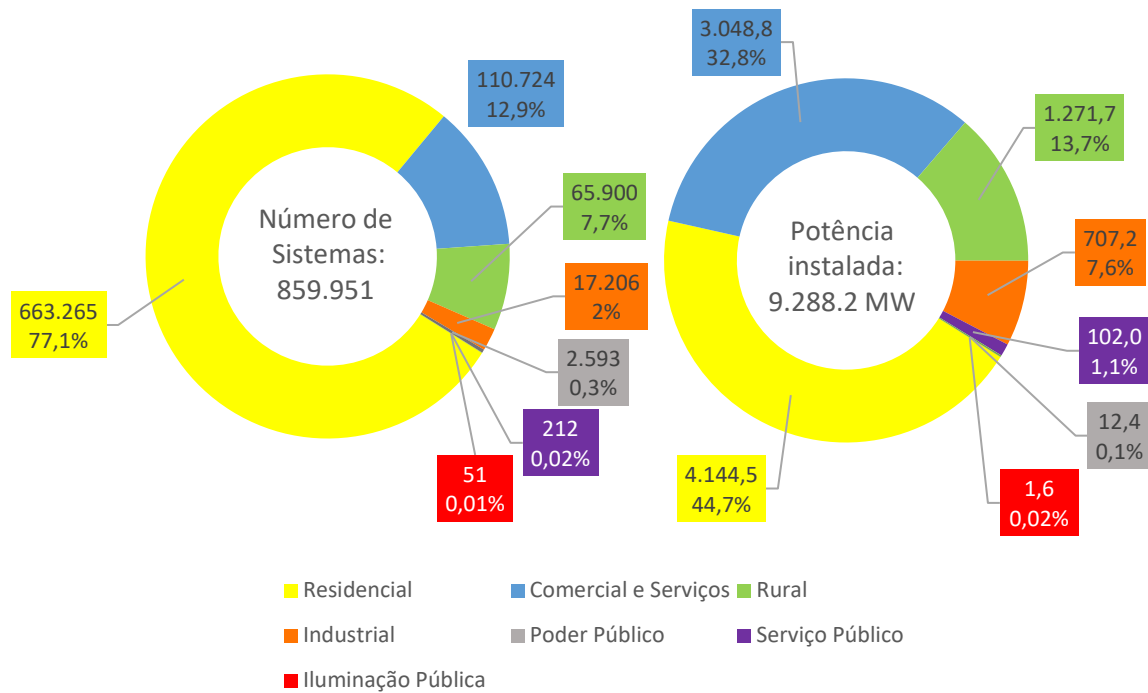
No entanto, a instalação dos painéis requer grandes espaços, assim como, existem variações diárias de produção de energia sujeitas as condições atmosféricas como chuvas, quedas de temperatura e níveis de nebulosidade; de modo que, força a existência de meios de armazenamento da energia produzida durante o dia em locais onde os painéis solares não estejam ligados à rede de transmissão de energia (IFUSP, 2015; SANCHES, 2015; ECYCLE, 2022).

De acordo com Intelbras (2021), no Brasil, o mercado da energia fotovoltaica desde 2012 expandiu significativamente, acumulando em torno de 13 bilhões reais de investimentos até 2020, motivado pelo retorno econômico, em média, de 5 a 6 anos, num cenário em que se estima 25 anos de vida útil dos painéis solares. Em paralelo, os benefícios provenientes do sistema de créditos, para pessoas físicas e jurídicas, contribuem para sua aderência como uma alternativa vantajosa em contornar o impacto negativo da energia elétrica, associado a variabilidade das bandeiras tarifárias.

De acordo com Brasil (2022b), no sistema de Geração Distribuída (GD) – onde a energia elétrica gerada junto às instalações de consumidores – cresceu 316% entre 2020 e 2021, chegando a 8.550 MW, ao final desse período. E, mesmo antes de finalizar o primeiro trimestre de 2022, o mapeamento realizado pela Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica (ABSOLAR) destacou a marca de mais de 14 gigawatts (GW) de potência operantes em todo

território, incluindo GC (produzida em usinas solares) e GD, onde 99,9% de todas as conexões microgeração e mineração de sistemas GD instaladas em residências, comércios, industriais, propriedades rurais e prédios públicos são provenientes da fonte solar fotovoltaica – totalizando 859.951 sistemas solares.

**Gráfico 4** – Geração distribuída de energia solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo



Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2022).

No gráfico 4 observa-se que os sistemas GD divididos por classes de consumo demonstram uma alta assimilação por uso residencial (77,1%), responsável por 44,7% de toda potência instalada, seguida por aplicações menos expressivas dos setores comercial e serviços (12,9%) e rural (7,7%). E, ainda menos representativa, no quarto lugar, cerca de 17,2 mil sistemas produzem 707,2 MW suprindo as demandas do setor industrial.

Segundo Solstar (2021), a tendência é que esses dados evoluam positivamente nos próximos anos, seja na geração de energia, ou, aquisição de tecnologias, dentre os incentivos propostos, o governo brasileiro vem incentivando a adesão pela energia solar fotovoltaica por intermédio da isenção de ICMS (Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), PIS (Programa de Integração Social) e Confins (Contribuição para o financiamento da Seguridade Social) aderida por todos os estados entre 2019 e 2021.

Além disso, Alba (2021) e Brasil MME (2022c) pontuam que o Governo Federal sancionou a lei 14.300/22, que institui o marco legal das micro e minigeração de energia, propiciando acesso ao consumidor às redes para sistemas de GD com necessária segurança

jurídica e regulatória, incluindo a alocação de custos da rede e dos encargos previstos do Setor Elétrico. Ao passo que, outra parte dos incentivos advém dos setores privados, como por exemplo, de linhas especiais de crédito para financiamento de equipamentos ou da construção de usinas.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Partindo-se dos elementos primários de estruturação de uma abordagem multicritério, a delimitação do conjunto de alternativas de avaliação constitui uma etapa imprescindível para aplicação do método PROMETHEE-ROC. Nesse sentido, para o contexto singular do APL gesseiro de Pernambuco, a seleção das alternativas baseia-se na possibilidade de inserção de energias verdes no atendimento a demanda térmica do processo de calcinação executados nas plantas industriais. De modo que, buscou-se na literatura vigente análises compreendendo as relações promissoras de desempenho das energias renováveis.

Como também, visando conferir robustez ao estudo, foram incluídas as fontes energéticas já vigentes, na tentativa de propiciar uma análise multicritério comparativa dos insumos renováveis e não-renováveis. Posto isto, como resultado, a revisão bibliográfica denotada neste capítulo abordou a composição e diversidade da matriz energética brasileira, tanto em fontes energéticas renováveis e não-renováveis em virtude das características geomorfológicas e climáticas únicas do território nacional. De maneira que, em segundo momento, aprofundou-se na identificação das dimensões logísticas, ambientais, geográficas, logísticas e políticas em torno das energias favoráveis e disponíveis conforme à realidade do APL.

Desta forma, considerou-se um conjunto de oito alternativas, são elas: Óleo diesel; Coque de Petróleo, Óleo BPF; Gás Natural; Lenha; Lenha picada; Capim-elefante e; Energia Solar. Cabendo salientar que, de modo geral, todos os insumos considerados apresentaram complicadores, pelo menos, sobre alguma dimensão, quer seja de cunho ambiental, logístico, de produção, ou, social, que questionam suas operações no Polo; especialmente, os insumos Capim-elefante, GN e a Energia Solar devido a literatura vigente julgar, cada qual sua maneira, suas participações promissoras a médio e longo prazo como expoentes de mudança da transição energética para fontes menos poluentes.

## 5 POTENCIAIS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA A MATRIZ ENERGÉTICA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE GESSO

Nesta seção será desenvolvida uma caracterização dos critérios pertinentes no julgamento das fontes energéticas, tomando por base a contextualização do objeto de estudo cujos trabalhos, documentos e demais registros considerados apresentaram dados e informações acerca da cadeia produtiva do gesso, e sua respectiva matriz energética. Visando, dessa forma, elencar os critérios de avaliação das alternativas fontes energéticas na composição da matriz energética do APL de Gesso pernambucano a serem aplicados no método PROMETHEE-ROC.

### 5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESCOLHA DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Inicialmente, o processo de seleção da literatura relevante deu-se através da escolha por documentos contendo palavras-chave, e suas respectivas combinações, quanto as temáticas de *Cadeia produtiva do gesso*, *Calcinação gipsita*, *Setor de mineração*, *Matrizes energéticas* e *APL de gesso Pernambucano*. De modo que, a partir da consulta de 3 bases científicas, 330 documentos foram selecionados. Logo, em conformidade com os escritos relevantes com a realidade de transição energética do Polo gesseiro de Pernambuco, houve uma triagem das obras relevantes. Sendo que alguns (15) documentos foram desconsiderados da amostra por serem duplicados, ao passo que, para os restantes, sucedeu-se a leitura dos títulos, resumos e conclusões quando identificados como relevantes no apontamento de métricas de avaliação condizentes ao estudo.

Como resultado, reduziu-se significativamente o quantitativo de trabalhos com a retirada daqueles que abordavam a temática da pesquisa sobre outras perspectivas como caracterização química, mineralógica e mecânica da gipsita, ou gesso calcinado, assim como, granulometria, influência da relação de temperatura e perdas de calor associadas ao *design* nos fornos, potenciais aplicabilidades do gesso calcinado, ou reciclado, na construção civil e indústrias e, também, adição de ligantes, retardantes e rejeitos de biomassa visando potencializar suas características. No fim, (2) referências mantiveram-se pertinentes, conforme o quadro 6, frisando preceitos em suas respectivas abordagens metodológicas traduzidos em 10 critérios de avaliação.

**Quadro 6 – Relação de critérios observados por referência bibliográfica**

CRITÉRIOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	Custo total	Manutenção	Vida útil dos forms	Capacidade produtiva	Consumo da fonte energética	Eficiência térmica	Disponibilidade	Impacto Ambiental	Impacto Social	Políticas e incentivos
1	x	x					x	x	x	
2	x						x	x	x	
3		x	x	x		x	x	x	x	
4	x		x		x	x	x	x	x	
5				x	x	x		x		
6				x	x			x		
7	x	x	x	x	x		x	x		
8				x	x			x	x	
9	x	x						x		
10							x	x		
11				x	x	x	x			
12	x								x	
13	x	x	x		x			x		
14	x			x	x	x	x	x		
15	x	x	x	x	x	x	x	x		
16	x						x	x	x	
17	x	x		x		x		x		
18	x	x	x	x	x	x		x		
19	x	x		x	x		x	x		x
20					x	x	x	x		
21				x	x		x			
22	x	x	x	x	x	x	x	x		
23	x	x		x	x	x	x	x		
24	x			x	x	x	x	x		
25	x			x			x	x		
26	x			x	x			x	x	
27	x			x	x		x	x		
28	x						x	x	x	
29										x
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>										
(1) Abreu et al. (2019)			(10) Da Silva et al. (2016)			(19) Oliveira e Shinohara (2014)				
(2) Araújo (2010)			(11) Esence et al. (2020)			(20) Ortiz et al. (2022)				
(3) Araújo e Martins (2012)			(12) Estévez et al. (2021)			(21) Santos et at. (2015)				
(4) Bajay (2010)			(13) França (2016)			(22) Santos e Mendes (2018)				
(5) Benachour et al. (2004)			(14) Gadelha et al. (2012)			(23) Silva (2009)				
(6) Campello (2013)			(15) Henriques Jr. (2013)			(24) Tanabe (2017)				
(7) Campos et al. (2018)			(16) Karvonen et al. (2017)			(25) Tomatis (2020)				
(8) Cavalcanti et al. (2011)			(17) Lira e Anjos (2009)			(26) Theodosiou et al. (2015)				
(9) Costa (2012)			(18) Mascaranhas (2016)			(27) Tregambi et al. (2018)				
						(28) Walker et al. (2015)				
						(29) Brasil (2021)				

Fonte: O autor (2022)

De acordo com os critérios percebidos na literatura considerada, notou-se que o desenvolvimento de projetos de transição energética requer abordagens metodológicas capazes analisar sua factibilidade perante aspectos operacionais, financeiros, ambientais e sociais incorporados por alguns autores em abordagens MCDA, e outros no comparativo de performances de novas configurações de plantas de calcinação entre fontes energéticas propostas e em vigor. Notou-se também, que a literatura engloba diversos objetos de estudo, ou seja, determinados escritos, de fato, discorrem dentro da realidade do Polo gesseiro pernambucano e os demais, em outras regiões do Brasil (Zona Norte do estado do Rio de Janeiro) e países (Finlândia).

Numa visão geral dos conteúdos tratados na literatura, há a presença de critérios implícitos e explícitos avaliando as potencialidades do uso do *gás natural* nos fornos de calcinação rotativo de contato direto do gás com a gipsita por Benachour et al. (2004) e Cavalcanti et al. (2011), em turbina com recuperação de calor ao forno por Costa (2012).

Como também, nos estudos da inserção de *fontes de biomassa* no Polo representadas pelo Eucalipto e a gramínea Capim-elefante. Na primeira, volta-se para aquisição de conhecimentos operacionais das rotações de culturas das espécies de clones de *Eucalipto* para atender a demanda do Polo, por Silva (2009), Gadelha (2012) e Da Costa et al. (2016), ao passo que, Santos et al. (2015) e Tanabe (2017) investigam a viabilidade do capim-elefante testada em duas espécies, divididas em dois cenários; (não) enriquecidas com nutrientes do gesso calcinado.

Em trabalhos mais recentes, parâmetros de avaliação percebidos buscam direcionar seus esforços nas possibilidades de sistemas de calcinação indireta no forno movido à *energia solar* por Ortiz et al. (2022), também como, diferentes configurações de tecnologia solar, desde o sistema de calcinação híbrido, dividido com outras fontes, até o sistema de calcinação solar completo abordados em Santos e Mendes (2018) e Tomatis et al. (2020); tecnologia de reator piloto de leito fluidizado projetado para trocas e recuperação de calor com o forno por Esence et al. (2020), ou, na forma de reator de leito fluidizado diretamente irradiado, por Tregambi et al. (2018).

Por outro lado, alguns trabalhos versaram no tratamento dos combustíveis fósseis já consumidos dentro da matriz energética do APL gesseiro pernambucano, no intuito de contribuir com lacunas presentes na literatura. A saber, Araújo (2010) assumiu um caráter analítico generalista abordando os principais gargalos, condicionantes e os impactos sobre a economia do Polo diretamente correlacionados à formação da matriz energética pela lenha, *Óleo BPF* e o *CVP*. Já Campello (2013) examina o comportamento da calcinação nos fornos suportado pela *lenha em toras*, e Mascaranhas (2016) promove um comparativo de

performances dos fornos considerando o *cavaco*, dentro das condições de volume e ritmo de produção, em relação à *lenha em toras*. De forma similar, França (2016) estudou a calcinação demandada pela utilização do *CVP* comparada à *lenha*.

Araújo e Martins (2012), Henriques Junior (2013), Campos et al. (2018) e Lira e Anjos (2019) focam na caracterização dos tipos de fornos de calcinação, ressaltando a correlação de suas performances no beneficiamento da gipsita atrelada às fontes energéticas já consumíveis no Polo por meio de parâmetros de desempenho tecnológico e operacional. E, por último, os demais trabalhos propuseram analisar os impactos da participação das fontes em matrizes energéticas através de parâmetros-chave, onde devido à natureza de multiparâmetros, utilizam diferentes abordagens MCDA.

Theodosiou et al. (2015) enfatizaram a adesão necessária dos aspectos ambientais na fase preliminar de projetos de sistemas de energia conjuntamente com outros parâmetros. Ao passo que, Karvonen et al. (2017) discutem a sustentabilidade do uso de biomassa florestal pela perspectiva da silvicultura finlandesa, Abreu et al. (2019) considera parâmetros interdependentes na viabilidade de energias verdes na matriz energética do estado do Rio de Janeiro. Por fim, Estévez et al. (2020) recorre a revisão da literatura como procedimento de análise das tendências de pesquisa, lacunas e implicações das abordagens MCDA no planejamento de projetos de energia.

No quadro 6, cabe-se tecer comentários sobre cada um dos critérios de avaliação explicitados. Nesse sentido, 20 escritos consideraram o critério *Custo total (C1)*, justificando o somatório de todos os investimentos fixos e variáveis para adesão do tipo de fonte energética à planta de calcinação, no que compete a sua viabilidade econômica, mencionada por Abreu et al. (2019), o custo geral de capital e os custos operacionais gerais descritos por Theodosiou et al. (2015), Karvonen et al. (2017) e Walker et al. (2020).

Assim como, Araújo (2010), Campello (2013), França (2016) e Mascaranhas (2016) mencionaram que a oscilação da política de preços dos combustíveis derivados do petróleo influencia as calcinadoras transitarem entre o Óleo diesel e o *CVP*, isolando, dessa forma, cada vez mais, a lenha em toras como opção primária de melhor custo-benefício. Os efeitos dessa instabilidade atingem igualmente o GN, limitando seus investimentos dentro do Polo, de acordo com Costa (2012) e Oliveira (2014), em contraponto, Silva (2009) e Tanabe (2017) estimaram que os custos de implantação das espécies de Eucalipto e Capim-elefante por hectare apesar de apresentarem valores consideráveis, conseguem ser diluídos ao longo das rotações de cultura. Por fim, alguns trabalhos frisam que a validade de financiamento na concepção, tecnologias e modernização dos fornos como meio de atenuar os custos de produção.

No critério *Manutenção (C2)*, por exemplo, Henriques Júnior (2013) o considera um fator intrínseco a ser custeado dentro da elaboração de projetos de energia, por outra perspectiva, Costa (2012), reconhece que o trabalho de manutenção preditiva ao sistema – turbina e forno – é essencial para melhorar a performance do forno de calcinação exigindo até 23% de consumo de energia a menos. Já Campos et al. (2018) aponta que o uso dos fornos exige manutenção gradativa dependendo do tipo de fonte, uma vez que, os combustíveis fósseis se mostram mais nocivos para estrutura física do forno.

Portanto, Araújo e Martins (2012), Henriques Junior (2013), Campos et al. (2018) e Lira e Anjos (2019) salientam a correlação dos fatores manutenção *versus* uso do forno dependente do tipo de fonte, fundamentando assim, a importância do critério *Vida útil dos fornos (C3)*. França (2016) explica que os gases de combustão oriundos da reação exotérmica como o CVP para cozimento da gipsita, contêm níveis de moléculas de dióxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>), que quando combinadas com os vapores d'água, também produtos da reação, produz compostos capazes de catalisar a corrosão das superfícies metálicas do forno; contribuindo por uma vida útil menor do equipamento.

Em contraste, o mesmo não acontece para as energias verdes, onde Benachour et al. (2004), Cavalcanti et al. (2011) e Oliveira e Shinohara (2014) um consumo 'mais limpo' por parte do GN, assim como, a combustão menos agressiva das fontes de biomassa descritas por Santos et al. (2015), Costa et al. (2016) e Tanabe (2017). E, a energia solar, cujas as configurações das plantas de calcinação buscam proporcionar troca térmica com fornos reduzindo a emissão de gases de combustão, segundo Tomatis et al. (2020), Esence et al. (2022) e Ortiz et al. (2022).

O critério *Capacidade produtiva (C4)* revela-se um parâmetro quantitativo pautado no volume de gesso gerado ao longo tempo com a finalidade de estimar o quantitativo do produto final obtido no beneficiamento da gipsita. De acordo com os escritos, partindo-se da capacidade máxima de produção sob condições ótimas de temperatura, a real capacidade produtiva decorrerá do comportamento numa proporção de menor consumo da fonte através de uma eficiente troca térmica.

Nesse contexto, os trabalhos de Benachour et al. (2004), Cavalcanti et al. (2011) e Costa (2012), no uso do GN em fornos piloto de calcinação de contato direto com o gesso calcinado, tem-se volume de processamento em relação a lenha e demais combustíveis fósseis. Ao passo que, a energia solar tratada por sistemas solares configurados em reatores de leito fluidizado irradiado por Tregambi et al. (2018), e calcinação indireta, nos trabalhos de Esence et al. (2020), Tomatis et al. (2020) e Ortiz et al. (2022), ambas retornam volumes de produção consideráveis.



Pela ótica de performance operacional, a literatura destacou o *critério Consumo da fonte energética (C5)* enquanto métrica quantitativa no intento de mensurar o volume de matéria-prima necessária à queima nos fornos por tonelada de minério. Logo, os resultados encontrados revelam que as proporções de consumo favorecem as energias renováveis em detrimento as não renováveis. A citar, França (2016) registrou um consumo do CVP consideravelmente menor que a lenha devido ao seu poder calorífico maior de 30MJ/kg contra 19 MJ/kg da lenha.

Para os clones de eucaliptos, Gadelha et al. (2012) observou na calcinação uma demanda energética na forma de toras entre 0,10 m<sup>3</sup>/t a 0,16 m<sup>3</sup>/t de gesso produzida, enquanto que, na forma de cavaco, tem-se consumos variando de 0,08 m<sup>3</sup>/t a 0,11 m<sup>3</sup>/t de gesso. De modo que, ambos ainda figuram resultados melhores da lenha nativa da região do Araripe, que necessita de 0,16 m<sup>3</sup>/t de gesso produzido.

No entanto, no comparativo de biomassas para fornecimento de energia, Tanabe (2017) aponta a vantagem de potencial energético da gramínea capim-elefante (250 kcal/t de biomassa seca) se sobrepõe ao Eucalipto (164,5 kcal/t de biomassa seca). Por último, no comparativo da lenha nativa e de manejo florestal no Polo, sua utilização na forma de cavaco apresenta um consumo mais homogêneo devido a diminuição da área de queima comparada à forma de tora; gerando uma economia de 15%.

Para os trabalhos que dissertam acerca do parâmetro *Eficiência térmica (C6)*, o consideram um dos indicadores determinantes à viabilidade operacional do processo de calcinação. Nesse sentido, as fontes de biomassa na forma de lenha picada (cavaco), solar e GN se sobressaem por ofertarem troca térmica mais uniforme junto ao forno pelo consumo homogêneo. De acordo com Lira e Anjos (2009), a concepção dos fornos – aquecimento direto e indireto – consiste numa variável atrelada à eficiência térmica cujos fornos de chama indireta são considerados mais eficientes, exigindo menos temperatura e uma distribuição de temperatura mais uniforme.

No critério *Disponibilidade (C7)*, Araújo (2010) explana tal fator pelo viés logístico de acessibilidade das fontes de energia não produzidas diretamente na região que necessitam percorrer longas distâncias vindas de cidades-satélites e capitais até o Polo cujo modal rodoviário ainda se mostra como única possibilidade concreta para transporte, até mesmo dos combustíveis fósseis já utilizados nos fornos, como Óleo BPF, CVP e o Óleo diesel. Nesse sentido, Campello (2013) afirma que lenha extraída da Caatinga na região não consegue atender exclusivamente a demanda térmica das plantas de calcinação a longo prazo, mesmo que ocupe maior parcela na matriz energética do APL.

De acordo com trabalhos, a questão do uso dominante da lenha reside na sua viabilidade econômica, cultura regional e disponibilidade mais acessível do que as demandas fontes

energéticas. Ainda por Campello (2013), um escrito de pouco menos de uma década, o mesmo estimou que num cenário de monopólio da lenha nativa, seriam necessários 2.000 ha/ano de vegetação em plano de manejo sustentável com rotações de 10 a 15 anos. Por isso, os escritos ressaltaram alternativas energéticas questionando os esforços necessários para determinar sua segurança energética, ou seja, a oferta acessível dessas fontes a longo prazo.

Para as fontes de biomassa, Santos et al. (2015) demonstra por análise de dados de produção de matéria seca, as potencialidades promissoras do Capim-elefante para uso em fornos, principalmente, quando o gesso mineral é aplicado em seu cultivo para melhorar sua qualidade nos quesitos de aumento da produção de biomassa, com baixo teor de umidade e poder calorífico mais acentuado; podendo ofertar cerca de 580.990 MJ/ha. Da Costa et al. (2016) denota que a produção de clones de eucalipto na região também se apresenta como uma opção igualmente viável, no entanto, sua disponibilidade é afetada pela sazonalidade climática das chuvas concentradas num período semestral entre novembro e maio.

Além disso, no comparativo entre as duas biomassas, Tanabe (2017) expõe os benefícios do Capim-elefante em relação ao Eucalipto, possuindo uma disponibilidade anual de matéria seca por hectare (80 t/ha) maior do que o Eucalipto (60 t/ha), além disto, ocupa menor área de cultivo, menor ciclo produtivo, como também, assimila carbono do meio ambiente. Enquanto nos escritos referentes a energia solar, em maioria, os autores direcionam a disponibilidade da fonte dependente de grandes áreas para infraestrutura de captação, principalmente com instalação de heliostatos e placas solares e, mesmo assim, Esence et al. (2020) alerta que sua disponibilidade dependeria dos níveis de radiação solar.

Ademais, mediante os estudos dos projetos de sistemas solares que poderiam ser integrados no processo produtivo do Polo, Santos e Mendes (2018) assumem uma visão pessimista, onde conjuntamente com critérios de viabilidade econômica, tecnológica, impactos ambientais e sociais não recomenda sua implantação com recursos disponíveis, uma vez que, ausência de capital humano qualificado em tecnologia solar estaria distante da região do Araripe, assim como, o possível retorno de investimentos demoraria quase 10 anos.

Por fim, por Oliveira e Shinohara (2014), a disponibilidade do GN depende em investimentos comprometidos com infraestrutura local de recebimento e armazenamento de grandes volumes de combustível, principalmente, apostando em políticas de desenvolvimento entre o Governo do Estado, Copergás e os empresários que promovam uma malha dutoviária ligando os extremos do estado de Pernambuco, alocando um gasoduto no Polo capaz de praticar preços de deslocamento menores que incentivariam sua assimilação pelas indústrias locais.

Os autores interpretam a visão da sustentabilidade por meio de análises do desempenho das fontes energéticas já existentes comparadas entre si, ou, com as alternativas energéticas em

potencial pelo parâmetro *Impacto ambiental (C8)*. De maneira que, independentemente das metodologias, as premissas dos escritos voltados ao APL gesseiro de Pernambuco são oriundas da preocupação com o efeito da desertificação na região devido a exploração predatória da vegetação nativa proveniente dos solos desprotegidos de cobertura vegetal. Assim, os objetivos dos escritos procuram validar alternativas energéticas menos nocivas, e, concomitantemente, as viabilidades técnico-econômicas capazes de ampliar a diversificação de energias renováveis na matriz energética do Polo.

No critério *Impacto social (C9)*, determinados escritos conferem as reações e percepção humana mediante os efeitos da fonte energética e, conseqüentemente, suas implicações, viabilidades e iterações com meio como uma dimensão de desempenho a ser valorada no contexto de análise multicritério; perpassando pela aceitação pública e segurança energética e socioeconômica, segundo Walker et al. (2020). No trabalho direcionado para revisão da literatura quanto ao uso critério C9, Estevéz et al. (2020) aponta que dentro de projetos energia de diferentes abordagens MCDA presentes na literatura, a dimensão impacto social se desmembra em indicadores como aceitação social, desenvolvimento social, impacto na saúde, conhecimento e conscientização, valor cultural e justiça social; aparecendo ao menos um deles em 59% das vezes.

O último fator captado dos escritos diz respeito ao grau de *Políticas públicas e incentivos fiscais (C10)* percebidos como projetos, leis, parcerias e demais ações fundamentadas com a presença de atores das diferentes esferas públicas para facilitação de inserção, ou expansão de determinado insumo energético ao Polo. Nesse contexto, examina-se somente dois escritos, Oliveira e Shinohara (2014), onde os autores descrevem incentivos integrados entre representantes do APL, governo do Estado e a Corpergás, no intuito de promover estudos de viabilidade logística e econômica da introdução do GN, e a lei federal 14.300/22, responsável por impulsionar concorrência participação da energia solar fotovoltaica no Brasil, ao estabelecer do marco legal para sistemas de micro e minigeração distribuída.

## 5.2 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Diante do exposto no capítulo, com base na literatura vigente, procurou-se por meio de uma revisão bibliográfica evidenciar a presença de parâmetros de avaliação existentes, sugeridos, ou utilizados, para análises acerca da performance de fontes energéticas perante indicadores de dimensões ambiental, social, econômica e de produção. De modo que, a abrangência das citações pertinentes ao estudo incluiu, inclusive, escritos contendo abordagens temáticas alheias à calcinação nos fornos; discutindo os aspectos tecnológico, ambiental,

econômico e social como áreas-chave que necessitariam ser devidamente consideradas como parâmetros de análise durante o planejamento de sistemas energéticos; destacados em Karvonen et al. (2017), Abreu et al. (2019) e Walker et al. (2020). Ao passo que, outros registros dissertam assumindo o contexto do Polo gessoso pernambucano e outros objetos de estudo de âmbitos nacional e internacional.

Ainda assim, o retorno das pesquisas nas bases acadêmicas consultadas evidenciou que as temáticas simbolizadas pelas palavras-chave apontaram, em grande sua maioria, estudos orientados para outras finalidades como análises das propriedades físico-químicas da gipsita, logística reversa e demais aplicações do gesso na construção civil e afins etc., design de fornos e seu comportamento misturado com outros materiais como rejeitos de biomassa. De tal modo que, o subconjunto de poucos registros relevantes restantes, conforme disposto no quadro 6, fora examinado para determinação dos critérios de avaliação.

Posto isto, para além do rateio dos dez critérios designados por autor, explanou-se comentários individualmente no intuito de fundamentar as diferentes perspectivas de julgamento, e por conseguinte, desdobramentos positivos e negativos extraídos da relação entre as fontes energéticas e as plantas de beneficiamento da gipsita, ou, renovação de matrizes energéticas regionais calcadas nas possibilidades de inserção de energias verdes. Dessa forma, de modo geral, notou-se que a utilização de um determinado insumo energético se desdobra, contemplando, por um lado, os critérios C4, C5 e C6 de dimensão tecnológica que expressam a performance do tipo de energético nas relações de capacidade, consumo e eficiência térmica durante o processo de calcinação restrito ao forno.

Paralelamente, tomando por base os fornos, alguns autores englobaram questões referentes as análises estruturais e aos esforços de manutenibilidade das plantas industriais, representados nos critérios C2 e C3. À medida que, pela perspectiva econômica fortemente citada, especula-se a diversidade de custos envolvendo desde os investimentos dos projetos de sistemas de energia de implantação, ou modernização da planta industrial até a compra do insumo que totalizados foram representados por C1.

Na tratativa de diminuir o impacto das condições adversas geradas pelos problemas ambientais quanto ao uso das energias não renováveis e biomassa sem manejo ambiental, em sua maioria, os escritos justificam seus objetivos de estudo; sendo observados, em menor proporção, os impactos de ordem social e ações públicas restritamente ressaltado por alguns autores. Nesse sentido, cabe-se evidenciar que além da carência literária perceptível, raramente os escritos integram grande parte dos parâmetros de dimensões tecnológicas, ambientais, econômicas e sociais, do contrário, não se percebe uma tendência de um subconjunto de critérios pré-determinados independentemente da natureza do estudo trabalhados pelos autores.

## 6 AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA A MATRIZ ENERGÉTICA SOB A PERSPECTIVA DA INDÚSTRIA DE MANUFATURA DE GESSO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos com o uso método multicritério PROMETHEE-ROC no contexto do APL gesso de Pernambuco. Para tanto, de início, coube-se na seção 6.1 minuciar a caracterização do universo da pesquisa, detalhando o especialista e a empresa locais. Na seção 6.2, obtêm-se os dados sobre os critérios e as alternativas de avaliação concentrados na matriz de consequências por aplicação de questionário. Em seguida, na seção 6.3, é apresentado os resultados encontrados, e na seção 6.4, as análises e discussões cabíveis. E, no final, a seção 6.5 sintetiza as discussões sobre os resultados identificados.

### 6.1 APRESENTAÇÃO DO PERFIL DO RESPONDENTE E DA EMPRESA

A figura do especialista compreende uma profissional formada em Engenharia Química, Mestre em Engenharia de Produção, atuante há 32 anos. Sendo que, atualmente, exerce o cargo de Diretor industrial de uma indústria produtora de gesso, localizada na região do Araripe, que tem como objetivo principal a produção de gessos beta, alfa e outros produtos derivados. No entanto, recentemente, enfrenta as dificuldades normais de um mercado em virtude da recessão, desde 2014, além de ter um ambiente empresarial desigual, onde muitas empresas operam na informalidade para concorrer no mercado da construção civil, oferecendo produtos com preços atrativos, embora de qualidade inferior.

Além disso, possui um quadro de funcionários enxuto, em torno de 54 colaboradores divididos nos setores de britagem, calcinação, mistura, produção de pré-moldados. Atualmente, utiliza-se apenas 40% da capacidade produtiva, comandada por uma equipe capacitada de experiência no ramo; composta em nível gerencial, por engenheiros civis, de minas e químico; consultores de apoio nas áreas de inovação, administrativa, financeira, contábil e advocacia, e tem como principais mercados: agrícola, construção civil, gessos dentais, indústria cerâmica de louça sanitária, louça de mesa e faiança.

Na planta industrial tem-se três fornos de calcinação do tipo marmitta horizontal descontínuo, fabricados pela M2G *Grelbex*, para a produção de gesso beta, que estão divididos em unidades chamadas por fábrica 5, fábrica 7 e fábrica 8. A unidade fábrica 8 está parada em manutenção e reforma do seu forno, tipo autoclave de processo via úmida, com produção contínua de gesso alfa, fabricado pela *Babcock* BSH. Também uma planta para produção de

pré-moldados (blocos de gesso com espessuras de 7 cm e 10 cm, para uso nas vedações internas e externas em edificações), fabricado pela *Alpha-Platre*; uma planta de mistura à base de gesso com tecnologia alemã, fabricada pela *Babcock BSH*, e uma planta de mistura de origem nacional para a produção de gessos dentais.

A capacidade produtiva total dos três fornos de calcinação de gesso beta é de aproximadamente 14.000 toneladas por mês, com uma matriz energética a base de biomassa; a unidade fabril de pré-moldados tem capacidade produtiva de 25.000 m<sup>2</sup> de bloco por mês, para blocos de espessura de 100mm e 37.800 m<sup>2</sup> para blocos de espessura de 70mm, e uma planta de mistura com capacidade para 3.000 toneladas por mês.

## 6.2 APRESENTAÇÃO DA MATRIZ DE CONSEQUÊNCIAS

Buscando cumprir os procedimentos metodológicos determinados no Capítulo 3, houve a aplicação de um questionário roteirizado como instrumento de abordagem ao especialista – ver Apêndice A –, no qual o aplicador (discente) apresentou cuidadosamente uma introdução explicativa acerca das motivações do estudo, descrevendo os critérios, as alternativas e a escala de pesos considerados, além da dinâmica de condução para obtenção das respostas e dados apropriados. De tal maneira que, para representar a performance de cada alternativa em relação aos critérios, tomou-se a escala Likert, disposta na tabela 2, pela qual o especialista estabeleceu valores numéricos para todas as correlações entre Critérios e Alternativas.

Tabela 2 – Escala dos critérios de avaliação

Intensidade do critério	Valor numérico
Muito baixo	1
Baixo	2
Razoável	3
Alto	4
Muito Alto	5

Fonte: Melo e Negreiros (2021)

Para tanto, visando a praticidade de coleta dos valores numéricos no processo de elicitação de preferências, a dinâmica entre o aplicador e o especialista decorreu do entendimento de atribuir de intensidade de todos os insumos energéticos por critério, ou seja, o especialista, naquele critério, pontuou todas as alternativas. Além disso, por parte do especialista, delegou-se os objetivos de maximização e minimização e funções de preferências para todos os critérios.

Como resultado, considerou-se a escolha da Função Usual para todos os critérios devido a clareza por parte da especialista com relação as faixas de valores dentro da escala Likert para todos os critérios, em acordo com as colocações de Almeida (2013) na subseção 2.3.3.1; não necessitado assim, de determinação dos limiares de preferência (p) e indiferença (q). Complementarmente, objetivou-se a maximização das funções de preferências nos critérios C1, C2, C5 e C8 e minimização nos critérios C3, C4, C6, C7, C9 e C10.

No segundo momento, após a avaliação das alternativas concluída, abordou-se a especialista no sentido de extrair de suas percepções ao solicitá-lo que declarasse os níveis de importância do conjunto de critérios considerado. De tal modo que, construiu-se uma hierarquia do critério mais ao menos importante determinada como  $C6 > C4 > C5 > C1 > C7 > C2 > C8 > C3 > C9 > C10$  cujas posições assumidas serviram de parciais de entrada no cálculo dos pesos ROC. Assim, tendo a ordem de importância, a avaliação das alternativas por critério, as funções com seus respectivos objetivos e o cálculo dos pesos ROC se concentram na matriz de avaliação do problema consoante ao quadro 7.

Quadro 7 – Matriz de consequências

	<b>CRITÉRIOS</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C9</b>	<b>C10</b>
	<b>PESOS</b>	0,11	0,07	0,03	0,19	0,14	0,29	0,09	0,05	0,02	0,01
	<b>FUNÇÃO</b>	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL	USUAL
	<b>OBJETIVO</b>	MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX
<b>ALTERNATIVAS</b>	Lenha	1	3	5	2	4	2	5	3	3	1
	Lenha Picada	1	3	5	2	3	2	5	2	3	1
	Coque	4	4	1	3	3	3	3	5	1	1
	Óleo Diesel	3	3	3	4	3	3	3	4	2	1
	Óleo BPF	3	4	1	3	3	3	3	5	2	1
	Capim-elefante	5	3	3	3	4	2	2	2	3	2
	Gás Natural	5	1	5	5	2	5	1	3	5	1
	Energia Solar	4	3	3	3	3	3	2	1	5	2

Fonte: O autor (2022)

### 6.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO PROMETHEE-ROC

Diante da matriz de avaliação apresentada na subseção anterior, a aplicação do conjunto de dados necessários ao método PROMETHEE-ROC teve suporte do *software* Visual PROMETHEE *Academic* cujo retorno do resultado encontra-se disposto na forma de ranqueamento descrente das alternativas na tabela 3.

Tabela 3 – Resultado da aplicação no software Visual PROMETHEE Academic

Rank	Alternative	$\varphi^+$	$\varphi^-$	$\varphi$
1	Gás Natural	0,7500	0,2086	0,5414
2	Óleo Diesel	0,4743	0,2214	0,2529
3	Energia Solar	0,3671	0,2657	0,1014
4	Óleo BPF	0,3229	0,3186	0,0043
5	Coque de Petróleo	0,2886	0,3557	-0,0671
6	Lenha Picada	0,2971	0,4157	-0,1186
7	Lenha	0,2429	0,5300	-0,2871
8	Capim-elefante	0,1486	0,5757	-0,4271

Fonte: Visual PROMETHEE Academic (2022)

Os resultados demonstram o GN como insumo mais propício na composição da matriz energética do ALP gesseiro pernambucano, seguido do Óleo diesel, em segundo, e da Energia Solar, em terceiro lugar, respectivamente. As posições medianas subsequentes foram ocupadas por dois combustíveis fósseis, os óleos BPF (4<sup>a</sup> colocação) e CVP (5<sup>a</sup> colocação) e, em contrapartida, a Lenha Picada (6<sup>a</sup> colocação), a Lenha (7<sup>a</sup> colocação) e a gramínea Capim-elefante (8<sup>a</sup> colocação) se revelaram as alternativas menos atrativas ao figurarem nas últimas posições.

No exame detalhado do desempenho por alternativa, torna-se imprescindível estabelecer um paralelo com a interpretação dos valores atribuídos, justificativas e das considerações frisadas por parte da especialista. Para isso, retomando os dados da matriz de consequências do quadro 7 alinhados ao resultado do ranqueamento final da tabela 4, o GN teve uma performance máxima (5) favorável em quatro critérios que objetivavam maximização – Vida útil dos fornos (C3), Capacidade Produtiva (C4), Eficiência térmica (C6) e Impacto Social (C9) – muito baixa (1) no critério de Manutenção (C2) e baixa (2) no Consumo da fonte energética (C6), tendo ambos os critérios objetivando minimização.

Além disso, o GN apresentou uma ótima performance nos três critérios de maiores pesos, C4, C5 e C6, contrabalanceando com seus piores desempenhos no Custo Total (C1), Disponibilidade (C7) e Políticas e Incentivos fiscais (C10), onde os pesos atribuídos para C7 e C10 foram de menor intensidade. No geral, as considerações apontadas por parte da especialista devem-se aos atributos de ordem técnica e operacional como energia limpa, de baixos esforços de manutenção aliados ao aumento da capacidade produtiva, alta eficiência térmica por contato direto do minério ao gás e consumo menor frente outros insumos.



Apesar disso, a especialista enfatiza que as restrições logísticas de capilaridade no abastecimento a longo prazo do GNC devido à ausência de uma malha dutoviária interligando o Polo as demais regiões de Pernambuco já abastecidas, como também, a necessidade de conter uma Rede de Distribuição de Gás Natural implantada na região dificultada pelos altos custos de planejamento, implantação e adaptação nas plantas industriais da infraestrutura necessária, somada à ausência do favorecimento de políticas e incentivos fiscais contendedentes.

Em segundo lugar, o **Óleo diesel**, por sua vez, recebeu avaliações razoáveis (3) em 60% dos critérios, incluindo os critérios de maior (C6) e terceiro maior peso (C5) e um alto desempenho (4) na Capacidade Produtiva (C4); contrapondo as avaliações negativas nos Impactos Ambiental (C8), Social (C9) e Políticas públicas e Incentivos Fiscais (C10), mas, em consequência dos seus baixíssimos pesos, não prejudicaram significativamente o posicionamento final da alternativa.

A **Energia Solar** figurou como terceira colocada mais adequada, tendo em vista, uma classificação razoável (3) em 50% dos critérios – Manutenção (C2), Vida útil dos fornos (C3), Capacidade Produtiva (C4), Consumo da fonte energética (C5) e Eficiência térmica (C6) – abrangendo inclusive os três critérios de maior peso, C4, C5 e C6, que somados às performances máximas nos Impactos Ambiental (C8) e Social (C9) conseguem proporcionar um saldo positivo, mesmo com as avaliações desfavoráveis nos critérios de Custo Total (C1) e Disponibilidade (C7).

Os **óleos BPF e CVP** ocuparam as posições medianas proporcionadas por avaliações razoáveis em três critérios de maiores pesos – C6, C4 e C5 – que compensaram as performances imensamente negativas dos critérios de Manutenção (C2), Vida útil dos fornos (C3), Impactos Ambiental (C8), Social (C9) e Políticas e Incentivos Fiscais (C10). Isso porque embora a especialista tenha esclarecido os transtornos gerados e potenciais, principalmente pelo CVP, através da poluição atmosférica e do solo, danos na estrutura do forno, além dos altos investimentos em infraestrutura, capital humano habilitado para manuseio e planos ambientais bem definidos ao manuseio, descarte e desastres ambientais, por um lado. Por outro viés, os óleos encontram-se mais acessíveis no mercado nacional, mas, inviáveis em grandes proporções ao Polo por causa da flutuação da política de preços do petróleo e derivados estabelecida pela Petrobrás.

No caso das alternativas de biomassa nas formas de **Lenha e Lenha Picada**, a compreensão da especialista acerca de ambas evidencia uma disponibilidade de altos volumes em curto espaço de tempo, mesmo em condições de uso predatório da fauna do Polo. Não obstante, questionou o cenário futuro da região à medida em que a lenha em toras ainda se mantivesse como principal insumo energético. Nessa hipótese, o decisor projeta o Óleo Diesel

como opção mais propícia para contrapor os altos níveis de desmatamento gerados a longo prazo, visto que como custo-benefício, viabilidade logística e de manuseio e impactos a vida útil dos fornos e do meio ambiente, por exemplo, o privilegia dentre os combustíveis fósseis.

Com relação aos demais critérios, o decisor alegou devido a Lenha ser um insumo habitual, onde a ampliação, ou transição total, para Lenha Picada, manteria os custos em níveis similares. Em complemento, o decisor pontua uma fraca correlação da utilização da lenha com a degradação dos fornos. Portanto, ambas as alternativas tiveram avaliações máximas e idênticas nos critérios de Custo Total (C1), Vida útil dos fornos (C3) e Disponibilidade (C7), avaliações razoáveis (3) nos critérios de Manutenção (C2) e Impacto Social (C9), e baixas (2), nos critérios de primeiro (C6) e segundo (C4) maior peso, além do critério de Políticas públicas e Incentivos fiscais (C10); ocorrendo desempate no critério Consumo da fonte energética (C5), no qual o decisor afirmou que o volume consumido de lenha na forma de cavaco, ao invés de toras, é menor, pois seu formato de menor área de contato confere mais calor ao forno.

Por último, tem-se a mais baixa colocação ocupada pelo **Capim-elefante** que se deve aos argumentos do decisor serem fundamentados no ineditismo deste tipo fonte ainda deixar impreciso vislumbrar um cenário no qual, de fato, sua aplicação nas plantas industriais, suportada por rotações de cultura na região, consiga suprir a demanda térmica a longo prazo no Polo. De modo que, nos critérios de Custo Total (C1), Consumo da fonte energética (C5), Eficiência térmica (C6) obtiveram-se avaliações negativas, sendo que, C6, C5 e C1 compreendem o primeiro, o segundo e o quarto critério de maiores pesos, perfazendo assim, maior impacto negativo, se comparado aos demais critérios como C2, C3 e C9, onde apesar de avaliações razoáveis (3), seus pesos são proporcionalmente bem menores.

#### 6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com base na subseção anterior, os dados aplicados no *software Visual PROMETHEE Academic* resultaram na formação de um *ranking* contendo a ordem de classificação das alternativas, apontando, respectivamente, o GN, o Óleo Diesel e a Energia Solar como as melhores opções de insumos energéticos ao APL de gesso em Pernambuco. De modo que, nota-se no *ranking* final uma peculiar classificação intercalada entre as energias renováveis e não renováveis, indicando performances não sumariamente positivas, por parte dos insumos renováveis, assim como, não necessariamente negativas dos não renováveis, independentemente dos tipos de critérios analisados.

A priori, pela perspectiva de performance das alternativas, a sugestão do GN como insumo energético essencial se alinha com a literatura apresentada na subseção 4.2.4, haja vista suas características físico-químicas mencionadas por Benachour et al. (2004), Oliveira e Shinohara (2014) e França (2016) propiciam uma queima do minério mais limpa e eficiente, sem presença de fuligem e outros compostos que possam prejudicar o meio ambiente, tendo a possibilidade de queima de contato direto sem possibilidade de contaminação do gesso em fornos contínuos, conferindo maior volume de processamento, igualmente foram ressaltadas pela especialista em suas avaliações; conferindo-lhe um desempenho notável.

Em contraponto, as avaliações pessimistas realizadas nos critérios C1, C7 e C10 demonstram-se complementares, justificadas por projetos de energia voltados para implantação definitiva do GN no Polo robustos necessitem de políticas públicas e incentivos fiscais atrativos ao financiamento; que devem ser construídas conjuntamente entre sindicatos, instituições de ensino e representantes dos governos estadual e municipal e da sociedade civil. No entanto, conforme a literatura vigente, a Copergás (2022), em conjunto com a SINDUSGESSO encontram-se na fase de estudos de viabilidade para estruturação de modelos de negócio desde o último trimestre de 2021, sem previsões finalização das atividades.

Destaca-se que, o GN, igualmente aos Óleos diesel, BPF e CVP, são energias não renováveis e, portanto, concomitantemente, a especialista salientou que a política de preços da Petrobrás dos derivados do petróleo mostra-se oscilante, dependente da composição dos valores praticados no mercado internacional, dos custos logísticos e os riscos operacionais de importação ao Brasil, refletindo-se nos preços cobrados aos distribuidores até o Polo. De maneira que, segundo a especialista, tal fato não somente dificulta a inserção do GN, como também, invalida os usos dos óleos BPF e CVP em grandes volumes a longo prazo, apesar de disponíveis no mercado nacional. Além disso, as avaliações negativas dos óleos BPF e CVP nos critérios C2, C3 e C8 procedem de seus efeitos negativos ocasionados durante o processo de calcinação e das condições adversas dos poluentes produzidos que extrapolam o paradigma ambiental.

As colocações nesses quesitos correspondem à literatura nas subseções 4.2.2 e 4.2.3, denotando que os óxidos metálicos provenientes da combustão de ambos combustíveis atuam similarmente na danificação a longo prazo das plantas industriais, principalmente, dos fornos, por processo de corrosão e, por vezes, no entupimento das tubulações e bombas por acúmulo; exigindo, dessa forma, manutenções preventivas ou preditivas recorrentes. Posto isto, acrescentam-se outros malefícios como a produção de gases e fuligem altamente poluentes, os riscos de contaminação dos solos e corpos hídricos sem planos de gestão ambiental resolutivos,

e investimentos em capital humano voltados ao manuseio e descarte apropriados dos rejeitos; sendo que, este último aspecto não fora mencionado na revisão bibliográfica.

Para as três fontes de biomassa, duas motivações distintas nos posicionamentos da especialista contribuíram no resultado final. No caso das Lenha Picada e da Lenha que assumiram a antepenúltima e penúltima colocações, respectivamente, seus resultados se devem as ótimas performances idênticas nos critérios C1, C3 e C7 cujos aspectos cultural e logístico da lenha em toras extraída essencialmente da vegetação local a torna um insumo de oferta extensiva. De maneira que, a Lenha Picada representa uma estrutura física alternativa do mesmo insumo beneficiado antes de ser consumido nos fornos de calcinação; ambos, por serem costumeiros, não impactam drasticamente a vida útil das plantas de calcinação, tampouco, raramente carecem de custos não previstos.

Apesar disso, tais critérios foram insuficientes para contrapor suas baixas performances nos critérios de primeira (C6) e segunda (C4) maior importância, dado que a queima da Lenha não confere alta eficiência aos fornos comparada aos óleos combustíveis considerados, conforme mencionado na subseção 4.2.5.2; no entanto, a especialista não comentou da correlação da eficiência térmica em função dos níveis de umidade da lenha. Além disso, pontuou-se que a capacidade produtiva de operação nos fornos não menores comparada as demais alternativas. Por outro viés, são desempatados no terceiro critério (C5) de maior importância, onde a especialista salientou que escolhendo-se a Lenha Picada, sua queima mais homogênea proporciona economia de biomassa através do ritmo de consumo perene; fato comprovado na subseção 4.2.5.2.

Por fim, a especialista expressou que a gramínea Capim-elefante se revela um insumo de performances desconhecidas para maioria dos fatores e, por vezes, ainda pouco apurado, dada literatura vigente carente de casos concretos condizentes, ou, similares à realidade do Polo, que extrapole as prospecções, apontamentos e especulações apresentadas na subseção 4.2.5.3. Nesse sentido, segundo o autor, apostando-se na gramínea, as empresas assumiriam altíssimos riscos econômicos, estratégicos e de produção, os quais demandariam planos efetivos de implantação, manutenção, gestão e adaptação das plantas industriais; explicando-se a baixa performance no Custo total (C4). Somado a isso, a imprecisão da performance do Capim-elefante em situação de grandes volumes nos fornos de calcinação afetou negativamente o primeiro (C6) e terceiro (C5) critérios de maior importância; envolvendo os fatores de eficiência térmica e consumo da fonte, respectivamente.

Destaca-se que, haja vista a natureza do perfil da especialista, de formação e função bem definidas, e alocado no setor de Engenharia Química de uma média empresa atuante no Polo, impactou na agregação de suas preferências ao favorecimento de critérios diretamente ligados

às performances das diferentes fontes energia no processo de calcinação. Visto que, no retorno da solicitação de informações sobre a ordem de prioridade dos critérios, a especialista privilegiou a Eficiência térmica (C6), Capacidade Produtiva (C4) e Consumo da fonte energética (C5). Portanto, mesmo que a especialista compreenda as dimensões dos impactos sociais, ambientais e políticos, numa ordem de prioridade, seu raciocínio volta-se aos fatores de performance dos insumos, seguidos dos custos, manutenção e disponibilidade, e por último, aos tipos de impacto acarretados por seu consumo.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Alinhando-se as discussões abordadas nos capítulos 2, 4 e 5, à partir da natureza de multiparâmetros perceptível e oriunda das diferentes perspectivas conflitantes em torno das potencialidades, viabilidades e impactos das fontes energéticas para composição da matriz energética do APL gesseiro pernambucano, houve uma restrição consistente do universo de pesquisa, selecionando uma empresa de porte médio, que engloba o processo de calcinação da gipsita, e inserida na região do Polo, também como, a figura da especialista, representada por uma colaborada presente no cargo de Diretora industrial com mais de 30 anos de experiência.

De modo que, por meio da efetiva aplicação de um questionário direcionado, captou-se da especialista os dados e informações relevantes – contidas no quadro 7 –, representados por valores da escala Likert, assim como, a ordem cardinal de importância dos critérios no contexto de decisão; este último, utilizado para definição dos pesos ROC. Posto isto, a aplicação do método PROMETHEE-ROC para este estudo teve suporte do *software Visual PROMETHEE Academic* cuja interface retornou como resultado um *ranking* de performances dos fluxos de importância líquidos ( $\phi$ ), tendo o GN como a melhor alternativa, com fluxo líquido de 0,5414 o Óleo Diesel e a Energia Solar ocupando as primeiras colocações, respectivamente, e o Capim-elefante como opção menos favorável para o Polo, com fluxo líquido de -0,4271 – ver tabela 3.

Apesar de ser uma energia não renovável, o GN é considerado um insumo de combustão limpa abrangendo inúmeros ganhos econômicos e energéticos ligados ao beneficiamento da gipsita, e de menor impacto ambiental. No entanto, por ser um subproduto de refino do petróleo, sofre com a oscilação da política de preços, assim como, os Óleos diesel, BPF e CVP, acarretando em um conjunto de alternativas inviáveis para grandes proporções desses insumos sendo deslocadas às regiões distantes de seus locais de refino e abastecimento, por exemplo. Em paralelo, no caso do GN, para oferecer segurança energética a longo prazo necessitaria de ações conjuntas entre os representantes da região, sindicatos, Copergás e agentes públicos que pudessem estabelecer uma logística uníssona com a implantação de malha dutoviária eficiente.

Entretanto, pela Copergás (2022), a interiorização gradativa dos gasodutos ainda coloca a situação do APL gesso pernambucano em fases de pesquisas de viabilidade técnico-econômica, do contrário, o único modal cabível para transporte é o rodoviário, de custos suscetíveis à política de preços. Dessa forma, atualmente, o investimento concreto no GN se faz menos atrativo do que promissor. Nesse sentido, o investimento na Energia Solar alavancado, tanto pelas condições climáticas brasileira propícias, as práticas de políticas de incentivo, principalmente, com a promulgação da lei federal regulatória 14.300/22 para sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração distribuída, mas sem projetos de implantação contundentes em larga escala no Polo demandarem estudos de viabilidade aprimorados.

Complementarmente, observa-se que os bons rendimentos volumétricos, energéticos e econômicos do Capim-elefante analisados no campo da pesquisa não foram suficientes para torná-lo concorrente apto frente aos demais insumos presentes na matriz energética, devido na visão da especialista considerar seu potencial uso uma mudança arriscada sem referências anteriores no Polo. Por outro lado, mesmo os outros tipos de biomassa tendo figurado em posições baixas no *ranking*, nas circunstâncias da lenha em toras, esta ainda se mostra uma opção confortável de custo-benefício, e seu diferencial esteja na aposta em forma de cavaco como uma solução de alimentação perene aos fornos aliada ao incremento da eficiência térmica associada, embora ambas, não sejam tão eficientes quanto os demais insumos energéticos.

Ao mais, os valores obtidos são algebricamente válidos, tendo em vista, a estrutura axiomática do método PROMETHEE-ROC fundamentada na teoria de relações de classificação das alternativas que indicam a ordem de prioridade entre si, de acordo com a integração dos seus desempenhos nos critérios de avaliação assumidos no contexto de decisão. Apesar disso, ponderando tais resultados às realidades dos três primeiros colocados, principalmente, discutidas anteriormente, determinadas implicações ainda distanciam a concretização do cenário apontado no *ranking*.

Já, a contribuição dos pesos ROC fora oportuna à medida que não incluiu no parâmetro peso tendência, ou arbitrariedade, proveniente dos esforços de denominação usual do decisor, trazendo praticidade. Por fim, cabe-se frisar que a ordem de prioridades por critérios de dimensão tecnológica - C6, C4 e C5 – que, por sua vez, assumiram pesos ROC consideráveis, contribuíram para alocação das alternativas com bom, ou ótimo desempenho neles, em detrimento dos demais critérios, onde seus desempenhos expõem melhor os contrapontos reais para inserção na matriz energética do APL gesso pernambucano.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem por desígnio tecer conclusões acerca deste trabalho, assim como apresentar sugestões para possíveis trabalhos futuros correlacionados ao que fora desenvolvido, propondo dar prosseguimento às pesquisas no objeto de estudo, o APL gesso de Pernambuco no intuito de fortalecer cada vez mais as possibilidades de inserção de energias renováveis na região.

### 7.1 CONCLUSÕES

Com base nos estudos reunidos nas subseções 2.1 e 2.2, a priori, foi possível compreender que a composição da matriz energética que abastece as plantas de beneficiamento da gipsita no Polo gesso de Pernambuco provém majoritariamente da exploração predatória da lenha nativa da região do Araripe, podendo ocasionar desmatamento desenfreado, extinção da fauna e flora originárias da Caatinga e o processo de desertificação do solo como principais impactos ambientais, onde outras fontes energéticas, em menores proporções, já foram utilizadas, ou, cotidianamente agem de forma coadjuvante. Nesse sentido, buscando optar por fontes mais verdes alinhadas com a realidade do Polo e, paralelamente, que possam ser competitivas à lenha, não é uma tarefa fácil, pois se percebe diferentes fatores inibidores, por vezes, conflitantes, interligados ao contexto deste tipo de decisão.

Diante disso, o trabalho propôs avaliar as potencialidades das fontes energéticas para composição da matriz energética do Polo com enfoque multicritério por meio da construção e simulação de modelo de decisão. Para isso, o método PROMETHEE-ROC revelou-se apropriado aos objetivos do estudo como uma ferramenta composta pela concepção de uma pré-ordem completa entre as alternativas sem incomparabilidades através do PROMETHEE II, combinada ao auxílio da técnica ROC como procedimento de elicitação de pesos, no intuito de amenizar o esforço cognitivo do decisor para determinação de valores quantitativos aos critérios. Logo, embasando-se nos Capítulos 4 e 5, oito alternativas de insumos energéticos e dez critérios de avaliação foram considerados cuja aplicação do método contou-se com a participação de uma especialista – ocupando o papel clássico de decisor na abordagem MCDA – oriunda do próprio APL gesso de Pernambucano, de formação e vivência na profissão de Engenharia Química, atualmente no cargo de Diretor Industrial de uma empresa fabricante de gesso.

A partir disso, foi possível realizar entrevista com ela, de maneira que, os resultados apresentados revelaram o GN como insumo mais indicado para composição da matriz

energética do APL, seguidos do Óleo diesel e da Energia Solar, respectivamente. Tendo em vista que, o GN, apesar de origem não renovável, possui uma combustão limpa, isenta de fuligem e outros particulados característicos dos combustíveis fósseis, passível de contato direto com minério durante o processo de calcinação sem perigo de contaminação do produto, além dos benefícios conferidos por maior eficiência térmica e aumento do volume de processamento nos fornos como vantagens bem avaliadas pelo especialista que o projetaram como alternativa melhor quista.

No entanto, conforme abordado no capítulo 5, vislumbrar um cenário de efetiva segurança energética com o GN, depende da implantação de malha dutoviária capaz de atender as demandas locais ao interligar o Polo às demais regiões já abastecidas pela Copergás, no Estado de Pernambuco, como forma de atenuar a dependência da oscilação de preços dos combustíveis fósseis, assim como, do modal rodoviário igualmente encarecido, tanto pela logística de distribuição, conseqüentemente, do repasse dos preços dos combustíveis. Além disso, o GN apresentou uma ausência de ações conjuntas contundentes entre o Estado, empresários, comunidade acadêmica e demais *stakeholders* locais, para além dos procedimentos de estudos de viabilidade atuais, ainda colocam como insumo bastante oneroso.

O Óleo Diesel, por sua vez, revelou-se a opção mais cogitada para uso dentro da classe de óleos combustíveis considerados, como vem acontecendo no Polo, mas, em menores proporções devidas, em parte, da política instável dos preços combustíveis que o torna impraticável para grandes volumes de aquisição, assim como, os impactos ambientais e os esforços de manutenção recorrentes à planta industrial. Já, a Energia Solar, ultimamente, decorre de uma assimilação perene mais voltada ao uso residencial impulsionada pela lei federal 14.300/22, responsável pela instituição do marco legal para sistemas de micro e minigeração distribuída paralela as isenções de ICMS, PIS e Confins sancionadas em todos os estados brasileiros.

Em contrapartida, a participação tímida da energia solar nas indústrias em geral (2%) demanda incentivos por meio de linhas de crédito e construção de usinas direcionados ao setor industrial e, conseqüentemente, do Polo, haja exploração do potencial solar da região do Araripe pela implantação de projetos de energia de escala praticáveis as demandas energéticas da região cujos investimentos nas tecnologias disponíveis proporcionem retornos viáveis.

No geral, sobre análise do ranqueamento, as alternativas de performances minimamente razoáveis nos critérios de Eficiência térmica (C6), Capacidade Produtiva (C4) e Consumo da fonte energética (C5), respectivamente, que detinham os maiores pesos, se sobressaíram em detrimento das baixas performances das fontes de biomassa nesses mesmos critérios – Lenha, Lenha Picada e Capim-elefante. Entretanto, a aplicação da técnica ROC retornou pesos de



valores concentrados nos três primeiros critérios, de tal maneira que, o critério Eficiência térmica, como mais importante, apresentou peso 0,29, enquanto que, os cinco critérios menos importantes, juntos somam 0,18 de importância; cabendo ressalvas a serem descritas na 7.2.

No que se refere a aplicação do método PROMETHEE-ROC, sua capacidade de integração ao contexto robusto de decisão do estudo das potencialidades de fontes energéticas ao APL gesseiro pernambucano mostrou-se uma ferramenta de abordagem flexível, de análise holística cujo processo de elicitação de preferências da figura representativa do especialista oriundo do Polo decorre de maneira dinâmica. Visto que, o método PROMETHEE II por si é bastante difundido na literatura por aplicações em diversas áreas de estudo, de modo que, sua junção a técnica ROC como medida facultativa mais fluida na elicitação de pesos a partir da informação ordinal dos critérios, sem que o esforço cognitivo do decisor esteja sujeito à mensuração equivocada do parâmetro peso, conferindo assim, maior credibilidade ao resultado.

Em suma, as contribuições deste trabalho servem de recurso aos *stakeholders* ligados ao referido APL, buscando potencializar as discussões já existentes acerca das tentativas de adesão e, ou ampliação, da participação mais sustentável de fontes alternativas no Polo gesseiro pernambucano como suporte para planejamentos energéticos futuros. Dado que, a sintetização do contexto do APL com suas implicações, demandas e peculiaridades por uma série de parâmetros, conforme aborda o método PROMETHEE-ROC, agrega-se como instrumento de análise orientado para fundamentar pesquisas, planejamento energéticos e políticas públicas mais significativas para região.

## 7.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como principal limitação observada no estudo, tem-se uma literatura vigente precária de estudos ligados às análises das potencialidades, viabilidades e impactos da composição, ou, substituição de fontes energéticas, quer seja, para situações contendo objetos de estudo macro, similares ao Polo, e micro, como apenas indústrias, por exemplo. Nesse sentido, como disposto, principalmente, no Capítulo 5, houve dificuldade de encontrar trabalhos no campo científico que discutam a plausibilidade das operações de fontes energéticas no processo de calcinação, sendo que, existem pesquisas essencialmente calcadas no estudo das características físico-químicas da gipsita, adição de materiais retardantes, ligantes e demais materiais e *design* dos fornos de calcinação.

Além disso, da presença de informações quantitativas de natureza socioeconômica, produtiva e industrial do APL nas fontes consultadas nos *sites* governamentais de esferas municipal, estadual e federal, Sindugesso, ITEP, SEBRAE/PE etc. defasadas. Já, considerando

as particularidades do Polo, o método PROMETHEE-ROC revelou-se uma proposta metodológica eficiente no que se refere a priorização das alternativas de insumos energéticos para atendimento da demanda energética do APL gesseiro pernambucano por meio de relações de preferência de sobreclassificação de racionalidade não compensatória aliada a definição da informação ordinal de importância dos critérios ao contexto de decisão validada sob ótica de um decisor específico.

De modo que, como propostas de estudos futuros, para conferir robustez sobre os resultados encontrados, propõe-se a possibilidade da aplicação do método PROMETHEE-ROC no cenário composto por um grupo de decisores representando os diversos stakeholders correlacionados ao Polo, buscando validar os parâmetros, alternativas e critérios já considerados neste estudo, assim como, variáveis de entrada ainda desconhecidas. No mais, caberia aprimorar a validade dos resultados obtidos, realizando uma análise de sensibilidade focalizada nos pesos dos critérios, considerando o comportamento do *ranking* das alternativas à medida que os valores fossem mais acentuados.

## REFERÊNCIAS

ABREU, L.M.; JUNIOR, M.E.; HORA, H.R.M.; SOUZA, C.L.M.; SANTOS, W.A. Análise Multicritério de potencialidade para a produção de energia renovável na região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro. SPOLM 2019. *Anais...*, Rio de Janeiro, 10 p., 2019.

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. *Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Infográfico ABSOLAR*, 2022. 1 Infográfico, nº 41. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/arquivos/>. Acesso em: 25 mar. 2022.

ALBA. Energia solar no Brasil: Quais são os incentivos?, 2021. Disponível em: <https://albaenergia.com.br/energia-solar-no-brasil-quais-sao-os-incentivos/>. Acesso em: 19 fev. 2021.

ALMEIDA, A. T. *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*/ Adiel Teixeira de Almeida. São Paulo: Altas, 2013.

ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTO, O. C. E.; SACRAMENTO, T. C. B. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. *Engenharias On-line*, v. 1, n. 2, 2015, p. 21-33.

AMARAL, E. A. *Estimativa da umidade em cavacos de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo*. Lavras: UFLA, 2018. 58 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Lavras, 2018.

ANDREWS, A.; LATTANZIO, R. K. *Petroleum coke: Industry and environmental issues*. Washington, DC: Congressional Research Service, 2013.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, *Resolução ANP Nº 3, de 27.01.2016 – publicada no DOU de 28.01.2016, posteriormente retificada no DOU de 16.02.2016 e no DOU de 06.07.2016*. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/22183403](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/22183403). Acesso em 08 jan. de 2022.

Refino do Petróleo: Óleo Diesel. *Site Institucional*, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel>. Acesso em 08 jan. de 2022.

API. American Petroleum Institute. What is Natural Gas?. *Site Institucional*. Disponível em: <https://www.api.org/news-policy-and-issues/natural-gas-solutions/what-is-natural-gas>. Acesso em: 05 jan. de 2022.

AQUINO, A. L.; BRESCIANI, L. P. Arranjos produtivos locais: uma abordagem conceitual. *Organizações em contexto*, n. 2, dez. 2005, p. 153-167.

ARAÚJO, S. M. S. The bottlenecks on the development and actions from the state in the plastered pole from Araripe-Pe. *Mercator*, v. 9, n. 19, 2010, p. 65 a 76-65 a 76.

ARAÚJO, S. M. S.; MARTINS, L. A. A indústria extrativa mineral do polo gesso do Araripe e impactos sócio-ambientais. *In: Revista de Geografia (UFPE)*, v. 29, Nº 1, 2012, p. 99-112.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11349: Produto de petróleo – Determinação do ponto de fluidez*. São Paulo, 2009, 15 p.

AYALA, N. F.; FRANK, A. G. Métodos de análise multicriterial: uma revisão de das forças e fraquezas. In: XIII Semana de la Ingeniería de Producción Sudamericana (SEPROSUL), 2013, Gramado- RS. *Anais...XIII SEPROSUL*, 2013.

AVELAR, T. C. *Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico*. Recife: UNICAP, 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitora Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento Ambientais, Recife, 2012.

BANA, C. A., MEZA, L. A., OLIVEIRA, M. D. O método MACBETH e aplicação no Brasil. *Engevista*, v. 15, n. 1, p. 3-27, 2013.

BAJAY, S. V. *Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: relatório setorial: cal e gesso*/ Sérgio Valdir Bajay coordenador; Paulo Henrique de Mello Sant Ana. – Brasília: CNI, 42 p., 2010.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. Variedades Mineralógicas e Processos Utilizados na Produção dos Diferentes Tipos de Gesso. In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME), 2004. *Anais... Florianópolis, XX ENTMEE*, 2004, p. 769-776.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F., LUZ, A. B. *Rochas & Minerais Industriais: Gipsita*. 2 Ed. – Rio de Janeiro – CETEM/MCT, 2008, p. 505-526.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso obtido do polo do Araripe. *Cerâmica*, v. 60, n. 356, p. 501-508, 2014.

BARRON, F.H. Selecting a best multiattribute alternative with partial information about attribute weights, *Acta Psychologica*, 80, 1992, 91-103.

BARROS, T. D. *Árvore do Conhecimento: Lenha*. Ageitec (Agência Embrapa de Informação Tecnológica), 2022. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fb123vn002wx5e00sawqe3md3rkrs.html>. Acesso em: 14 jan. de 2022

BATISTA, A.; ABREU, F. M. *Implantação de Eucalipto no município de Rio Parnaíba-MG: Resposta Técnica*. Casa do Produtor Rural. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP. Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2010, p. 23-24.

BELTON, V.; STEWART, T. J. *Multiple criteria decision analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2002.

BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A.; PERES, L. S.; CAMPOS M. F.; ZIMMERLE, T. S. Estudo técnico-econômico do processo de produção de gesso em forno rotativo contínuo com uso de gás natural. In: Rio Oil & Gas Conference, 12, Rio de Janeiro. *Anais....* 8 p.

BERTULANI, C. *Viscosidade, turbulência e tensão superficial*. Disponível em: <https://www.if.ufrj.br/~bertu/fis2/hidrodinamica/viscosidade.html>. Acesso em: 07 jan. de 2022.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. *Interciencia*, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.

BORGES, A. C. P. *Caracterização energética do Cavaco Eucalyptus grandis “in natura” e torrefeito*. Salvador: UFBA, 2015. 80 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2015.

GOLDEN ENERGY. Coque de petróleo. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/coque-petroleo/#:~:text=Significado%20de%20Coque%20de%20Petr%C3%B3leo,estrutura%20%C3%A9%20granular%20ou%20celular>. Acesso em: 18 mar. 2022

BRANS, J. P.; SMET, Y. PROMETHEE methods. In: *Multiple criteria decision analysis*. Springer, New York, NY, 2016. p. 187-219.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM-2030)*. – 2ª Ed. – Brasília: MME, 2010. Vol. II. 178 p. maio, 2011.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. *Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos 2020 ano base 2019*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-2020-ano-base-2019.pdf/view>. Acesso em: 30 set. de 2021.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, 2021a *Conheça a importância da mineração na vida dos brasileiros*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-a-importancia-da-mineracao-na-vida-dos-brasileiros>. Acesso em: 05 fev. de 2021.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia, 2021b. *Relatório Técnico 34: Perfil da Gipsita*. Marcelo Soares Bezerra (Consultor) – J Mendo Consultoria, 2009. Disponível em: [http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P24\\_RT34\\_Perfil\\_da\\_Gipsita.pdf/f4f7789d-c26f-e52b-8f06-a75feb0cefe9?version=1.0](http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P24_RT34_Perfil_da_Gipsita.pdf/f4f7789d-c26f-e52b-8f06-a75feb0cefe9?version=1.0). Acesso em: 18 jan. de 2022.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia, 2021c. *Resenha Energética Brasileira: Oferta e Demanda de Energia, Instalações Energéticas e Energia no Mundo – Ano base 2020*. João Antonio Moreira Patusco (Consultor). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergicaExercicio2020final.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2022.

\_\_\_\_\_. Rede APL Mineral – Ministério de Minas e Energia. *O que são APLs de Base Mineral?* Disponível em: <http://redeaplmineral.org.br/o-que-sao-apls-base-mineral>. Acesso em: 06 fev. de 2021.

\_\_\_\_\_. Energia renovável chega a quase 50% da matriz energética brasileira. *Site Institucional*, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/01/sancionada-lei-que-institui-marco-legal-da-geracao-distribuida>. Acesso em: 13 mar. de 2022.

\_\_\_\_\_. Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília: MME/EPE, 2022a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031\\_RevisaoPosCP\\_rvFinal.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal.pdf). Acesso em: 21 abr. de 2022.

\_\_\_\_\_. Sancionada lei que institui marco legal da geração distribuída. *Site Institucional*, 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e>

combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1. Acesso em: 22 fev. de 2022.

\_\_\_\_\_. Congresso. Câmara dos Deputados. *Lei institui marco legal da micro e minigeração de energia*, 2022c. Disponível em: [https://www.camara.leg.br/noticias/843782-lei-institui-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-de-energia/#:~:text=O%20presidente%20Jair%20Bolsonaro%20sancionou,sexta%2Dfeira%20\(7\)](https://www.camara.leg.br/noticias/843782-lei-institui-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-de-energia/#:~:text=O%20presidente%20Jair%20Bolsonaro%20sancionou,sexta%2Dfeira%20(7).). Acesso em: 25 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*, 2022d. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031\\_RevisaoPosCP\\_rvFinal.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal.pdf). Acesso em: 25 mai. de 2022.

BRUNO, I., AGOSTINHO, G. *Ecoinovação de produto e processo em Indústria de Gesso*. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=232321>. Acesso em: 23 fev. de 2021.

CAMPELLO, F. C. B. O consumo específico de lenha como índice técnico para o ordenamento florestal no Araripe em Pernambuco. *Revista dos Mestrados Profissionais*, v. 2, n. 1, 2013.

CAMPOS, A. R.; LUZ, A. B.; BASTOS, F. F. NOGUEIRA, I. Calcinação. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (org.). *Tratamento de minérios*, 6ª ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018, cap. 16, p. 727-754.

CAVALCANTE, C. A. V., ALMEIDA, A. T. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 2, p. 279-296, 2005.

CAVALVANTI, D. E. S.; MELO, R. A. D. P.; MELO, D. C. P.; SOUZA, R. A. M.; BENACHOUR, M. Avaliação da qualidade de gesso beta produzido em forno rotativo contínuo usando o gás natural como combustível. In: 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e desenvolvimento em Petróleo e Gás (PDPETRO). Florianópolis-SC. *Anais...6º PDPETRO*, 2011.

CBIE. Centro Brasileiro de Infraestrutura. Quantos quilômetros de dutos temos hoje?. *Site Institucional*, 24 mar. 2019. Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-dutos-temos-no-brasil-hoje/>. Acesso em: 06 jan. de 2022.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Banco de Biomassa: vegetais lenhosos, 2010. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/bancobiomassa/vegetaisnaolenhosos.htm>. Acesso em: 12 de fev. 2022.

CETESB. Companhia Ambiental dos Estado de São Paulo. *Ficha de Informação Toxicológica: Diesel*, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/Diesel.pdf>. Acesso em: 08 jan. de 2022.

CLEMENTE, T. R. N.; ALMEIDA, A. T.; FILHO, A. T. A. Comparação de metodologias de pesos substitutos para o método PROMETHEE II. In: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), 2015. Porto de Galinhas-PE. *Anais...XLVII SBPO*, 2015.

CLEMENTE, T. R. N.; ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; ALENCAR, L. H. Aplicação do PROMETHEE-ROC na priorização de tecnologias críticas para a geração de energia. In:

XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2015. Fortaleza-CE. *Anais...XXXV ENEGEP*, 2015.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. Transição energética e a contribuição da indústria para uma economia de baixo carbono. *Site Institucional*, Brasília-DF, 2021.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. *Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro* – Brasília: CNT, 2012.

COQUE VERDE, *Produtos: Coque Verde*, 2018. Disponível em: <https://www.coqueverde.com.br/petroleo.php>. Acesso em: 05 jan. de 2022.

CORRADI, G. M. *Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no oeste paranaense*. Cascavel: Unioeste, 2021. 32 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2021.

COSTA, J. A. P. *Controle e otimização de planta de micro-cogeração a gás natural para a produção de gesso*. Recife, 2012. 147 f. Tese (doutorado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

DA SILVA, J. A. A., DA ROCHA, K. D., FERREIRA, R. L. C., & TAVARES, J. A. Modelagem do crescimento volumétrico de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) no Polo Gesseiro do Araripe-PE. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica*, v. 13, p. 173-190, 2016.

DE ANDRANDE, W. J. M.; SANTOS, R. L.; BARBOSA, R. M.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I. Potencial energético de gramíneas no Polo gesseiro do Araripe em Pernambuco. *In: I Congresso Internacional das Ciências Agrárias COINTER – PDVAAgro (Formação de Redes Cooperação nas Ciências Agrárias)*. Vitória-PE. *Anais...I COINTER*, 2016, 6 p.

DEMATTE, R.; CARVALHO, M.; MOTA, L. Análise de Eficiência de Fontes de Energia Renováveis. *In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia*, Campinas. 2016.

DO IT. Intérprete: Lenine. Compositor: Lenine, Ivan Santos. *In: In Cité: Lenine*. Intérprete: Lenine. São Paulo: Casa 9, 2004. 1 CD, faixa 1.

DYER, J. S. Multiattribute Utility Theory (MAUT). *In: Multiple Criteria Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science*, vol. 233. James S. Dyer, Salvatore Greco, José Rui Figueira (Eds.). New York: Springer, p. 265-292, 2016.

ECODEBATE. *Medo da crise energética têm favorecido investimentos na energia solar, dizem especialistas*, 2014. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2014/05/06/medo-da-crise-energetica-tem-favorecido-investimentos-na-energia-solar-dizem-especialistas/>. Acesso em: 12 de fev. 2022.

ECYCLE. *Energia solar residencial: tipos e vantagens*, 2022. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/energia-solar-residencial/>. Acesso em: 15 de fev. 2022.

ELETRONUCLEAR. Centrais Elétricas Brasileira S.A. *O que é Energia*, 2022. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/O-que-e-Energia.aspx>. Acesso em: 18 abr. de 2022.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2022. *Fontes de Energia*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#FONTES-RENOVAVEIS>. Acesso em: 16 abr. de 2022.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2021. *Balço Energético 2021*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 19 abr. de 2022.

ESENCE, T.; GUILLOT, E.; TESSONNEAUD, M.; SARAIVA, A.; GAL, A.L.; ELIDRISSI, M.; PONCIN, D.; SANS, J.L.; FLAMANT, G. Characterization of a pilot fluidized bed reactor solar calcination processes, *Solar PACES 2019*, AIP Publishing, 11 p., 2020.

ESTÉVEZ, R.A., ESPINOZA, V., PONCE OLIVA, R.D., VÁSQUEZ-LAVÍN, F., GELCICH, S. Multi-Criteria Decision Analysis for Renewable Energies: Research Trends, Gaps and the Challenge of Improving Participation, *Sustainability*, v. 13, n. 6, 2021.

FARIAS, L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato*, v. 12, n. 17, p. 07-16, 2011.

FERREIRA, F. C. *Estudo de caracterização do gesso para o revestimento produzido no Polo Gesseiro do Araripe*. Recife: UFPE, 2017. 204 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, 2017.

FERNANDES, F.R.C.; ARAUJO, E.R. Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. In: *Conflitos ambientais na indústria mineira e metalúrgica...* Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016, p.65-88.

FERROLI, P. C. M.; LIBRELOTTO, L. I. G. Gesso. Materioteca Sustentável. *Site Institucional*. Disponível em: <https://materioteca.paginas.ufsc.br/gesso/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

FIEPE – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE PERNAMBUCO (Org.). *Estudo Técnico do polo Gesseiro do Araripe*. Araripina, 22 p. 2017.

FILHO, H. J. B. L. *Tratamento dos resíduos da construção e da demolição-RCD para a produção de gesso beta reciclado*. Recife: UFPE, 2010. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Recife, 2010.

FRANÇA, U. E. D. *Simulação do processo de calcinação de gipsita em forno rotativo com aquecimento indireto*. Recife: UFPE, 2016. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. CTG, Recife, 2016.

GADELHA, F. H. D. L., SILVA, J. A. A. D., FERREIRA, R. L. C., MELO, I. V. D., JORGE, D. L., TAVARES, J. A., & SILVA, S. P. R. D. Rendimento volumétrico e energético de clones de híbridos de Eucalyptus sp. no Polo Gesseiro do Araripe, PE. *Ciência Florestal*, v. 22, p. 331-341, 2012.

GOLDEN ENERGY. *Glossário: Coque de petróleo*. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/coque-petroleo/>. Acesso: 04 jan. de 2022.

GOMES, L. F. A. M. *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*/ Luiz Flavio Autran Monteiro Gomes, Carlos Francisco Simões Gomes. – 4. Ed. – São Paulo: Altas, 2012.



GUERRA, J. B.S.O.A.; YOUSSEF, Y. A. (Org.). Energia Solar. JELARE, 2011 (E-book). Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Youssef-Youssef/publication/259868130\\_Energia\\_Solar/links/00b4952e3e2a7933af000000/Energia-Solar.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Youssef-Youssef/publication/259868130_Energia_Solar/links/00b4952e3e2a7933af000000/Energia-Solar.pdf). Acesso em: 05 fev. 2022.

GUGLIELMETTI, F. R.; MARINS, F. A.; SOLOMON, V. A. Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. In: XXIII Encontro nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2003, Ouro Preto-MG. *Anais...XXIII ENEGEP*, 2003.

HENRIQUES JUNIOR, M.F. *Potencial de financiamento de eficiência energética: nos setores de cerâmica e gesso no Nordeste*. IDB Monographs, 2013.

HOLLANDA, L. (Coord.), DE FREITAS, B. M. R., MUÑOZ, C. P. F., DE SOUSA, F. C. C., VAREJÃO, M. C., NOGUEIRA, R. C., ANDRADE, R. B. *Gás Natural*. Cadernos FGV Energia, ano 1, nº 2, p. 12-25, nov 2014.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura*. Rio de Janeiro, v. 35, p. 1-16, 2020.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. *ABC da Mineração: Gipsita*. Disponível em: <https://portaldaminerao.com.br/gipsita/>. Acesso em: 12 ago. de 2021.

IEA. International Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil>. Acesso em: 16 abr. 2022.

IEE USP. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Fontes de Biomassa, 2022. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/fontes-de-biomassa>. Acesso em: 04 de abr. de 2022.

IFUSP. Instituto de Física da Universidade Federal de São Paulo. Fusão. *Site Institucional*, São Paulo-SP, 2015.

INTELBRAS. *Crescimento do mercado de energia solar no Brasil*, 2021. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/crescimento-do-mercado-de-energia-solar-no-brasil/>. Acesso em: 09 de fev. de 2022.

IPA. Instituto Agrônomo de Pernambuco. Potencialidades Ambientais do Polo Gesseiro do Araripe. *Site Institucional*, Recife-PE, 2014.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural. Texto pra discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 2021a.

\_\_\_\_\_, 2021b. Brasil gera 45% de energia renovável e lidera transição energética no Brics. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=38330&catid=1&Itemid=7%20](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=38330&catid=1&Itemid=7%20). Acesso em: 22 de abr. de 2022.

ITEP. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. Centro Tecnológico do Gesso: Polo Gesseiro do Araripe. *Site Institucional*, Recife-PE, 2021.

JARDINE, J. G.; BARROS, T. D. *Árvore do conhecimento: Craqueamento*. Embrapa, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fb123vmz02wx5e00sawqe3wx8euqg.html>. Acesso em: 30 dez. de 2021.

JUNIOR, A. L. N.; MACHADO, C. M.; SILUK, J. C. M.; SOLLMAN, M.; HUPTER, N. T.; PARIS, S. R. Comparativo entre as metodologias MCDA-C, DEA e AHP. *Revista FAE*, Curitiba, v. 18, n.1, p. 6-19, jan/jun, 2015.

KARVONEN, J., HALDER, P., KANGAS, J. Indicators and tools for assessing sustainability impacts of the forest bioeconomy. *Forest Ecosystems*. v. 4, n. 2, 20 p., 2017.

KOCHEM, K. *Potencialidades de logística reversa do resíduo de gesso da indústria da construção civil*. Medianeira: UTFPR, 2017. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2017.

LEITE, I. M. S.; FREITAS, F. F. T., Análise comparativa dos métodos de apoio multicritério a decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE. In: XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Bento Gonçalves-RS. *Anais... XXXII ENEGEP*, 2012.

LIPPEL – Soluções Integradas para Biomassa. *Qualidade dos cavacos*, 2014. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/Assets/Downloads/05-05-2014-10-36qualidade-dos-cavacos-para-combustao.pdf>. Acesso em: 05 março 2022.

LIMA, G. M. *Fontes alternativas de energia*, Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S. A., 2017.

LIMA, C. E. S.; FILHO, J. I. S.; MISAS, C. M. E. Panorama geral da ocorrência e produção de gipsita no Polo Gesseiro do Araripe. In: I CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SOCIEDADE (CONIMAS), Campina Grande-PB. *Anais...I CONIMAS*, 2019.

LIMA JUNIOR, F. R.; CARPINETTI, L. C. R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. *Gestão & Produção*, v. 22, p. 17-34, 2015.

LIRA, B. B.; ANJOS, I. F. Fornos para calcinação, sintetização e expansão dos minerais industriais: gipsita, caulim e vermiculita. *Depto. Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado-LEMA*. XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, p. 555-560, 2009

MACCARI, G. G. *Avaliação de hidrocarbonetos voláteis obtidos através do processo de calcinação do coque verde de petróleo e utilização em insumos industriais*. Tubarão: UNISUL, 2019. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2019.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V. S. Uso da biomassa para a geração de energia /Anderson Carlos Marafon ...[et al.] – Aracaju: Embrapa Tabuleiro Costeiros, 2016.

MARQUES, A. P. *Análise do sistema de produção de cavacos no campo*. Seropédica: UFRRJ, 2010. 30 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro., Seropédica, 2010.

MASCARANHAS, R. R. O. *Estudo da eficiência energética de fornos destinados a calcinação do gesso no polo gesseiro do Araripe*. Campina Grande: UEPB, 2016. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Centro de Ciências e tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

MELO, D. C. P. *Processo de Calcinação da Gipsita em um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável*. Recife, 2012. 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Recife, 2012.

MELO, R. A. D. P. *Estudo do efeito de aditivos nas propriedades do gesso alfa produzido em meio aquoso*. Recife, 2013. 66 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Recife, 2013.

MELO, K. E. S., NEGREIROS, T. R. Estudo sobre as fontes alternativas para a matriz energética do arranjo produtivo local de gesso de Pernambuco. In: XLI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2021. Foz do Iguaçu-PR. *Anais...XLI ENEGEP*, 2021.

MIN, H. International Supplier Selection: A Multi-attribute Utility Approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v.24, n.5, p.24-33, 1994.

MORAIS, D. C., ALMEIDA, A. T., ALENCAR, L. H., CLEMENTE, T. R. N., CAVALCANTI, C. Z. B. PROMETHEE-ROC Model for Assessing the Readiness of Technology for Generating Energy. *Mathematical Problems In Engineering*. p. 1-11, fev. 2015. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/530615/>. Acesso em: 29 out. 2021.

MOTA, C. P. F., ALMEIDA, J. A. Uso de surrogate weights para o problema seleção de portfólio multicritério através dos métodos SMARTER e PROMETHEE-ROC: uma análise através de simulação. In: LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). João Pessoa-PB. *Anais... LII SBPO*, 2020.

MUSEU HEINZ EBERT. *GIPSITA (Gypsum)*, 2021. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/gipsita-gypsum/>. Acesso em: 25 nov. de 2021.

MUSSOI, F. L. R. *Modelo de decisão integrado para priorização multiestágio de projetos de distribuição considerando a qualidade da energia elétrica*. Florianópolis, 2013. 387 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2013.

NASCIMENTO, M. D. Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica. Botucatu, 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2007.

NEOSOLAR, O que é energia solar: tudo sobre. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar>. Acesso em: 31 jan. de 2022.

NOVAES JÚNIOR, João Arnaldo. *Condicionalidades para a adequação ambiental de atividades produtivas: o caso da indústria de calcinação do gesso*. Recife, 2012. 164 f. : Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Recife, 2012.

OLIVEIRA, J. D. M. *Estudo da relação entre o poder calorífico e a formação de cinzas do coque de petróleo utilizado como combustível no processo de calcinação*. Formiga, 2018. 42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga, 2018.

OLIVEIRA, F.M.C., BORGES, L. E. P., MELO, E. B., BARROS, M. L. S. C. Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe. *Holos*, Ano 28, v. 5, nov. 2012. p. 71-82.

OLIVEIRA, M. A. C.; SHINOHARA, A. H. experiência com gás natural/GLP no polo gesseiro do Araripe, PE. *Cerâmica*, v. 60, n. 354, 2014, p. 243-253.

ORTIZ, C., VALVERDE, J., TEJADA, C., CARRO, A., CHACARTEGUI, R., VALVERDE, J. M., & PEREZ-MAQUEDA, L. Solar-driven indirect calcination for thermochemical energy storage. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2445. No. 1. AIP Publishing LLC, 2022.

PAPATHANASIOU, J., PLOSKAS, N. Methods, Examples and Python Implementations, vol. 136. Springer *Optimization and Its Applications*, 2018.

PEDROSO, L. L. A. *Análise da bioenergia no Brasil com enfoque na biomassa do capim-elefante*. Campos dos Goytacazes, 2018. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, 2018.

PEHLKEN, A.; WULF, K.; GRECKSCH, K.; KLENKE, T.; TSYDENOVA, N. More Sustainable Bioenergy by Making Use of Regional Alternative Biomass? *Sustainability* 2020, v. 12, 22 p., 2020.

PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S/A. *Manual de Diesel: Informações Técnicas*, 2021. Disponível em: [https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel\\_2021.pdf](https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel_2021.pdf). Acesso em: 07 jan. de 2022.

Óleo Diesel. *Site Institucional*, 2022a. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/automotivos/oleo-diesel/>. Acesso em: 02 jan. de 2022.

Coque Verde de Petróleo. *Site Institucional*, 2022b. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/industriais/coque-verde-de-petroleo/>. Acesso em: 04 jan. de 2022.

Gás Natural. *Site Institucional*, 2022c. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/industriais/gas-natural/>. Acesso em: 06 de jan. 2022.

*Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ*, nº BR0302, versão 12, 2019a

*Gerência de Desenvolvimento de Produtos*, Óleo combustível – Informações Técnicas (versão 1.4), 2019b

PORTAL SOLAR. Como funciona a Energia Solar. *Site Institucional*, 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-energia-solar.html>. Acesso em: 12 de fev. 2022.

POTENCIAL FLORESTAL. Cavacos ou estilhas de madeira: conheça os tipos mais utilizados. *Site institucional*, 2022. Disponível em: <https://potencialflorestal.com.br/cavacos-ou-estilhas->

de-madeira-conheca-os-3-tipos-mais-utilizados-e-suas-vantagens/. Acesso em: 23 de fev. 2022.

RAMANATHAN, R. Multicriteria Analysis of Energy, Cutler J. Cleveland (Ed.). In: *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, p. 77-88.

RANGEL, H. C., PEDROSO, L. L. A., RANGEL, I. C., SOUZA, C. L. Discussões iniciais sobre a sustentabilidade da bioenergia e das biomassas brasileiras e suas rotas de conversão energética. In: *Gestão da Produção em Foco* – volume 24/ Organização Editora Poisson – Belo Horizonte – MG: Poisson, 2018, cap. 12, p. 111-110.

RIBEIRO, A. S. *Estudo e otimização do processo de produção de gesso a partir de resíduos de construção civil*. Recife, 2011. 311 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Recife, 2011.

ROSA, N. O que é energia solar e como ela gera energia elétrica. *Canaltech*, 2021. Disponível em: <https://canaltech.com.br/meio-ambiente/energia-solar-o-que-e-como-funciona/>. Acesso em: 14 fev. 2022

ROSZKOWSKA, E. *Rank Ordering Criteria Weighting Methods – A Comparative Overview*. Optimum.Studia Ekonomiczne. Nº 5, 2013.

ROY, B. *Multicriteria methodology for decision aiding*. Kluwer Academic Publishers, 1996.

SAATY T.L., The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. In: Köksalan M., Zionts S. (eds) Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 507. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 15-37, 2001.]

SANCHES, C. B. Energia da Biomassa. *Departamento de Energia Elétrica-UNESP*, 2015. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/eco2/fontes-de-energia/biomassa/>. Acesso em: 15 de fev. 2022.

SANTANA, D. M. F. *Estudo de obtenção de água do processo de desidratação da Gipsita na produção de Gesso*. Recife, 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG, Recife, 2008.

SANTOS, L. *Avaliação de Fontes de Energia renováveis no Sudeste Brasileiro: uma abordagem F-PROMETHEE GDSS*. Volta Redonda, 2019. 125 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional). Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019.

SANTOS, R. B. *Gipsita no Sudoeste da bacia Sedimentar do Araripe, estados de Pernambuco e Piauí*/ Organizadores: Roberto Batista Santos, Silvana Diene Sousa Barros, Geysson de Almeida Lages – Recife: CPRM, 2019.

SANTOS, R. L., FREIRE, F. J., ROCHA, A. T., SILVA, J. A. A., TAVARES, J. A., FERREIRA, E. G. B. S., OLIVEIRA, E. C. A., Elephant grass (*Pennisetum purpureum Schum.*) biomass production as promising alternative source of energy in Brazil's semiarid area using gypsum. *Australian Journal of Crop Science*, v. 9, n. 11, p. 1082-1088, 2015.

SANTOS, R. L. D., FREIRE, F. J., AZEVEDO, V. M. D., ROCHA, A. T. D., & TAVARES, J. A. Produção de capim elefante e movimentação de cátions em função de gesso mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, p. 1030-1037, 2013.

SANTOS, A. V. A., MENDES, K. C. Uma avaliação do uso da Energia Solar Térmica como calor de processo na produção de gesso beta do Polo Gesseiro do Araripe. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado-RS. *Anais...VII CBENS*, 2018.

SANTOS, J. P. O., EL-DIER, S. G. Produção de Gesso no Araripe Pernambucano: Impactos ambientais e perspectivas futuras. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. v. 12, n. 3, p. 469-509, dez. 2019.

SANTOS, P. E. T.; RIBASKI J. *Árvore do conhecimento Eucalipto: Energia*. Embrapa, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/eucalipto/arvore/CONT000flguaaxl02wyiv80hhnoey960953j.html>. Acesso em: 07 fev. de 2022.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF: Boletim SNIF 2021. Disponível em: <https://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/5209-boletim-snif-2021/file>. Acesso em: 09 de fev. 2022.

SILVA, A. A. S. Potencialidades de florestas energéticas de Eucalyptus no Polo Gesseiro do Araripe – Pernambuco. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, Recife, vols. 5 e 6, 2009, p. 301-319.

SILVA, R. A. *Estudo comparativo de duas alternativas de decapeamento para lavra de Gipsita na Região do Araripe – PE*. Recife, 2013. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEMinas, Recife, 2013.

SILVA, V. B. S., SCHRAMM, F., CARVALHO, H. R. C. O uso do método PROMETHEE para seleção de candidatos à bolsa-formação do Pronatec. *Production*, v. 24, n. 3, p. 548-558, jul./set., 2014.

SIQUEIRA, G. B. A., FILHO, A. T. A. Aplicação do Método ELECTRE I para seleção de ideias de inovação. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Ubatuba-SP. *Anais...XLIII SBPO*, 2011.

SINDUSGESSO. Polo Gesseiro do Araripe: potencialidades, problemas e soluções. *Site institucional*, 2021.

SOARES, J. M. *Avaliação da qualidade de três diferentes tipos de cavacos de madeira do híbrido Eucalyptus urophila x grandis*. Curitiba: UFPR, 2016. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOARES, J. P. *Estudo Microestrutural do Gesso-Alfa Produzido pelo Processo Hidrotérmico e Calcinação a Seco e sua Influência nas Propriedades Mecânicas Pós Hidratação*. Recife, 2005. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SOBRINHO, A. C. P. L., AMARAL, A. J. R., DANTAS, J. O. C., DANTAS, J. R. A. *Balanco Mineral Brasileiro 2001: Gipsita*. p. 387-409. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>. Acesso em: 15 abr. de 2021.

SOLSTAR. Governo lança programa de incentivo à energia solar, 2021. Disponível em: <https://solstar.com.br/2021/06/21/governo-lanca-programa-de-incentivo-a-energia-solar/#:~:text=%E2%80%9CPr%C3%B3%2Dsol%E2%80%9D%20foi%20o,%2C%20em%20Davos%2C%20em%202020>. Acesso em: 18 fev. de 2022.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. *Fundamentos de refino de petróleo: tecnologia e economia* / Alexandre Szklo, Victor Cohen Uller, Marcio Henrique P. Bonfá (Org.). – 3 ed., atual e ampl. – Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

TANABE, A. M. *Capim-elefante como uma fonte renovável para produção de energia*. Toledo, 2017. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Toledo, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Bioenergia, Toledo, 2017.

THEODOSIOU, G., STYLOS, N., KORONEOS, C. Integration of the environmental management aspect in the optimization of the design and planning of energy systems, *Journal of Cleaner Production*, v. 106, 2015, p. 576-593, 2015.

TOMATIS, M., JESWANI, H. K., STAMFORD, L., & AZAPAGIC, A. Assessing the environmental sustainability of an emerging energy technology: Solar thermal calcination for cement production. *Science of the Total Environment*, v. 742, p. 140510, 2020.

TREGAMBI, C., SOLIMENE, R., MONTAGNARO, F., SALATINO, P., MARROCCOLI, M., IBRIS, N., & TELESKA, A. Use of solar energy to sustain limestone calcination for ordinary Portland cement production. *In: Joint Meeting of the German and Italian Sections of The Combustion Institute*. 2018.

URBANO, J. J. *Estudo numérico do processo de calcinação da Gipsita em fornos rotativos com aquecimento indireto a óleo*. Recife, 2013. 120 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2013.

VERDÉLIO, A. Presidente aprova mistura de 10% de biodiesel no óleo diesel: Teor da mistura vale para todo o ano de 2022. *Agência Brasil*, Brasília, 17 dez. de 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-12/presidente-aprova-mistura-de-10-de-biodiesel-no-oleo-diesel>. Acesso em: 19 jan. de 2022.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 33, p. 261-314, mar. 2011

ZARGHAMI, M., SZIDAROVSKY, F., *Multicriteria Analysis: Applications to water and Environment Management*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

## APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E ALTERNATIVAS DE FONTES ENERGÉTICAS PARA MATRIZ DO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL (APL) DE GESSO DE PERNAMBUCO

Este questionário tem como propósito servir de instrumento de coleta de dados para contribuir no desenvolvimento de uma dissertação de mestrado de Engenharia de Produção a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco pelo discente Kelvin Everton Santos de Melo.

De maneira que, o principal objetivo deste trabalho visa compreender e avaliar as potencialidades de diversificação da matriz energética do Arranjo Produtivo Local (APL) do gesso do Araripe, localizado no sertão do estado de Pernambuco. Para tanto, por meio deste formulário, pretende-se captar a percepção de um colaborador que atue no setor gesseiro da região em questão, no que se refere aos critérios de seleção e alternativas de matriz energética brasileiras pertinentes para o Polo.

Tomando por base uma revisão da literatura, encontram-se destacados alguns critérios percebidos como importantes para seleção de fontes de energia associados principalmente ao beneficiamento do gesso.

A avaliação das alternativas será feita através do julgamento do respondente deste questionário utilizando-se a *Escala Likert* como instrumento de apoio à decisão para representar uma escala que aponte a intensidade de cada critério, de acordo com a tabela abaixo:

INTENSIDADE DO CRITÉRIO	Muito Baixo	Baixo	Razoável	Alto	Muito Alto
VALOR NUMÉRICO	1	2	3	4	5

Assim, os critérios pré-determinados são:

**C1- Custo Total:** Contabilização de todos os custos operacionais, de instalação, adaptação e manutenção envolvidos na inserção da matriz energética no processo de produtivo de calcinação da gipsita;

**C2 - Manutenção:** Esforços para manter a disponibilidade de funcionamento do forno;

**C3 - Vida útil:** Tempo médio de pleno funcionamento dos fornos de calcinação;

**C4 - Capacidade Produtiva:** Volume de gesso gerado em metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h), quilos por hora (kg/h), ou, toneladas por hora (t/h);

**C5 - Consumo:** Volume, ou seja, quantitativo consumido da fonte energética por tonelada de gesso produzido;

**C6 - Eficiência térmica:** Grau de desempenho do forno através da troca de calor com a gipsita, ou seja, transformação de calor em trabalho;

**C7 - Disponibilidade:** Esforços logísticos para efetiva e rápida garantia de acessibilidade da fonte energética independentemente das circunstâncias;



**C8 - Impacto Ambiental:** Nível de alterações das condições climáticas, geológicas e biodiversidade local gerado com a implantação e utilização da fonte energética.

**C9 - Impacto Social:** Nível de percepção humana referente aos efeitos, implicações e viabilidades geradas na sociedade local com implantação e utilização da fonte energética.

**C10 - Políticas públicas e incentivos fiscais:** Promoção de ações, planos e diretrizes governamentais que contribuem na adesão do tipo de fonte energética como, por exemplo, redução ou isenção de encargos fiscais.

Para as alternativas de matriz energética dispostas no quadro abaixo, indique, na sua opinião, o nível de desempenho das fontes de energia para o APL de Gesso de Pernambuco em cada um dos critérios considerados:

Critérios	Alternativas							
	Lenha	Lenha Picada	Coque de Petróleo	Óleo Diesel	Óleo BPF	Capim elefante	Gás Natural	Energia Solar
Custo Total								
Manutenção								
Vida Útil								
Capacidade Produtiva								
Consumo								
Eficiência térmica								
Disponibilidade								
Impacto Ambiental								
Políticas de incentivos fiscais								

Utilizando-se da tabela abaixo, na sua opinião, quais outros critérios e alternativas você consideraria para o APL de Gesso de Pernambuco:

Critérios	Alternativas			
C10 -				
C11 -				
C12 -				

Diante dos critérios citados neste formulário, indique uma hierarquia dos critérios quanto ao grau de importância, do mais importante ao menos importante, preenchendo os espaços em branco com suas respectivas siglas:

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Mais importante**



**Menos importante**

