

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS
NÍVEL MESTRADO**

KATIA MAETE RODRIGUES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DE UMA
EMPRESA PETROQUÍMICA COM UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO DA DISTÂNCIA
DIRECIONAL**

São Leopoldo

2024

KATIA MAETE RODRIGUES DA SILVA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DE UMA
EMPRESA PETROQUÍMICA COM UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO DA DISTÂNCIA
DIRECIONAL

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2024, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Antônio Sartori Piran

São Leopoldo

2024

KATIA MAETE RODRIGUES DA SILVA

S586a Silva, Katia Maete Rodrigues da.
Avaliação da eficiência ambiental : estudo de caso de uma empresa petroquímica com utilização da função da distância direcional / Katia Maete Rodrigues da Silva. – 2024.
115 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2024.

“Orientador: Prof. Dr. Fabio Antônio Sartori Piran”.

1. Indústria petroquímica. 2. Eficiência ambiental. 3. Análise de Envoltória de Dados (DEA). 4. Função da Distância Direcional (DDF). I. Título.

CDU 658.5

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DE UMA
EMPRESA PETROQUÍMICA COM UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO DA DISTÂNCIA
DIRECIONAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2024, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Frank de Souza Gomes

Prof.^a Dr.^a Maria Isabel Wolf Motta Morandi

Prof.^a Dr.^a Cristina Orsolin Klingenberg

Prof. Dr. Leandro Gaus

AGRADECIMENTOS

A caminhada é sempre cheia de desafios e as vezes muito íngreme. Mas o maior desafio é vencer nós mesmos, a “inércia que quer dominar o sistema”. Nas horas difíceis, onde muitas vezes colocamos em dúvida nossas capacidades, é fundamental contar com apoio das pessoas que fazem parte da nossa vida.

Começo agradecendo à minha família, meu esposo Neuton e meus filhos Guilherme e Brenda, que entenderam minha ausência e respeitaram esses momentos, compreendendo o quanto essa conquista é importante para mim. O apoio e a compreensão deles permitiram que meu tempo de estudo fosse com maior dedicação e qualidade.

Ao meu irmão Noleoner que me incentivou a nessa jornada e não me deixou esquecer da minha capacidade! Sei que nossa Mãe e nossa avó estão aplaudindo orgulhosa nossas conquistas com aquele sorriso no rosto.

Agradeço ao meu orientador, Professor Fábio Antônio Sartori Piran, sempre atento, pronto para me ajudar e apoiar, encorajando e validando (ou não) as nossas escolhas. Tenho certeza de que sem a sua ajuda não teria conseguido superar vários obstáculos e entregar esse trabalho com a qualidade que julgo estarmos entregando.

Nessa oportunidade, agradecer sinceramente aos membros da banca pela oportunidade de defender meu trabalho. Agradeço o valioso tempo que será dedicado à avaliação do meu trabalho e pelos valiosos insights e feedback que serão fornecidos. Suas perguntas desafiadoras e orientações me ajudarão a ampliar meus conhecimentos e a aprimorar minha pesquisa.

Agradeço aos especialistas que concordaram em colaborar com essa pesquisa, o conhecimento mais específico de cada um, com certeza trouxe mais robustez segurança das informações contidas no estudo.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos amigos e colegas do GMAP | UNISINOS, por me ensinar todas as ferramentas na execução da pesquisa, as dúvidas, o apoio nos detalhes. Gente, muito obrigada, tenho maior orgulho de fazer parte desse time.

RESUMO

A eficiência ambiental pode contribuir para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos, buscando a otimização dos recursos naturais e a redução do impacto negativo das atividades humanas sobre o meio ambiente. Avaliar a eficiência ambiental das empresas é relevante para promover a responsabilidade corporativa e incentivar práticas mais sustentáveis, visando a preservação dos ecossistemas e o bem-estar das gerações presentes e futuras. Esse estudo tem como objetivo avaliar a eficiência ambiental de uma empresa Petroquímica em um período de cinco anos (2018 a 2022). É analisado a eficiência ambiental de seis plantas produtivas da empresa, agrupadas por tipo de produto produzido (químico, polietileno e polipropileno). A Função da Distância Direcional (DDF), que é uma variação da Análise Envoltória de Dados (DEA), é utilizada para calcular a eficiência ambiental, levando em consideração a geração de resultados desejáveis e indesejáveis, associados aos processos de produção. Os resultados destacam que a eficiência mediana da planta de produção de químicos é de 94,80%. A eficiência mediana das três plantas de polietileno é de 51,30%, 35,40% e 50,20%, respectivamente. Além disso, detectou-se que a tecnologia Slurry, que é usada na produção de polietileno, exerce impactos ambientais negativos. Por fim, verificou-se que a eficiência mediana das duas plantas de polipropileno é de 96,20% e 94,20%, respectivamente. Esta pesquisa traz uma contribuição para a academia ao ampliar os estudos sobre a aplicação da DEA com a DDF na indústria petroquímica. Além disso, oferece insights valiosos para os gestores ao auxiliá-los na avaliação dos resultados das plantas, fornecendo uma base para tomadas de decisão de melhoria contínua e investimentos futuros.

Palavras-chave: Indústria Petroquímica; Eficiência Ambiental; Análise Envoltória de Dados; DEA; Função da Distância Direcional; DDF.

ABSTRACT

Environmental efficiency can contribute to ensuring the sustainability of productive systems by seeking the optimization of natural resources and the reduction of the negative impact of human activities on the environment. Evaluating the environmental efficiency of companies is relevant to promoting corporate responsibility and encouraging more sustainable practices, aiming at preserving ecosystems and the well-being of present and future generations. This study aims to evaluate the environmental efficiency of a Petrochemical company over a five-year period (2018 to 2022). The environmental efficiency of six productive plants of the company is analyzed, grouped by type of product produced (chemical, polyethylene, and polypropylene). The Directional Distance Function (DDF), which is a variation of Data Envelopment Analysis (DEA), is used to calculate environmental efficiency, taking into account the generation of desirable and undesirable outcomes associated with production processes. The results highlight that the median efficiency of the chemical production plant is 94.80%. The median efficiency of the three polyethylene plants is 51.30%, 35.40%, and 50.20%, respectively. Furthermore, it was found that the Slurry technology, used in polyethylene production, has negative environmental impacts. Finally, it was found that the median efficiency of the two polypropylene plants is 96.20% and 94.20%, respectively. This research contributes to academia by expanding studies on the application of DEA with DDF in the petrochemical industry. Additionally, it offers valuable insights for managers by assisting them in evaluating plant results, providing a basis for continuous improvement decision-making and future investments.

Keywords: Petrochemical Industry; Environmental Efficiency; Data Envelopment Analysis; DEA; Directional Distance Function; DDF.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de pesquisa	23
Quadro 2 - Estudos Indústria Petroquímica incluídos na pesquisa.....	26
Quadro 3 - Termos na literatura para desenvolvimento sustentável.....	32
Quadro 4 - Estudos avaliando a eficiência ambiental por meio da DEA.....	36
Quadro 5 - Classificação da pesquisa	50
Quadro 6 - Plantas e produtos da indústria em estudo.....	54
Quadro 7 - Grupo de plantas por produtos	56
Quadro 8 - Lista das variáveis dos artigos selecionados	57
Quadro 9 - Especialistas da área.....	59
Quadro 10 - Detalhamento das variáveis da Indústria Petroquímica.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis	62
Tabela 2 - Eficiência unidade químicos – P1	66
Tabela 3 - Eficiência das plantas de polietileno P2-P3-P4.....	68
Tabela 4 - Matriz dos resultados teste Mann-Whitney	73
Tabela 5 - Análise comparativa – resultado do teste de hipótese.....	73
Tabela 6 -Eficiência da unidade de polipropileno – P5-P6.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Funções de distância	45
Gráfico 2 - Índice de eficiência da planta P1.....	67
Gráfico 3 - Eficiência das plantas de polietileno P2 – P3 – P4	69
Gráfico 4 - Eficiência da planta de polietileno P2.....	70
Gráfico 5 - Eficiência da planta de polietileno P3.....	71
Gráfico 6 – Eficiência da planta de polietileno P4	72
Gráfico 7 – Mediana da eficiência – plantas polietileno	74
Gráfico 8- Eficiência das plantas de polipropileno P6-P7	76
Gráfico 9 - Metas por plantas consumo de água (m ³).....	77
Gráfico 10 - Metas por plantas consumo de energia (GJ)	77
Gráfico 11 - Metas por plantas geração de efluentes (m ³).....	78
Gráfico 12- Metas por plantas geração de resíduos (Kg ³)	78
Gráfico 13 - Metas produção (Kg).....	79
Gráfico 14 - Metas por plantas emissões de gases (tCO ₂)	79
Gráfico 15 – Meta por produto consumo de água (m ³)	80
Gráfico 16 - Meta por produto consumo de energia (GJ).....	80
Gráfico 17 - Meta por produto geração de efluentes (m ³).....	81
Gráfico 18 - Meta por produto geração de resíduos (Kg).....	82
Gráfico 19 - Meta por produto produção (t).....	82
Gráfico 20 - Metas por produto emissões de gases (tCO ₂).....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da cadeia petroquímica	20
Figura 2 - Busca e elegibilidade da pesquisa	24
Figura 3 - Etapas da pesquisa de estudo de caso.....	51
Figura 4 - Método de Trabalho	51
Figura 5 - Procedimentos de análise de dados.....	64

LISTA DE SIGLAS

- CRS Constant Returns to Scale (Retorno Constante de Escala).
- DEA Data Envelopment Analysis (Análise Envoltória de Dados).
- DDF Directional Distance Function (Função de Distância Direcional).
- DMU Decision Making Unit (Unidades de Tomada de Decisão).
- WBCSD World Business Council for Sustainable Development (Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável).
- NOCs National Oil Companies (Empresas Nacionais de Petróleo).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3 JUSTIFICATIVA	22
1.4 DELIMITAÇÕES.....	29
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	30
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 EFICIÊNCIA AMBIENTAL.....	31
2.2 ESTUDOS SOBRE EFICIÊNCIA AMBIENTAL NA MANUFATURA COM A UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA) E DA FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DIRECIONAL (DDF).....	34
2.3 FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DIRECIONAL (DDF).....	43
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	49
3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	49
3.2 MÉTODO DE TRABALHO	51
3.3 PROJETO DO MODELO DEA/DDF	54
3.4 COLETA DE DADOS	62
3.5 ANÁLISE DOS DADOS.....	63
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DA PLANTA DE QUÍMICOS – P1	66
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS PLANTAS DE POLIETILENO P2-P3-P4.....	67
4.3 ANÁLISE DO IMPACTO DA TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO NA EFICIÊNCIA – PLANTAS DE POLIETILENO (P2-P3-P4)	72
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS PLANTAS DE POLIPROPILENO P5-P6.....	75
4.5 ANÁLISE DAS METAS E GANHOS POR PLANTA.....	76
4.5.1 Análise das metas e ganhos por tipo de produto (grupos de análise).....	80
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	84

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Segundo a atualização climática anual da Organização Meteorológica Mundial, existe uma probabilidade de 66% de que a temperatura do planeta suba acima de 1,5 graus Celsius em relação aos níveis pré-industriais por pelo menos um ano, no período de 2023 a 2027 (Omm, 2023). As temperaturas globais têm aumentado rapidamente devido à queima contínua de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás, e essa tendência persiste (Omm, 2023). Eventos naturais e atividades humanas, incluindo as atividades industriais e econômicas, contribuem para o aumento da temperatura média global. A mudança é causada principalmente por um aumento de gases de “efeito estufa”, como o dióxido de carbono (CO₂).

Em um país em desenvolvimento, o desafio é encontrar maneiras de conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental e social, o que é conhecido como desenvolvimento sustentável (Sueyoshi; Goto, 2012). As preocupações ambientais, como a adoção de práticas conscientes de uso da água e a redução das emissões poluentes durante os processos produtivos, têm recebido crescente ênfase na literatura científica (Muñoz-Villamizar et al., 2018). Esse destaque se deve ao risco iminente de esgotamento da fonte natural de água doce do planeta, bem como aos sinais emitidos pela biosfera em relação à sua capacidade de absorção de resíduos e poluentes. Neste contexto está inserida a indústria petroquímica.

A indústria petroquímica, como subsetor da indústria química, é diretamente impactada pelo crescimento da economia global, pelo aumento populacional e tecnológico, que resultam em uma demanda crescente por produtos petroquímicos. Esses produtos e seus derivados estão presentes no cotidiano da sociedade, como, por exemplo, os plásticos e fertilizantes. No entanto, o uso de produtos químicos tem um impacto significativo sobre o meio ambiente, incluindo a emissão de gases e poluentes atmosféricos, além da demanda por água (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012). Os produtos químicos também podem contribuir para avanços ambientais em outros setores. Embora as restrições ambientais sejam consideradas, a principal preocupação relacionada ao setor químico e petroquímico é a emissão direta de CO₂, que pode levar a graves consequências climáticas (IEA, 2018a).

O setor petroquímico faz parte do amplo portfólio de produtos químicos. As principais características desse setor são: i) matérias-primas de origem orgânicas, como petróleo e gás natural; ii) custos e receitas altamente voláteis, pois os produtos e insumos principais serem commodity (matérias-primas ou produtos básicos que são comercializados em mercados globais e têm seus preços determinados pela oferta e demanda). Dessa forma, a determinação da distribuição da oferta é influenciada por diversos fatores, como logística e preço. Os valores praticados, por sua vez, tendem a ser bastante uniformes em todo o mercado consumidor, sendo estabelecidos a partir do equilíbrio entre a oferta e a demanda global, bem como da acessibilidade dos produtos (Hallot, 2019).

As empresas petroquímicas buscam pela competitividade mediante reduções de custos de produção, investimentos em novas tecnologias, padrão de qualidade dos produtos e pela melhoria da eficiência. A formação de clusters pelas indústrias petroquímicas é considerado uma estratégia eficaz da organização industrial que contribui efetivamente para o desenvolvimento e aumento da competitividade. O apoio do estado com benefícios e subsídios para novos empreendimentos, com a busca de novos mercados internos e de exportação, contribui para que as empresas petroquímicas se mantenham competitivas (Gabdullina et al., 2022).

O total de faturamento líquido gerado pela indústria química brasileira em 2022 foi de U\$\$ 187 bilhões, em relação a 2021 obteve um aumento de 24%, um faturamento de 3,1% sobre o valor total do PIB (Abiquim, 2022). Os produtos químicos, em 2020, ocuparam a 3ª maior participação no PIB industrial. Na balança comercial de produtos químicos no período de 2021 e 2022, a importação teve um crescimento de 36,1% as exportações de 22,1%, com um déficit em 2022 de 40,3% totalizando U\$\$ 64,8 bilhões. A indústria química mundial acumula um faturamento estimado em U\$\$ 4.732,1 bilhões, onde o Brasil ocupa a sexta posição entre os 10 maiores faturamentos das indústrias químicas mundiais (Abiquim, 2022). A estimativa de crescimento para o setor dos químicos primários ultrapassará 1 bilhão de toneladas (Bt) em 2050 e a demanda por químicos primários deve crescer por volta de 30% até 2030 (IEA, 2018a).

Diante da crescente atenção dada à preservação ambiental e à qualidade de vida, os países desenvolvidos têm reconhecido cada vez mais a importância de

adotar práticas ambientais responsáveis para reduzir a poluição e os resíduos gerados a partir da produção industrial. Por conseguinte, o efeito que todos os tipos de organizações têm sobre o meio ambiente deve ser identificado e analisado sob a ótica de reduzir o uso excessivo dos recursos e as emissões de poluentes (Coli; Nissi; Rapposelli, 2011). À medida que uma empresa amplia sua produção, é possível que isso resulte em um aumento potencial do impacto ambiental gerado. Manter um equilíbrio entre o aumento da produção e a conformidade ambiental nas operações é uma tarefa complexa (Ramli; Munisamy; Arabi, 2013a). Partindo desse ponto, modelos e técnicas matemáticas são utilizadas para medir a eficiência e permitindo que as empresas petroquímicas analisem seu desempenho em relação aos concorrentes (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012).

Por exemplo, o modelo de metafronteira estocástica de dois estágios de Huang et al., (2018) é aplicado em estudos com objetivo de medir o desempenho ambiental. Também é mencionado o índice de produtividade ambiental para usinas de energia de combustível fóssil, que considera mudanças de longo prazo, sendo útil para estudar fatores de influência, como mudanças nas políticas regulatórias (Lu et al., 2019). Além disso, o índice de desempenho ambiental (EPI) apresenta-se como um meio importante para avaliar a eficiência ambiental, podendo variar desde abordagens simples até abordagens mais complexas. Outro estudo aborda uma revisão da literatura sobre indicadores ambientais, que consideram indicadores em termos absolutos, relativos, prospectivos (previsões) e estatísticos (análises estatísticas), entre outros (Chen; Jia, 2017).

A Análise Envoltória de Dados é uma das técnicas utilizadas para avaliar a eficiência ambiental das indústrias de transformação. Por exemplo, a DEA foi aplicada em 78 empresas Petrolíferas Nacionais (NOCs) e das empresas petroleiras internacionais privadas, no período de 3 três anos, com objetivo de avaliar a ineficiência das NOCs em termos de receita (Eller; Hartley; Medlock, 2011). A literatura aponta, entre outros, estudos empíricos com objetivo principal de avaliar a eficiência ambiental das províncias italianas para o ano de 2004 (por exemplo, Coli; Nissi; Rapposelli, 2011). Para isso, a técnica DEA foi adaptada ao contexto do desempenho ambiental, considerando três grupos de variáveis, sendo: entradas, saídas e saídas indesejáveis. Além disso, foi proposta uma variante da programação linear para o estudo e incluiu-se a presença de danos ambientais na

análise (Coli; Nissi; Rapposelli, 2011). Neste sentido, destaca-se que a utilização de saídas indesejadas (por exemplo, geração de poluentes) é um processo recorrente nas análises de eficiência ambiental.

Entre outros, estudos sobre a eficiência na literatura utilizam a programação linear com incremento para incorporar danos ambientais. Alguns estudos fazem análises longitudinais com foco nas mudanças ambientais e econômicas e nas estratégias das empresas para situarem seus processos no contexto de negócios mundiais (Geels, 2022).

Reconhecendo a relevância do tema, esta pesquisa dedica-se à análise da eficiência ambiental na indústria de transformação (considerando, especificamente, a indústria Petroquímica). Além disso, busca utilizar o modelo da Função da Distância Direcional (DDF) para tratar as saídas indesejadas. Com o foco no setor petroquímico, busca-se identificar oportunidades de melhoria nos processos produtivos e promover propostas de práticas mais sustentáveis.

1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA

O termo eficiência ambiental foi criado pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) em 1992 na publicação "Changing Course". O termo se tornou sinônimo de uma filosofia orientada para o desenvolvimento sustentável que busca minimizar o impacto ambiental, maximizando a eficiência dos processos de produção (Grigoroudis; Petridis, 2018). Outro estudo aponta que o conceito de eficiência ambiental originou do termo ecoeficiência em 1990 (Prasaja; Hadiyanto, 2018). O WBCSD o *World Business Council for Sustainable Development* (Conselho Empresarial Mundial para Sustentabilidade) e OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), expandiram a definição de ecoeficiência para incluir a relação entre os recursos consumidos e a produção de serviços públicos. Dessa forma, a eficiência ambiental é definida como a relação entre o valor dos produtos ou serviços produzidos e a carga ambiental resultante (Han et al., 2022). Embora a importância de uma produção mais sustentável tenha sido amplamente discutida, há uma escassez de estudos empíricos que investiguem as estratégias e práticas ambientais adotadas por empresas desse setor.

A literatura aponta que não existe um conceito único para eficiência ambiental, o que pode dificultar a estimativa de eficiência, pois a definição do conceito pode variar dependendo do contexto. Além disso, como a eficiência é medida pode influenciar a definição e interpretação dos resultados (Grigoroudis; Petridis, 2018). Os diferentes conceitos para eficiência ambiental definem como, o impacto negativo no meio ambiente durante o processo de produção, que pode ser avaliado com o grau de poluição que a empresa controla durante o processo produtivo (Lu et al., 2019). Uma parte significativa das pesquisas, definem eficiência ambiental, com a produção com máximo resultado econômico possível, usando o mínimo de recursos, minimizando os impactos ambientais. Esses estudos destacam ainda o aumento da produção desejável (consumo de energia elétrica) ou reduz a produção indesejável (emissões de carbono) (Woo et al., 2015) (Zofío; Prieto, 2001).

A falta de uma definição única e amplamente aceita do conceito de eficiência ambiental pode levar a vários problemas, tais como, dificuldade em comparar a eficiência ambiental de diferentes setores ou empresas, falta de transparência e prestação de contas, pois as empresas podem usar diferentes definições de eficiência ambiental para destacar seu desempenho, o que dificulta a comparação e avaliação externa. Além disso, existem riscos para a credibilidade e confiança das políticas ambientais, pois as autoridades governamentais podem ter dificuldade em monitorar e avaliar o desempenho ambiental das empresas, especialmente em contextos internacionais. Assim, ainda existe oportunidade de avançar na discussão do conceito de eficiência ambiental nesse contexto, com poucos artigos disponíveis para consulta. A análise das bases de dados revelou a ausência de artigos que abordassem a temática do benchmarking interno nas indústrias petroquímica e poucos consideram as saídas indesejadas (Chen; Han; Zhu, 2017). Portanto, é importante explorar a eficiência ambiental como uma abordagem na manufatura para avaliar a performance ambiental dessas indústrias petroquímicas, visando trazer estudos na área com análise mais ampla no sentido de considerar as saídas indesejadas na avaliação da eficiência ambiental

A eficiência ambiental na indústria petroquímica está em reduzir o consumo de matéria-prima aumentar a produção tanto na qualidade ambiental como no volume produzido, manter uma redução nas emissões, garantindo assim a melhor

eficiência ambiental (Queiroz; Sampaio; Sampaio, 2020). Os indicadores mais relevantes para garantia da competitividade são: perdas físicas dos produtos, taxa de utilização dos ativos e eficiência energética da planta (Machado et al., 2022). No entanto, as restrições ambientais impostas para aumentar a qualidade dos produtos do setor petrolífero motivam o desenvolvimento tecnológico das refinarias. Para controlar as operações e gestão, regulamentos são estabelecidos. Estes regulamentos exigem que mais investimentos sejam feitos em insumos, como energia, água e trabalho, para reduzir os contaminantes. No entanto, isso também resulta em um aumento na geração de contaminantes como efluentes e gases de efeito estufa durante o processo de produção (Flach et al., 2017).

A cadeia petroquímica é ampla e diversificada, os produtos fabricados pelo setor podem ser classificados em (Bndes, p. 75-104, 2005).

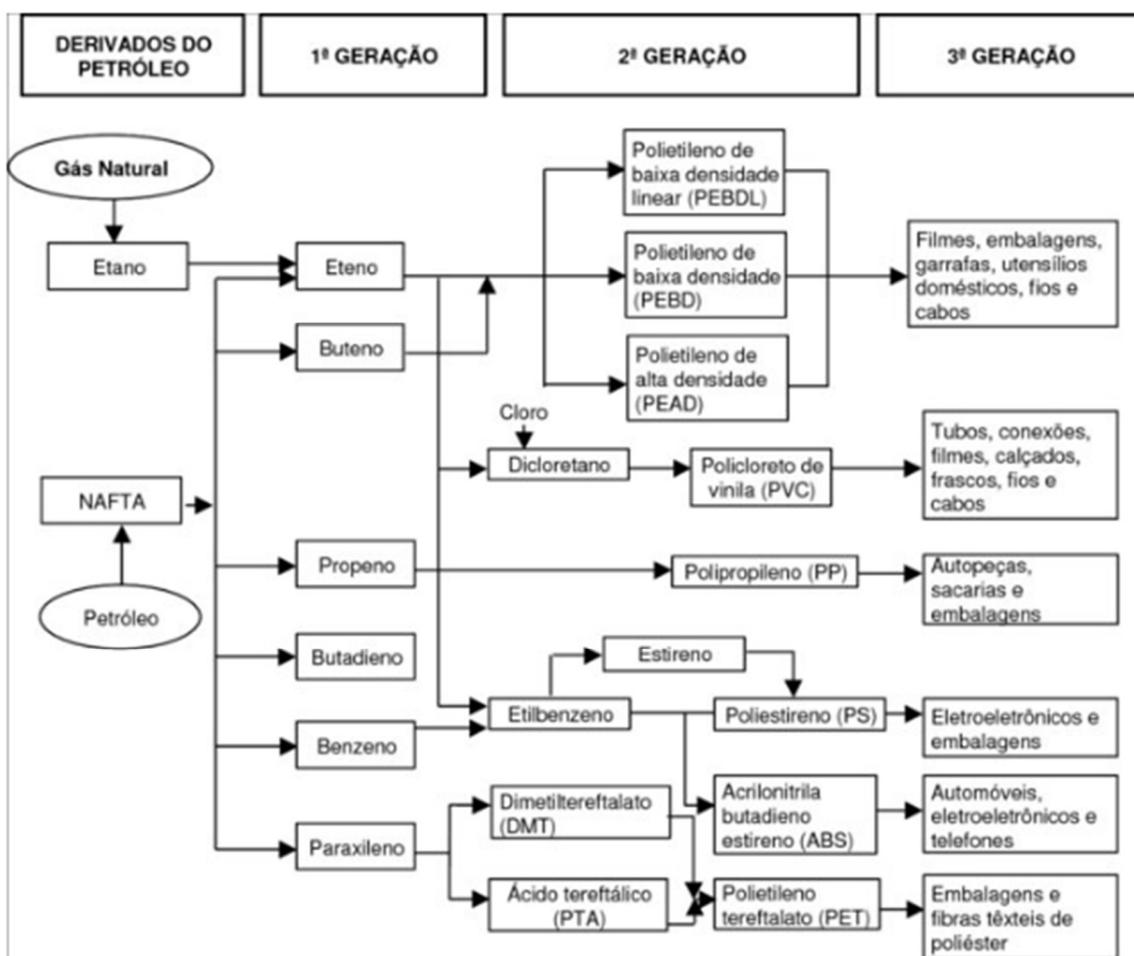
- i) Primeira geração – refere-se às empresas que produzem produtos petroquímicos básicos, obtidos por meio da primeira transformação de substâncias derivadas do petróleo (tais como nafta, gás natural, etano, entre outros) utilizando processos químicos como craqueamento a vapor, pirólise, reforma a vapor, reforma catalítica, entre outros. Os principais produtos resultantes incluem olefinas, como eteno, propeno e butadieno, além de aromáticos como benzeno, tolueno e xilenos. Adicionalmente, essa geração também produz solventes e combustíveis secundários;
- ii) Segunda Geração - Essas empresas fabricam plásticos como polietileno e polipropileno, além de produtos intermediários que vêm do processamento de substâncias básicas. Essas substâncias incluem PVC, acetato de vinila, TDI, óxido de propeno, entre outras. Esses produtos intermediários são transformados em produtos finais, como diferentes tipos de plásticos, resinas e materiais para fazer itens como fibras sintéticas, borrachas e tintas;
- iii) Terceira geração - estas são as empresas que transformam os materiais para criar embalagens, peças e utensílios utilizados em setores como alimentação, construção civil, elétrico, eletrônico, automotivo, entre outros. Geralmente, essas empresas de

transformação estão localizadas perto do lugar onde as pessoas compram e usam esses produtos.

Produtos químicos industriais como olefinas leves (etileno e propileno) e aromáticos (benzeno, tolueno e xilenos), também conhecidos como "produtos químicos de alto valor", são responsáveis por cerca de 90% da produção química mundial. Eles são produzidos pelo que é conhecido como o "setor químico e petroquímico", que tem suas raízes na indústria de petróleo e gás. A

apresenta a cadeia de uma indústria petroquímica da matéria-prima até o produto final.

Figura 1 - Representação da cadeia petroquímica



Fonte: Abiquim (2015)

Embora o prefixo "petro" possa ser considerado redundante, a maioria dos produtos químicos industriais ainda depende do petróleo, gás natural ou carvão como matéria-prima e para fornecer energia durante o processo de produção. Essa dependência está enraizada nas práticas industriais convencionais, onde esses recursos fósseis são utilizados tanto como matéria-prima para a produção de produtos químicos quanto como fonte de energia durante os processos industriais. (Ilea, 2018).

Os processos industriais das refinarias usam água em abundância, o que conseqüentemente gera altas quantidades de efluentes, as empresas buscam a redução desse consumo mediante altas tecnologias, importante destacar o uso da energia como matéria-prima (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012; Ilea, 2018). Diante desse cenário, a eficiência no uso dos recursos não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também desempenha um papel essencial na minimização do impacto ambiental global dessas operações industriais.

Neste estudo, propõe-se analisar os índices de eficiência por meio da aplicação do modelo DEA com a Função da Distância Direcional (DDF), o que oferece benefícios na formulação de indicadores compostos, consolidando diversas métricas de desempenho em uma única medida. O DDF permite incluir indicadores desejáveis e indesejáveis sem a necessidade de ajuste ou normalização, mantendo as características originais dos dados (Macedo 2023, p.94).

O objeto de estudo desta pesquisa é a eficiência ambiental de plantas produtivas pertencentes a uma empresa Petroquímica. Assim, a pergunta central deste estudo é: como avaliar a eficiência ambiental do processo produtivo de uma empresa Petroquímica, considerando tanto as saídas desejadas quanto as saídas indesejadas ao longo do tempo?

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desse trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O estudo pretende avaliar a eficiência ambiental do processo produtivo de uma empresa Petroquímica, utilizando o modelo DEA com a Função da Distância Direcional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- i) Efetuar análise crítica dos estudos que avaliam a eficiência ambiental em empresas de manufatura com utilização da DEA e suas variações;
- ii) Identificar as tecnologias utilizadas na produção e analisar se essas tecnologias impactam na eficiência ambiental do processo produtivo;
- iii) Efetuar uma análise identificando as metas e ganhos em relação a possibilidade de aumento na geração das saídas desejadas e redução das saídas indesejadas do processo produtivo.

1.3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa busca realizar uma avaliação da eficiência ambiental do sistema produtivo de uma empresa petroquímica, levando em consideração suas saídas indesejadas, através da aplicação da Função da Distância Direcional (DDF - Directional Distance Function). Para alcançar esse propósito, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura, com busca de artigos nas bases de dados Scopus, Science Direct, Web of Science e Ebsco.host. Não foi estabelecido um limite temporal, uma vez que a área específica deste estudo possui uma quantidade limitada de publicações. Os termos utilizados na primeira busca foram selecionados com o propósito de abranger estudos na literatura que se concentrassem na avaliação da eficiência ambiental, levando em consideração as saídas indesejadas. No segundo grupo de busca, foram consideradas as palavras-chave visando direcionar a pesquisa para o propósito deste estudo, eficiência ambiental na manufatura, especificamente a indústria petroquímica. O Quadro 1 apresenta as

palavras chave e critérios definidos para a busca dos artigos enquanto os trabalhos que foram localizados na pesquisa são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 - Critérios de pesquisa

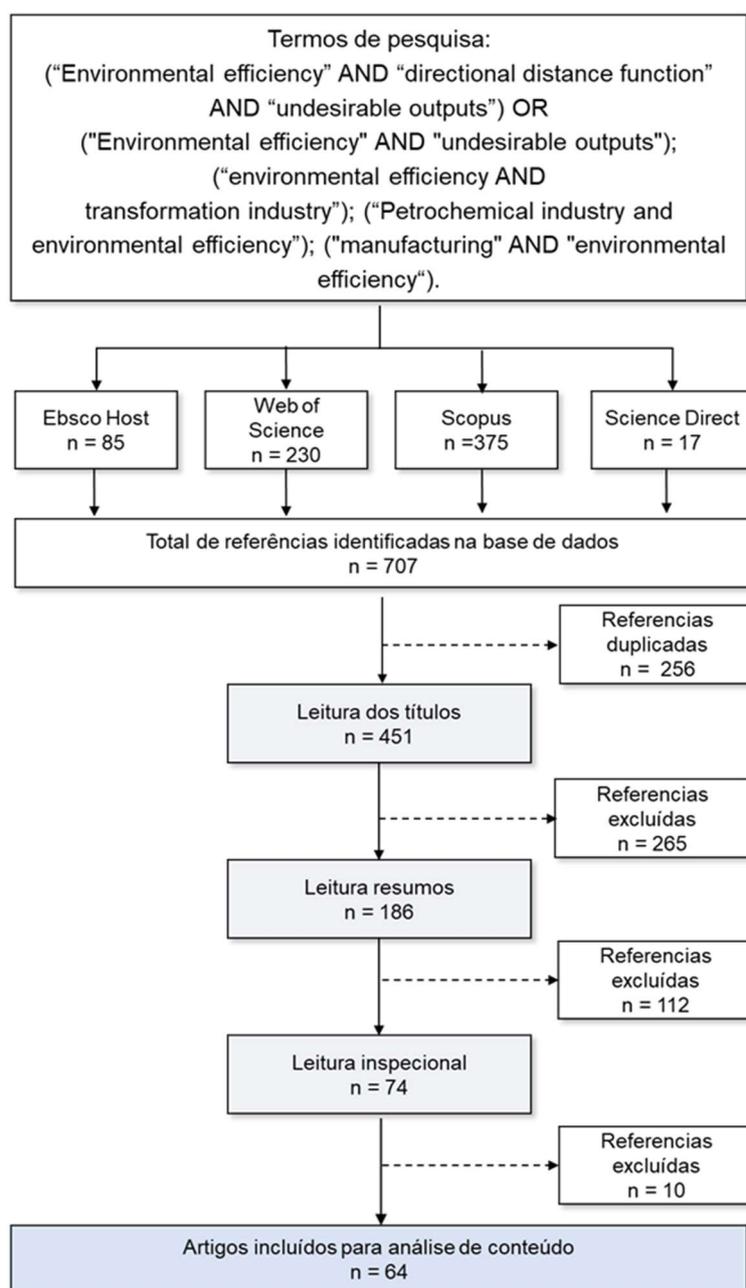
B A S E			
EBSCO	Web of Science	Scopus	Science direct
Busca 1. Foco na eficiência ambiental e distância direcional			
("Environmental efficiency" AND "directional distance function" AND "undesirable outputs") OR ("Environmental efficiency" AND "undesirable outputs")			
Busca 2. Foco na eficiência na indústria de manufatura			
("Environmental efficiency" AND "Transformation Industry")			
("Petrochemical industry" AND "Environmental efficiency")			
("Manufacturing" AND "Environmental Efficiency")			

Fonte: Elaborado peça autora

Os critérios de inclusão adotados consideraram materiais como artigos, livros e conferências em todas as áreas, nos idiomas inglês e português. Nos critérios de exclusão, foram considerados como não elegíveis os trabalhos redigidos em idiomas distintos do inglês e do português. O protocolo utilizado neste estudo está disponível no Anexo A. O escopo final desta pesquisa englobou um total de 64 artigos, nos quais foi conduzida uma análise de conteúdo. A

apresenta o processo para a busca e elegibilidade da presente pesquisa.

Figura 2 - Busca e elegibilidade da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora com base em Morandi; Camargo, (2015)

A seleção dos artigos para esta dissertação foi realizada em duas fases distintas, cada uma com critérios específicos de busca na literatura. Na primeira etapa, o foco foi em encontrar trabalhos que abordassem a eficiência ambiental e a função de distância direcional, considerando os artigos que utilizassem as saídas indesejadas. Na segunda etapa, a busca concentrou-se em artigos que tratassem da eficiência ambiental na manufatura, com especial ênfase na indústria petroquímica. Essa abordagem metodológica permitiu obter uma seleção de artigos mais precisa e alinhada com o escopo e os objetivos desta dissertação. Neste

contexto, as buscas realizadas resultaram em um total de 707 artigos. Após a exclusão de 256 artigos duplicados, obteve-se um saldo de 451 artigos para análise dos títulos, dos quais 265 foram excluídos por estarem fora do escopo do estudo. Isso levou a um saldo de 186 artigos para a leitura dos resumos, e desses, 112 foram excluídos devido a não atenderem aos critérios de inclusão, resultando, portanto, em 74 artigos selecionados e incluídos no presente trabalho. Além disso, após leitura inspeccional mais 10 trabalhos foram descartados restando 64 artigos incluídos no corpo de análise, a lista total dos artigos pode ser consultada no Apêndice 4 dessa dissertação. Essa seleção rigorosa e sistemática de artigos contribuiu para garantir a relevância e consistência das fontes utilizadas nesta dissertação.

No contexto acadêmico, esta pesquisa busca preencher uma lacuna existente na literatura sobre a eficiência ambiental no setor de empresas de manufatura, em particular, nas indústrias petroquímicas. Na revisão bibliográfica realizada neste estudo, constatou-se que nenhum dos artigos abordados trata da análise da eficiência ambiental nas indústrias petroquímicas por meio do benchmarking interno.

Embora a importância de uma produção mais sustentável tenha sido amplamente discutida, há uma escassez de estudos empíricos que investiguem as estratégias e práticas ambientais adotadas por empresas desse setor. Neste estudo, 10 dos 64 artigos estavam diretamente relacionados à indústria petroquímica. A Quadro 2 apresenta os artigos referente a indústria Petroquímica e as refinarias que foram considerados nessa dissertação.

Quadro 2 - Estudos Indústria Petroquímica incluídos na pesquisa

Título	Autor	Ano
Classification and Disposal Strategy of Excess Sludge in the Petrochemical Industry	Guo, L.; Zhang, H.; Jiang, X.; Wang, Y.; Liu, Z.; Fang, S.; Zhanf, Z.	2019
Conflicts between economic and low-carbon reorientation processes: Insights from a contextual analysis of evolving company strategies in the United Kingdom petrochemical industry (1970–2021)	Geels, F.W.	2022

Decisões De Investimento E Movimentos De Reestruturação: Um Modelo De Análise Da Indústria Petroquímica	Teixeira, T.; Guerra, O.; Cavalcante, L.R.	2009
Efficiency in Brazilian Refineries Under Different DEA Technologies	Francisco, C.A.C.; Almeida, M.R.; Silva, D.R.	2012
Empirical Evidence on The Operational Efficiency Of National Oil Companies	Eller, S.L.; Hartley, P.; Medlok, K.B.	2007
Energy and environmental efficiency evaluation based on a novel Data Envelopment Analysis: An application in petrochemical industries	Chen, Y.; Han, Y.; Zhu, Q.	2017
Estimating the efficiency of American petroleum refineries under varying assumptions of the disposability of bad outputs	Mekaroonreung, M.; Johnson, A.L.	2010
Promotion of Low-Carbon Economy through Efficiency Analysis: A Case Study of a Petrochemical Plant	Keivani, E.; Abbaspour, M.; Abedi, Z.; Ahmadian, M.	2020
State regulation measures and existing state strategy for the development of petrochemical industry in Russia	Gabdullina, G.K.; Mullagayanova, G.S.; Gafiyatov, I.Z.; Nygmetova, B.D.	2022
Thermal engineering method application for hazardous spent petrochemical catalyst neutralization	Mymrin, V.; Pedroso, A. M.; Ponte, H.A.; Ponte, M.J.J.; Alekseev, K.; Evaniki, D.; Pan, R.C.Y.	2016

Fonte: Elaborado pela autora.

A análise de eficiência ambiental nas indústrias petroquímicas, considerando as saídas indesejadas, tem sido pouco explorada na literatura científica, apesar de sua relevância crescente diante das preocupações ambientais (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012b; Mekaroonreung; Johnson, 2015a). Outro estudo teve como objetivo propor uma estratégia de classificação e disposição para o lodo excedente na indústria petroquímica, grande em quantidade, complexo em composição e altamente nocivo (Guo et al., 2019b). O método usado no estudo chamado de Lixiviação é um processo de extração ou dissolução de substâncias sólidas conforme o Padrão Chinês da Indústria de Proteção Ambiental HJ/299-2007 (Guo et al., 2019a). Além desses um estudo realizado nas indústrias petroquímicas

do Reino Unido é voltado para a gestão na busca de soluções para reduzir as emissões de gases.

Outros estudos fazem uma análise longitudinal da indústria petroquímica do Reino Unido, com foco nas mudanças nos ambientes médicos e sociopolíticos e nas estratégias da empresa nos últimos 50 anos (Geels, 2022b). No setor financeiro, existem estudos que propõem um modelo de análise das decisões de investimento na indústria petroquímica, enfatizando as principais variáveis que motivam e induzem os movimentos de reestruturação nesse setor (Teixeira; Guerra; Cavalcante, 2009). Outro estudo, avalia as medidas de regulamentação estadual e a estratégia estatal existentes para o desenvolvimento da indústria petroquímica na Rússia, bem como o impacto e as consequências dessa regulamentação refletidas nas atividades das corporações (Gabdullina et al., 2022b). Os artigos que abordam a eficiência ambiental nas refinarias foram selecionados para este estudo, com o propósito de ampliar o conjunto de documentos de pesquisa disponíveis e contribuir com informações relevantes para o contexto da indústria petroquímica (Eller; Hartley; Medlock, 2011b); (Mekaroonreung; Johnson, 2015a);

No entanto, ainda existe uma lacuna na discussão do conceito de eficiência ambiental nesse contexto, com poucos artigos disponíveis para consulta. A análise das bases de dados revelou a ausência de artigos que abordassem a temática do benchmarking interno nas indústrias petroquímica e poucos consideram as saídas indesejadas (Chen; Han; Zhu, 2017a). Portanto, é importante explorar a eficiência ambiental como uma abordagem na manufatura para avaliar a performance ambiental dessas indústrias petroquímicas, visando trazer estudos na área com análise mais ampla no sentido de considerar as saídas indesejadas na avaliação da eficiência ambiental.

Para as empresas os resultados deste estudo podem contribuir para a implementação de medidas efetivas de conservação de recursos naturais e minimização das emissões poluentes. A relevância da pesquisa no contexto atual, destacando a aplicação de modelos matemáticos, como o DEA com o modelo DDF, como uma abordagem importante para a análise da eficiência ambiental. Através dessa pesquisa, busca-se ampliar o entendimento sobre as medidas de eficiência

na indústria petroquímica e fornece uma base para futuras investigações e aprimoramento dos processos de produção nesse setor.

Esta pesquisa contribuirá para a compreensão e avaliação do desempenho ambiental de empresas petroquímicas e poderá fornecer insights para a melhoria da eficiência ambiental em outras indústrias. Evidenciar a importância da questão ambiental para uma análise mais realista do processo produtivo. Portanto, este estudo pretende contribuir para a compreensão de como as empresas petroquímicas podem melhorar sua eficiência ambiental e reduzir seu impacto negativo no meio ambiente. O estudo procura apontar dados que possibilite a empresa realizar desenvolvimento sustentável, economizar recursos e reduzir a emissão de poluentes, determinar os benchmarks interno em relação à eficiência ambiental, fornecer informações para análise e avaliação de eficiência e identificar a importância da variável ambiental para uma análise mais realista do processo produtivo.

1.4 DELIMITAÇÕES

Com a finalidade de deixar explícitas as abrangências e limites deste trabalho, esta seção abordará as delimitações desta dissertação, a qual utilizou a função de distância direcional considerando saídas indesejadas para avaliar a eficiência ambiental em uma empresa petroquímica.

O propósito desta pesquisa é investigar a eficiência ambiental em uma indústria petroquímica, empregando o modelo DEA com a função da distância direcional. Optou-se pela utilização da DDF como técnica para a medição da eficiência, descartando outras alternativas disponíveis. Não se pretende aqui aprofundar nos detalhes dos processos produtivos, mas sim estabelecer uma comparação entre as operações das diferentes plantas com base nos resultados de eficiência e testes estatísticos. As análises serão conduzidas considerando a média dos resultados de eficiência, evitando uma abordagem mensal. As considerações ou justificativas para os resultados de baixa eficiência serão embasadas nos relatórios da empresa em análise. Esse trabalho não pretende aprofundar-se nas justificativas que foram relatadas pela empresa.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho inicia com o Capítulo 1, que introduz os aspectos fundamentais, incluindo o problema de pesquisa, os objetivos a serem alcançados e a justificativa para o estudo. O Capítulo 2, denominado "Fundamentação Teórica", apresenta os conceitos teóricos essenciais para a estruturação da pesquisa, abordando temas como eficiência ambiental, estudos sobre eficiência ambiental na manufatura e na indústria petroquímica, em particular exploramos a distância DDF como um método de medida de distância direcional. Em seguida, no Capítulo 3, são descritos os procedimentos metodológicos utilizados para atingir os objetivos da pesquisa. A partir do Capítulo 4, é apresentado os resultados da pesquisa que posteriormente são discutidas no Capítulo 5. Por fim, são apresentadas as considerações finais, no capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No referencial teórico, são abordados os temas referentes às definições de eficiência ambiental. Além disso, o referencial explora estudos que aplicam DEA em termos gerais e com a Função de Distância Direcional em termos específicos para analisar a eficiência ambiental na manufatura. Por fim, as equações do modelo DDF são apresentadas.

2.1 EFICIÊNCIA AMBIENTAL

Para encontrar um equilíbrio entre o desenvolvimento humano e a proteção do meio ambiente, é crucial focar na eficiência ambiental. Repensar nossos processos produtivos e comportamentos de consumo torna-se fundamental para reduzir impactos adversos e promover um modelo sustentável de harmonia com o planeta.

Ao longo da história, conceitos como gestão verde ou gestão ambiental têm desempenhado um papel significativo na conscientização sobre a interação do homem com a natureza. Koopmans et al., (1950), no artigo “Análise da produção como uma eficiente combinação de atividade”, foram os primeiros pesquisadores a alertar sobre os impactos ambientais causados pela produção industrial, incluindo a geração de resíduos indesejáveis. Esse alerta foi um marco no início da pesquisa sobre eficiência ambiental e contribuiu para o desenvolvimento de técnicas e estratégias de gestão ambiental nas empresas (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012). Já na década de 1960, a autora Rachel Carson destacou a preocupação com a exploração desordenada dos recursos naturais, alertando para as consequências prejudiciais que poderiam surgir no futuro (Lin; Lin; Lu, 2018a). Em 1968, um grupo de pesquisadores de diferentes países, entre eles cientistas, educadores e economistas, por iniciativa do economista e empresário italiano Aurélio Peccei, se reuniam em Roma para discutir sobre o presente e o futuro da humanidade. O primeiro relatório significativo do Clube de Roma, “The Limits to Growth”, foi publicado em 1972. Este relatório destacou a ideia de que a sociedade industrial estava excedendo os limites ecológicos. O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu em 1987, apresentado pela Comissão de Meio Ambiente e

Desenvolvimento como “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” (Wang et al., 2014).

A eficiência ambiental na manufatura é definida como a medida de quão bem uma empresa ou atividade econômica realiza suas atividades com um impacto mínimo no meio ambiente. Ela pode ser medida através da quantidade de resíduos produzidos, emissões de gases de efeito estufa e consumo de recursos naturais utilizados no processo. Essa abordagem foi proposta no livro "Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things, com foco no princípio de "Reduzir, Reutilizar e Reciclar" para minimizar danos ambientais, mas ressalta a necessidade urgente de redefinir processos industriais (McDonough; Braungart, 2008).

A literatura aponta outros conceitos pretendem promover a sustentabilidade ambiental e econômica, ao repensar o modo como a produção e o consumo são realizados, todos eles buscam reduzir o impacto ambiental das atividades humanas, por meio da adoção de práticas mais eficientes.

Essas abordagens reconhecem que a economia e o meio ambiente estão interligados, e buscam encontrar soluções colaborativas para os desafios socioambientais de hoje. Na literatura, são encontrados outros termos relacionados a esses conceitos, sendo o desenvolvimento sustentável um exemplo destacado. No Quadro 3 estão descritos alguns desses termos:

Quadro 3 - Termos na literatura para desenvolvimento sustentável

Termos	Autores	Descrição	Exemplo
Ecologia Industrial	Frosch, Gallopoulos (1989).	Campo que se concentra em projetar sistemas industriais que funcionam em harmonia com o meio ambiente natural.	O caso de uma empresa de papel e celulose que fornece seus resíduos de biomassa para uma usina próxima, que utiliza como combustível para gerar eletricidade.
Produção Mais Limpa	Lançado pela WCED em 1987 e posteriormente elaborado na Agenda 21 do Rio pela ONU em 1992	Abordagem estratégica que busca integrar aspectos ambientais na gestão de processos produtivos.	Substituir produtos mais prejudiciais ao meio ambiente e à saúde por alternativas menos perigosas.
Economia Circular	Desenvolvida pelos autores, Stahel, MacArthur (2010).	Modelo econômico sustentável que promove a reutilização	Por exemplo sistema de depósitos e devolução de embalagens.

Termos	Autores	Descrição	Exemplo
		e reciclagem de materiais	
Avaliação do Ciclo de Vida	Desenvolvida pela Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) 1979	Processo que analisa de forma sistemática os impactos ambientais de um produto em todas as suas etapas, desde a criação dos materiais até o descarte.	Um exemplo é a análise do ciclo de vida de um produto, como um smartphone. Nas seguintes etapas: extração da matéria-prima, fabricação, uso e fim da vida útil.
Gestão verde ou gestão ambiental	Na década de 1960, ganhou força em 1962 com a publicação do livro "Primavera Silenciosa" (Silent Spring) Carson, (1962).	Um conjunto de práticas e estratégias adotadas por organizações, como melhorias contínuas, gestão de energia, parceria ambientais com fornecedores.	Utilizada nas indústrias de semicondutores.

Fonte: Elaborado pela autora

Na indústria, a chamada ecologia industrial e a produção mais limpa, que buscam projetar sistemas industriais que causem menos impacto ao meio ambiente, resultando em um sistema produtivo em harmonia com os recursos naturais, em contraposição à exploração desordenada. Essas abordagens visam promover uma maior eficiência no uso de recursos, reduzindo a geração de resíduos e minimizando os efeitos negativos sobre os ecossistemas (Coli; Nissi; Rapposelli, 2011b). A fim de complementar esse ciclo, a economia circular desempenha um papel crucial não apenas na fase de fabricação dos produtos, mas também na concepção e no design dos mesmos. Nesse modelo, os designers têm a responsabilidade de criar produtos que possam ser reutilizados ou reciclados, isso significa pensar em produtos duráveis e que utilizem materiais de forma eficiente (Fleeson et al., 2017).

Atualmente, o planeta está diante de três questões cruciais: a crise climática, a degradação ambiental e o aumento da disparidade social. Diante disso, existe um consenso entre a comunidade global de pesquisadores, especialistas e líderes políticos sobre a necessidade urgente de transformar os sistemas de governança mundial, a fim de promover a sustentabilidade (Wbcsd, 2023).

Por fim, esses conceitos são fundamentais para promover uma abordagem mais responsável e consciente em relação aos recursos naturais, visando à

proteção do meio ambiente, o uso eficiente de recursos e um desenvolvimento sustentável.

2.2 ESTUDOS SOBRE EFICIÊNCIA AMBIENTAL NA MANUFATURA COM A UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA) E DA FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DIRECIONAL (DDF)

A literatura científica aborda diversos estudos de eficiência ambiental em diversas áreas, incluindo a agrícola, mineração e alimentação. A exemplo um estudo realizado nos setores da economia do Paquistão no período de 2008 a 2017, com objetivo de desenvolver um índice de desempenho ambiental baseado em folgas, os setores abordados nesse estudo incluíram agricultura, manufatura, transporte, energia, construção, mineração e pedreiras (Shah; Longsheng, 2020a). Outro estudo aplicado um método desenvolvido para análise do sistema de materiais em toda a economia (EW-MSA) para materiais e produtos primários relacionados a alimentos na República Tcheca (Kovanda J, 2022). Um estudo realizado em duas etapas na indústria alimentícia Mexicana, a primeira etapa avalia a eficiência da produção e a segunda a eficiência dos investimentos no setor (Flegl, et al., 2022).

Este estudo concentra-se na indústria de manufatura, com ênfase na aplicação em Petroquímica. Embora poucos trabalhos tenham se dedicado especificamente a essa indústria, a revisão da literatura ampliou-se para abranger outras áreas de conhecimento que não serão o foco desta pesquisa. Durante a busca por artigos que empregassem a técnica DEA para analisar a eficiência na Indústria Petroquímica, observou-se uma escassez de estudos nessa área. Diante desse cenário, ampliou-se nossa investigação para incluir a indústria de manufatura, com destaque para pesquisas que utilizassem DEA com a abordagem DDF. Essa estratégia nos permitiu explorar e adaptar conhecimentos relevantes de outras áreas para preencher as lacunas de informação na análise de eficiência na Indústria Petroquímica. No Quadro 4, apresenta-se uma síntese dos estudos selecionados, incluindo informações sobre os autores e o ano de publicação de cada pesquisa. Os objetivos dos estudos foram descritos detalhadamente, e foram identificadas as DMUS que foram adotadas em cada caso. Além disso, para cada

estudo, foram especificados os modelos utilizados, destacando tanto os inputs quanto os outputs considerados para a análise.

Quadro 4 - Estudos avaliando a eficiência ambiental por meio da DEA

Autor(s)	País/ano	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Song; Wang; Liu, (2014)	China 2009	Propor um novo modelo DEA dividindo os processos de produção e tratamento de poluição.	Províncias chinesas	DEA 2 estágios CCR (est.1) SBM (est.2)	Água, PIB, estações de tratamento	Emissão de água residual, águas residuais tratada, PIB
Sanz-Daz et al., (2017)	Espanha 2005/2012	Avaliar a eficiência ambiental da Espanha em comparação com outros países.	Espanha e países UE	DEA/VRS Malmquist	Energia e capital fixo bruto	PIB, emissões de CO2 e consumo de energia renovável
Lu et al., (2019)	USA 2004/2013	A produtividade ambiental da indústria de combustíveis fósseis em 18 países	18 países da África do Sul	DEA Malmquist	Consumo de energia, de água e mão de obra.	Emissões de CO2 e produção de energia
Ignatius et al., (2016)	União Europeia	Avaliar o impacto ambiental com informações difusas	23 membros da OCD	DEA/VRS	Carbono alocado, consumo int. Bruto de energia	Eletricidade consumo de fontes renováveis, emissões verificadas
Sala, G. et al., (2022)	Chile	Avaliar a ecoeficiência de empresas de água chilenas	Empresas de água chilenas	DEA/VRS	Despesas operacionais (serviços prestados ao cliente exceto custo c/pessoal - U\$\$ano); (n° funcionários e terceiros - ano);	Volume de água potável entregue, volume de vazamento de água e interrupções de abastecimento
Iram et al., (2020)	28 Países da OCDE 2013/ 2017	Avaliar a eficiência do uso de energia e seu impacto nas emissões de (CO2) e na eficiência econômico-ambiental (EEA)	Países da OCDE	DEA/CRS	Consumo de energia primária (PEC); população; PIB	Emissões de dióxido de Carbono
Chen; Jia, (2017)	China	Avaliar a eficiência ambiental das regiões industriais da China e identificar os fatores que afetam essa eficiência.	30 regiões da China	Modelo baseado em folgas SBM	N° total de empregados, consumo total de energia, investimento total em ativos fixos da indústria.	PIB, emissão total de dióxido de enxofre; resíduos sólidos industriais

Autor(s)	País/ano	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Wang; Wei; Huang, (2018)	China 2006/2014	Avaliar a eficiência ambiental e de redução, considerando as leis da termodinâmica	Industria de energia térmica da China	DEA/MBP balanço de materiais	Entrada de poluentes, consumo de energia, entradas não poluentes	Emissão de poluentes CO ₂ , SO ₂ , geração de eletricidade, emissão de fuligem
Wang; Han; Yin, (2017)	China 2006/2011	Avaliar a eficiência ambiental das empresas manufatureiras chinesas e identificar os fatores que influenciam essa eficiência.	29 indústrias de manufatura chinesas	SBM medida baseada em folga	Trabalho (n° funcionários), capital, energia, matéria-prima e água.	Produtos, resíduos sólidos, emissões de gases e consumo de água.
Wang; Wei; Huang, (2018)	China 2007/2011	Avaliar a eficiência ambiental da indústria na China.	Industria chinesa	DEA/VRS de saída de soma fixa para saídas desejáveis	Investimento total em ativos fixos; consumo de eletricidade.	Produto regional bruto, total de emissões de poluentes de dióxido de nitrogênio.
Liu et al., (2019)	China	Avaliar o desempenho das usinas de carvão e identificar principais práticas ambientais	Usinas termelétricas de carvão chinesas	SBM	Carvão consumido e eletricidade gerada.	Emissões de gases
Xu et al., (2021)	EUA 2013/2016	Avaliar a eficiência ambiental da indústria aérea dos Estados Unidos	12 companhias aéreas dos Estados Unidos	DEA/VRS DDF	Emprego, despesa operacional e consumo de combustível	Atrasos de voo, emissões de gases, receita de passagens e milhas
Grigoroudis; Petridis, (2018)	Mundial 1992/2003	Avaliar a eficiência do processo de avaliação ambiental nacional em relação à incerteza	108 países de todo o mundo	DEA/VRS/ CRS	Força de trabalho, população, formação bruta de capital, produção de energia primária.	PIB, emissão de gases
Ananda, (2019)	Austrália 2006/2011	Analisar a eficiência ambiental e identificar os principais fatores que explicam essa eficiência	Empresas australianas de água potável e esgoto	CRS	Custo operacional total, comprimento da rede de água	Água urbana total fornecida e águas residuais coletadas; emissões de gases

Autor(s)	País/ano	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Guo et al., (2019)	China 20001/2015	Avaliar a eficiência ambiental	Indústrias do oeste da China	Medidas baseada em folgas SBM	Valor líquido médio anual do imobilizado, n° médio dos trabalhadores e consumo de energia do setor industrial.	Valor agregado, emissão de gases, de poeira e de resíduos sólidos.
Wu et al., (2017)	30 regiões chinesas 2006/2010	Avaliar a eficiência energética regional total e a eficiência ambiental	Região administrativa da China	DEA/CRS	Trabalho, capital e energia	PIB e gás residual
Coli; Nissi; Rapposelli, (2011)	Itália 2004	Avaliar a eficiência ambiental	103 províncias italianas	DEA/CRS	PIB	poluentes: concentração de dióxido de nitrogênio (NO2) e PM10
Goto; Takahashi, (2017)	Japão 2003/20	Medir as eficiências operacionais e ambientais	Empresas de energia elétrica do Japão	Radial	Ativos totais, dívidas totais e despesa operacional	Receita total, valor total da empresa e eletricidade total vendida aos consumidores emissões de CO2.
Emrouznejad; Yang, (2016)	China 2004/20	Apresentar uma estrutura para a medição da ecoeficiência com base nas emissões de CO2 nas indústrias manufatureiras	Indústrias manufatureiras de 2 dígitos	DEA VRS/CRS	trabalho, ativos e energia	valor bruto de produção emissão de CO2
Zofío; Prieto, (2001)	14 países da OCDE	Desenvolver uma metodologia para medir o desempenho ambiental dos processos de produção	Empresas que operam nas indústrias intensivas e menos intensivas de energia	DEA	Estoque líquido total de capital fixo, mão de obra.	Emissão de CO2 e valor da produção de manufatura.
Zhang, (2010)	China 1998/2002	Avaliar o desempenho de inovação verde da indústria manufatureira da China	Eficiência verde e inovação verde	DEA-RAM	Capital humano de P&D, capital físico de P&D e energia.	Inovação e valor de novos produtos, resíduos sólidos e resíduos de gás.

Autor(s)	País/ano	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Tao; Li; Xia, (2012)	China 1999/2009	Medir a eficiência ambiental e seus componentes	36 subindústrias da indústria chinesa	Regressão de Tobit	Nº de funcionários, consumo de energia e capital permanente.	Emissões de poluentes: águas residuais, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e resíduos sólidos
Shah; Longsheng, (2020)	Paquistão 2008/2017	Desenvolver um índice de desempenho ambiental baseado em folga.	Setores da economia do Paquistão	DEA/CRS	Consumo total de energia	PIB e emissão de CO2
Lin; Lin; Lu, (2018)	Taiwan	Avaliar o desempenho sustentável de 15 indústrias de semicondutores	Indústrias de semicondutores	DEA/VRS de Rede Aditiva de 2 Estágios	Mão de obra, despesa operacional e ativos fixos	Vendas, consumo de energia, de água; drenagem de efluentes, resíduos e gases.
Li; Zhu; Chen, (2020)	China 2005/20	Avaliar a eficiência total do fator de tratamento de gases residuais	30 empresas siderúrgicas chinesas	SBM-DEA/CRS de quatro estágios	Capital e mão de obra	descarte de lixo e gás residual.
Chen, (2014)	EUA	Demonstrar a existência de três problemas principais relacionados a modelos específicos e compará-los com um modelo DEA aditivo ponderado.	50 empresas de manufatura	DEA/DDF	Ativos totais, custo de mercadoria vendida, receita	Receita anuais, emissões gases efeito estufa
Ramli; Munisamy; Arabi, (2013)	Malásia	Introduzir uma nova abordagem chamada função de distância direcional de escala (SDDF)	Empresas de manufatura	DEA/DDF/SDDF	Despesas operacionais; capital	Venda (sd); emissões de carbono (si)
Emrouznejad; Yang, (2016b)	China	Propor apresenta um novo índice de produtividade de Malmquist-Luenberger (MLP) baseado na função de distância direcional (DDF).	17 ind. Manufatureiras	DEA/DDF	Trabalho, ativos e energia	Valor bruto de produção; produção de CO2

Fonte: Elaborado pela autora com base nos trabalhos citados.

Ao escolher os artigos, 50% deles foram provenientes de pesquisas conduzidas na China, que, como uma nação de grande produção manufatureira, figura entre os principais emissores de CO₂ na atmosfera (Ignatius et al., 2016a).

Na última década, o país conquistou uma melhora considerável nos níveis de poluição atmosférica devido às soluções tecnológicas e políticas rigorosas. De acordo com dados da China, a exposição média anual de poluente (PM_{2,5} – poluente de partícula muito fina altamente perigoso) aumentou 40% no final da década de 1990, antes de se estabilizar por volta de 2006. Desde 2013, houve uma queda constante nos níveis de PM_{2,5} e, em 2021, a exposição média anual foi de 33,3 microgramas por metro cúbico, conforme relatado em "Ar fresco" (Zhang et al., 2019). Os estudos selecionados desenvolvidos na China, possuem na sua grande maioria, o objetivo de avaliar a eficiência ambiental nas indústrias manufatureiras. Além disso, outros possuem como objetivo medir o desempenho dos processos de produção e identificar os fatores que afetam essa eficiência, por meio de análises em dois estágios. Os resultados obtidos identificaram uma baixa eficiência ambiental, sem evidências de uma tendência crescente, e diferenças significativas nas eficiências ambientais entre regiões. Além disso, observou-se que a eficiência de redução do consumo de energia e das emissões de poluentes varia entre as usinas de energia elétrica (Chen; Jia, 2017); (Wang; Wei; Huang, 2018a); (Wu et al., 2017a); (Liu et al., 2019a); (Zhang, 2010a); (Li; Zhu; Chen, 2020a). No entanto, um dos motivos para a ineficiência em termos ambientais da indústria chinesa é devido ao uso excessivo de energia e à emissão de poluentes (Tao; Li; Xia, 2012a).

Com base em pesquisas conduzidas na União Europeia, constata-se que alguns países não alcançam uma eficiência global equivalente à média dos demais países membros. No entanto, esses mesmos países apresentaram resultados acima da média no uso de recursos renováveis e no investimento em energia limpa (Sanz-Díaz et al., 2017a); (LU et al., 2019b). Além disso, os resultados indicam uma relação mais significativa da eficiência energética com as emissões de carbono do que com a eficiência econômica e ambiental. Observa-se que muitos países apresentam maior eficiência econômica em comparação à eficiência ambiental (Iram et al., 2020a). Existem diversas razões para a baixa produtividade e alta emissão de carbono nos países em desenvolvimento. Entre essas razões, incluem-se leis de

tributação de carbono mais fracas, que não estão sendo devidamente implementadas ou simplesmente não existem (Iram et al., 2020).

Nas indústrias manufatureiras constatou-se que empresas mais engajadas em práticas e políticas ambientalmente responsáveis tendem a apresentar maior eficiência ambiental, isso pode ser explicado pelo fato de que empresas abertas a influências externas, como padrões ambientais internacionais e pressão dos consumidores, tendem a adotar tecnologias e práticas mais limpas para reduzir seu impacto ambiental (Li; Zhu; Chen, 2020a).

Outros visam o desenvolvimento de abordagens para medir o desempenho ambiental dos processos de produção e estabelecer padrões de referência para a produção sustentável. Isso é alcançado por meio do cálculo das perdas de produção desejáveis e da simulação do efeito das normas regulatórias sobre a produção (Zofío; Prieto, 2001b).

O setor de companhias aéreas é responsável por causar 3,5% de todas as mudanças climáticas induzidas pelo homem, dois terços do impacto da aviação são causados por diferentes fatores, como rastros, óxidos de nitrogênio (NOx), vapor de água, gases de aerossol de sulfato, fuligem e outros aerossóis. O terço restante é atribuído aos efeitos cumulativos de retenção de calor das emissões de dióxido de carbono (CO₂) de longa duração (Lee et al., 2021); (Iea, 2018b).

Em pesquisas específicas, diversas utilizaram o modelo baseado em folgas SBM (sigla em inglês para "Slack-Based Measure") (Chen; Jia, 2017b); (Wang; Han; Yin, 2017);(Liu et al., 2019a). Nesse modelo cada unidade avaliada é comparada com outras unidades, para isso, é mensurado o desempenho de cada unidade em relação às outras unidades, o que permite a avaliação da eficiência de unidades que consomem energia e emitem CO₂, como empresas e indústrias. Com base nesses resultados de eficiência obtidos pela DEA, é possível identificar as unidades que apresentam baixa eficiência no uso de recursos e na emissão de CO₂. Assim, ao identificar as folgas em cada DMU ineficiente, é possível implementar ações para reduzir o consumo de energia e/ou as emissões de CO₂ nessas unidades, visando alcançar os níveis de eficiência das DMUs.

O modelo SBM (Slack Based Measure), ou modelo baseado em folgas aplicados nos artigos selecionados, permite que as entradas e saídas mudem em diferentes escalas para considerar as ineficiências que não podem ser explicadas

apenas pelas variações nas quantidades de entrada e saída, mas que podem ter influência sobre os resultados de eficiência (Guo et al., 2019b); (Li; Zhu; Chen, 2020a). Os estudos enfatizam a necessidade de aprimorar os modelos para obter resultados mais confiáveis diante das variáveis desejadas e indesejadas, a fim de aumentar a precisão das análises. Um modelo proposto calcula as saídas separadamente, enquanto outro estudo propõe um modelo que permite lidar com dados difusos de forma precisa, mesmo quando as informações não são claras e bem definidas (Song; Wang; Liu, 2014a); (Ignatius et al., 2016).

A abordagem radial na DEA assume que todas as entradas e saídas podem ser aumentadas ou reduzidas proporcionalmente sem afetar a eficiência relativa das unidades avaliadas (Tone; Tsutsui, 2014). No entanto, na prática, existem fatores que afetam a eficiência das unidades avaliadas e que não podem ser explicados apenas pelas variações nas quantidades de entrada e saída. Como por exemplo, a gestão ineficiente, a falta de capacitação dos funcionários ou a subutilização de recursos, esses fatores são chamados de "folgas" (Tone; Tsutsui, 2014). Podemos citar o estudo sobre a avaliação da eficiência realizada nas empresas de água chilenas, que considerou a disponibilidade natural dos recursos, os de vazamentos de água e interrupções no abastecimento de água não planejada como variáveis de folgas (Sala-Garrido et al., 2023).

Na seleção dos estudos citados, os seguintes inputs foram amplamente utilizados: consumo de mão de obra, número de funcionários, consumo de energia, quantidade total de água e despesas operacionais (Lu Et Al., 2019); (Zoffio; Prieto, 2001); (Lin; Lin; Lu, 2018); (Li; Zhu; Chen, 2020). Os investimentos em ativos fixos e consumo de capital fixo (que engloba a perda de valor do capital ao longo do tempo, incluindo a depreciação decorrente do uso de bens de capital na produção) foram inseridos como inputs em algumas pesquisas (Woo et al., 2015). Como outputs, foram consideradas as emissões de CO₂, águas residuais, resíduos sólidos industriais, emissões de dióxido de enxofre e emissões de dióxido de carbono (Sanz-Díaz Et Al., 2017; Goto; Takahashi, 2017). Alguns estudos consideraram o Produto Interno Bruto (PIB) como uma métrica desejável e as emissões de águas residuais como uma métrica indesejável ao selecionar dados de saída (Chen; Jia, 2017; Grigoroudis; Petridis, 2018; Wu Et Al., 2017). Outras pesquisas utilizam o PIB tanto como inputs quanto outputs sendo considerados como saídas desejadas (Song;

Wang; Liu, 2014; Iram Et Al., 2020; Grigoroudis; Petridis, 2018). O consumo de água é utilizado como dados de entrada enquanto águas residuais são consideradas saídas indesejadas (Lu Et Al., 2019; Wang; Han; Yin, 2017).

Especificamente na Indústria petroquímica os estudos consideram como Input o índice de capacidade ociosa das refinarias, água consumida na produção (m^3/dia), porcentagem de ociosidade da planta (razão entre água consumida na produção (m^3/dia), porcentagem de ociosidade da planta, obtida pela razão entre a quantidade de óleo processado (m^3/dia) e a capacidade de refino (m^3/dia). Como uma produção desejada, a quantidade de óleo processado (m^3/dia), produção indesejável, a quantidade de efluentes gerados (m^3/dia) e como (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012). Materiais bruto como etileno, eletricidade, água e vapor, como saída desejável etileno e emissão de CO₂ como saída indesejável (Hsieh; Tsai; Chang, 2020). As variáveis incontroláveis estão consideradas como dados de entrada, em alguns estudos, são fatores externos que influenciam na eficiência das DMUS, fatores que estão fora do controle da gestão, como por exemplo, a idade da refinaria (Yang; Pollitt, 2009).

2.3 FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DIRECIONAL (DDF)

Os primeiros estudos que aplicaram a função de distância direcional (DDF, do inglês "*Directional Distance Function*") voltados à função de produção considerando as saídas, foram realizados por Yangho Chung e Rolf Färe com os estudos das usinas energéticas movidas a carvão na Chiba em 1996 (Chambers; Chung; Färe, 1996). As saídas devem ser diferenciadas entre desejáveis e indesejáveis. Os agentes de produção empregam insumos para criar produtos desejáveis, no entanto, durante esse processo também são gerados subprodutos indesejáveis.

A vantagem de usar DDF(*Directional Distance Function*) com DEA (*Data Envelopment Analysis*) é que ela permite a medição da eficiência enquanto incorpora saídas indesejáveis. Na teoria da produção convencional, a eficiência é medida maximizando a produção de saídas desejáveis com uma quantidade restrita de insumos (Ramli; Munisamy; Arabi, 2013b). No entanto, quando há produção conjunta de saídas desejáveis e indesejáveis, a medição de eficiência é melhor definida aumentando as saídas desejáveis e, simultaneamente, diminuindo as saídas

indesejáveis. A abordagem DDF expande as saídas desejáveis e reduz as saídas indesejáveis simultaneamente com base em um determinado vetor de direção (Ramli; Munisamy; Arabi, 2013b).

Em certas situações, a DMU tem uma projeção ideal clara nesses casos, a abordagem convencional é maximizar as melhorias nessa direção até alcançar um alvo eficiente. No entanto, quando a DMU não sabe qual direção de melhoria seguir, é válido explorar diferentes possibilidades e determinar a quantidade máxima de melhoria correspondente (ou seja, a distância até a fronteira eficiente) nessa direção projetada (Lozano; Soltani, 2020).

A revisão da literatura revela que diversos estudos têm sido dedicados à exploração de diferentes métodos DEA com a função da distância direcional, visando propor novos modelos e ampliar a abrangência das análises. Alguns artigos se concentram em comparar esses modelos com diferentes tipos de DEA, incluindo o DEA clássico e o DEA aditivo ponderado (Chen, 2014). Além disso, há trabalhos que investigam a comparação entre DEA e a função de distância direcional de escala (SDDF) (Ramli; Munisamy; Arabi, 2013b). Outra linha de pesquisa apresenta o objetivo de propor um novo método para mensurar as emissões de CO₂ nas indústrias chinesas de manufatura leve, utilizando o índice de produtividade Malmquist-Luenberger baseado em RAM, e oferecendo recomendações políticas para reduzir tais emissões na China (Emrouznejad; Yang, 2016a). Essa ampla variedade de estudos reflete a importância e o interesse contínuo em aprimorar as metodologias de análise de eficiência ecoeficiência no contexto da gestão ambiental e sustentabilidade industrial.

Em termos gerais, o conceito do DDF é expandir as saídas desejáveis (yg) e reduzir entradas (x) e saídas indesejáveis (yb) simultaneamente com base em um dado vetor direcional g ($-x, -yb, yg$) (Chung et al., 1997). O vetor direcional $g \rightarrow$ indica a direção da mudança para as entradas (x), saídas desejáveis (yg) e saídas indesejáveis (yb). Conforme as formulações (1) e (2), a tecnologia de produção (T) engloba as entradas e saídas selecionadas para o modelo em estudo, possíveis para um processo específico de produção ou qualquer sistema sendo avaliado. Na formulação (2), $D \rightarrow$ denota a função de distância direcional, cujo objetivo é maximizar a "melhoria potencial" presente (β) ao dimensionar as entradas e saídas desejáveis/indesejáveis dentro da tecnologia e sua fronteira eficiente. Isso permite

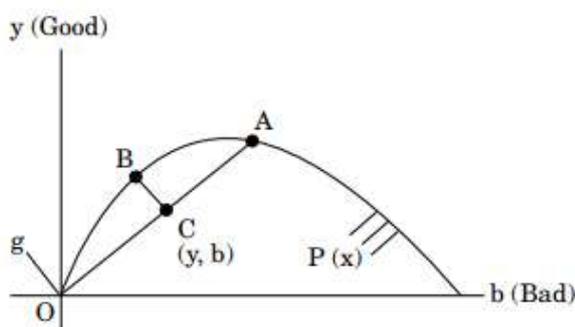
estabelecer benchmarks que definem as melhores práticas. O valor ótimo de β pode ser interpretado como a ineficiência ou distância da fronteira, ou seja, a margem de melhoria para uma DMU k em avaliação.

$$T = \{(x, yb, yg): x \text{ can produce } yb \text{ and } yg\} \quad (1)$$

$$D \rightarrow (x, yb, yg, gx, gyb, gyg) = \max \beta: (x - \beta \cdot |gx|, yb - \beta \cdot |gyb|, yg + \beta \cdot |gyg|) \in T \quad (2)$$

As funções de distância, representada no gráfico 1 mostra que se uma boa saída é produzida em quantidade positiva, alguma saída ruim também deve ser produzida. No Gráfico 1 a saída desejável é considerada como “good” enquanto a saída indesejada é considerada como “bad”.

Gráfico 1 - Funções de distância



Fonte: Chung (1997)

Em termos gerais, o conceito do DDF é expandir as saídas desejáveis e reduzir entradas e saídas indesejáveis simultaneamente com base em um dado vetor direcional conforme o modelo de escala de Chambers et al. (1996) como mostra a equação 4 (Camanho et al. 2023).

$$\bar{D}(y, x; g) = \max \beta \quad (3)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n yrj \lambda_j \geq yrj0 + \beta gy \quad r = 1, \dots, s$$

$$\sum_{j=1}^n xij \lambda_j \leq xij0 - \beta gx \quad i = 1, \dots, m$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Onde:

x_{ij} ($i = 1, \dots, m$) \rightarrow entradas usadas pela DMU j ($j = 1, \dots, n$);

yr_j ($r = 1, \dots, s$) \rightarrow saídas;

λ_j \rightarrow variáveis de intensidade;

$g = (gy, -gx)$ \rightarrow direção da mudança das saídas e entradas;

valores positivos \rightarrow aumentam outputs desejáveis;

valores negativos \rightarrow reduzem inputs;

β \rightarrow indica a melhoria potencial da DMU;

Se vetor direcional: $g = (gy, -gx) = (yr_j0, -x_{ij}0)$.

A medida de ineficiência reflete a magnitude da alteração proporcional dos níveis originais de outputs e inputs que são necessários para atingir a fronteira eficiente. Em seu estudo, Boussemart et al., (2003) estabeleceram uma equivalência precisa entre o Desvio Direcional Flexível (DDF) e a pontuação de eficiência radial DEA, mostrado na equação 5 (Camanho et al. 2023).

$$E(y, x)^n = \frac{1 - \bar{D}(y, x; g)}{1 + \bar{D}(y, x; g)} = \frac{1 - \delta}{1 + \delta} \quad (5)$$

Para descrever o modelo incluindo saídas indesejadas, Chung et al., (1997) especifica o modelo com retorno constante de escala como:

$$\bar{D}(y, b, x; g) = \max \delta \quad (6)$$

$$\begin{aligned} s. t. \quad & \sum_{j=1}^n yr_j \lambda_j \geq yr_j0 + \beta gy \quad r = 1, \dots, s \\ & \sum_{j=1}^n bk_j \lambda_j = bk_j0 - \beta gb \quad k = 1, \dots, l \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq x_{ij}0 - \beta gx \quad i = 1, \dots, m \\ & \lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Onde:

$g = (gy, -gb, -gx) \rightarrow$ indicam a direção da mudança para entradas e saídas desejadas e indesejadas.

Na função Produção, representada por $P(x) = \{(y, b): x \text{ pode produzir } (y, b)\}$, dentro da Função de Distância Direcional (DDF), ocorre a geração de outputs tanto desejáveis quanto indesejáveis como subprodutos. Este processo inclui uma inter-relação entre os outputs, conhecida como 'descartabilidade fraca'. Essa característica implica que não é simples diminuir a quantidade de outputs indesejáveis sem afetar os outputs desejáveis, dada uma certa quantidade de inputs. Embora seja possível regular a quantidade dos outputs desejáveis, classificando-os como 'facilmente descartáveis', a interdependência no processo torna o controle dos outputs indesejáveis mais complexo (Chung; Färe; Grosskopf, 1997). A definição de resultados indesejáveis nos primeiros modelos lineares foi divergente, alguns consideraram o descarte forte, enquanto outros consideraram o descarte fraco. O descarte forte avalia se a redução dessas variáveis ocorre com custo, enquanto o descarte fraco avalia se a redução ocorre sem custo (Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012).

A literatura aponta outros trabalhos que aplicam DDF para avaliar a eficiência ambiental de companhias aéreas (Xu et al., 2021), avaliação da eficiência ambiental de água potável e esgoto (Ananda, 2019), indústrias "leves" da China (Emrouznejad; Yang, 2016). Indústrias manufatureiras da Malásia (Ramli; Munisamy; Arabi, 2013) e a grandes mineradoras filiadas ao GRI (Global Reporting Initiative) e ICMM (International Council on Mining and Metals) (Oliveira; Camanho; Zanella, 2017).

Existem algumas desvantagens associadas ao uso do modelo DDF convencional, ele reduz as saídas indesejáveis e aumenta as saídas desejáveis na mesma taxa, o que pode ser considerado uma medida de eficiência radial com limitações. Além disso, uma medida radial pode superestimar a eficiência quando há folgas, isso ocorre porque a medida radial considera apenas a distância perpendicular à fronteira eficiente, ignorando as folgas. Dessa forma, se uma DMU tem recursos não utilizados, ela pode ser considerada eficiente em relação à fronteira, embora exista capacidade ociosa que poderia ser mais bem utilizada (Zhang; Choi, 2014). Pode-se encontrar na literatura outros dois problemas relacionados ao modelo: i) a não monotonicidade em saídas indesejáveis, isso significa que o desempenho da empresa em relação a essas saídas (como poluição)

não segue uma relação consistente com a eficiência. Sendo assim, uma empresa pode aumentar sua eficiência mesmo aumentando a quantidade de saídas indesejáveis, o que pode ser um resultado contraditório na avaliação da eficiência ambiental; ii) empresas podem parecer ter um desempenho melhor quando comparadas a empresas com desempenho baixo, o que indica que empresas podem parecer mais eficientes em comparação com as que têm um desempenho inferior (Xie et al., 2017).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para assegurar o reconhecimento de tal pesquisa como significativa e potencialmente relevante, tanto no âmbito acadêmico como na esfera social mais ampla, é essencial que ela evidencie seu desenvolvimento metodológico e a possibilidade de ser debatida e submetida à verificação (Lacerda et al., 2013). Os procedimentos metodológicos consideram o delineamento da pesquisa a definição do método de pesquisa e posteriormente, a partir do método de pesquisa a elaboração do método de trabalho.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa científica é a estrutura e plano geral que um pesquisador desenvolve para conduzir seu estudo de forma sistemática e rigorosa, visando responder a uma ou mais questões de pesquisa de forma confiável e válida (Martins et al., 2014). Portanto, é imprescindível que o planejamento seja cuidadosamente elaborado, visando facilitar a análise e interpretação dos resultados, onde o rigor e o controle se tornam fatores essenciais para assegurar a qualidade e confiabilidade do estudo.

O método de trabalho científico é um conjunto de procedimentos e técnicas utilizado de forma constante, passível de ser replicado, para alcançar um objetivo material ou conceitual, permitindo a compreensão do processo de investigação (Pereira, 2019). De acordo com Dresch et al., (2015), a fim de determinar o método que será empregado no trabalho, é necessário considerar o ponto de partida da pesquisa e ter definido de modo claro o objetivo da pesquisa. Para o presente trabalho, foi escolhido o método indutivo como método científico. A classificação da pesquisa apoia o pesquisador no decorrer do trabalho, auxiliando no direcionamento para chegar na resposta do problema de pesquisa (Dresch et al., 2015). A pesquisa pode ser classificada de diversas formas. As formas clássicas de classificação serão apresentadas a seguir no Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação da pesquisa

Ponto de vista	Classificação	Descrição
Natureza	Aplicada	Geração de conhecimento para aplicação prática, dirigido a soluções de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais.
Forma de abordagem do problema	Quantitativa	As informações podem ser mensuradas numericamente, requer o uso de técnicas estatísticas.
Objetivos	Exploratória	Envolve levantamento bibliográfico, entrevista, constrói hipóteses, assume as formas de pesquisas bibliográficas e estudos de caso.
Procedimento técnico	Estudo de caso	Quando envolve estudo profundo de um ou poucos objetos de maneira a possibilitar seu amplo e detalhado conhecimento.

Fonte: Adaptado pela autora a partir de Cauchick, (2007)

A presente pesquisa está classificada como de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimento com aplicação prática. Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, a pesquisa é classificada como quantitativa, visto que apresenta e analisa dados numéricos.

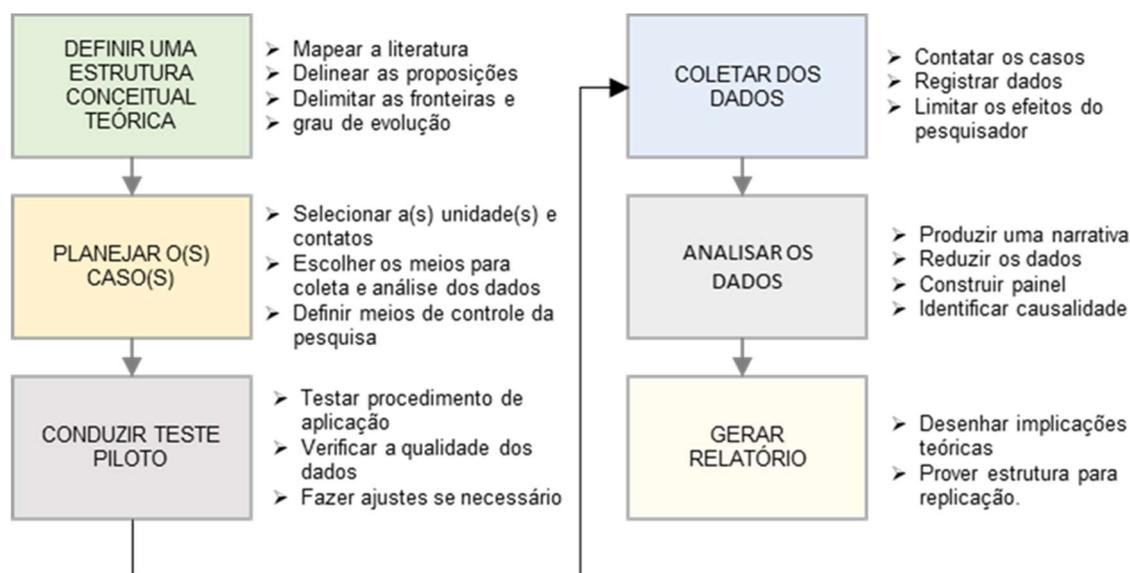
Em relação aos objetivos, a pesquisa se caracteriza como exploratória, pois envolve levantamento bibliográfico, entrevista, procura explicar o problema e construir hipóteses. Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa foi classificada como estudo de caso, pois procura compreender a eficiência ambiental analisando uma empresa do ramo petroquímico.

O estudo de caso é uma abordagem metodológica poderosa que contribui para a qualidade e profundidade da pesquisa, especialmente quando se trata de fenômenos complexos como os mencionados. Sua capacidade de integrar dados qualitativos e quantitativos, juntamente com uma abordagem detalhada, faz dele uma escolha valiosa para pesquisadores que buscam uma compreensão abrangente e confiável de diferentes áreas, incluindo a gestão de operações (Voss; Tsiriktsis; Frohlich, 2002). Como uma estratégia de pesquisa importante, o estudo de caso, enfatiza o contexto do mundo real em que os fenômenos ocorrem (Cauchick-Miguel; Sousa-Zomer; Tortorella, 2023).

Para desenvolver o estudo de caso, alcançando os objetivos descritos, pode-se seguir algumas etapas conforme descrito por Cauchick (2007). Na Figura 3

Fonte de referência não encontrada. são detalhadas as etapas para condução da pesquisa de estudo de caso.

Figura 3 - Etapas da pesquisa de estudo de caso



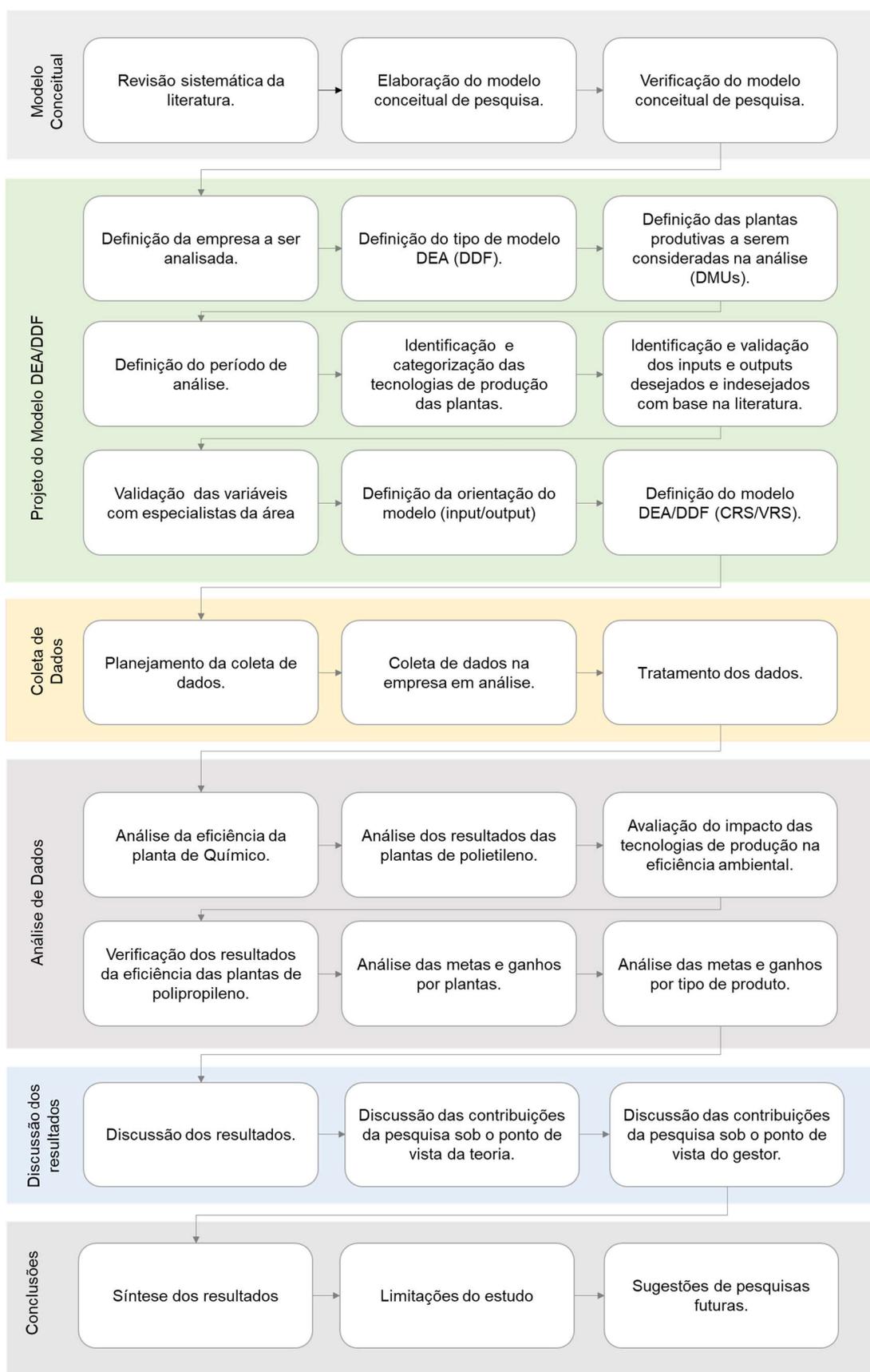
Fonte: Cauchick Miguel et al. (2007, p.134).

Na próxima seção, será detalhado o método de trabalho desta dissertação com base nos procedimentos sugeridos por Cauchick, (2007).

3.2 MÉTODO DE TRABALHO

Nessa etapa, é apresentado o método de trabalho que embasou o desenvolvimento desta pesquisa. Para Dresch et al., (2015), o método de trabalho define a sequência de passos lógicos a ser seguido pelo pesquisador para alcançar os objetivos propostos. A Figura 4 apresenta o método de trabalho aplicado a essa pesquisa.

Figura 4 - Método de Trabalho



Fonte: Elaborada pela autora.

Na etapa 1, é realizada a revisão sistemática da literatura (RSL). O objetivo nesta fase é construir o embasamento teórico sobre o tema. A busca por artigos e livros contempla a parte conceitual, complementado por pesquisas em sites e relatórios que trouxeram um panorama das indústrias petroquímicas. A busca na literatura foi por trabalhos que explorassem conteúdos como indústrias de transformação, medidas de eficiências, definições de eficiência ambiental, meio ambiente e indústria petroquímica. Após realizar uma leitura inspeccional dos artigos selecionados, foram desenvolvidos códigos utilizando a ferramenta Atlas TI, a fim de identificar as contribuições relevantes para este estudo. Os procedimentos da RSL foram explicados na seção de justificativa deste trabalho (1.3).

Na segunda etapa, avança-se com o desenvolvimento do modelo DEA/DDF, no qual seleciona-se a empresa alvo e se seleciona o tipo específico de modelo a ser utilizado na análise DEA/DDF. Escolhe-se quais plantas (DMUs) serão incluídas na análise, delimita-se o período ou série temporal a ser estudado. Ajustes foram realizados nas variáveis com base nos dados disponíveis na base, resultando na exclusão da DMU que apresentava características diferentes da maioria.

Nesse estágio, identificam-se as variáveis a serem utilizadas no modelo, embasadas na literatura e validadas com especialistas da área. Além disso, determina-se a orientação das variáveis e seleciona-se o modelo a ser aplicado (CRS/VRS). A terceira fase desta pesquisa aborda a coleta e organização dos dados para inclusão no modelo. Inicialmente, foram coletados os dados fornecidos pela empresa, seguindo um plano detalhado e estruturado. Nesta etapa, o tratamento dos dados envolve a formatação e o detalhamento conforme os requisitos específicos do modelo em questão.

Após a coleta dos dados, foi iniciada a etapa quatro, caracterizada pela análise dos resultados oriundos da aplicação do modelo DEA. Essa etapa consiste na identificação da eficiência das unidades analisadas com o auxílio do software RStudio.

A discussão dos resultados engloba tanto a análise das descobertas quanto as contribuições da pesquisa, tanto do ponto de vista teórico quanto do ponto de vista do gestor. São abordadas as implicações e relevância dos resultados obtidos em relação à teoria, destacando como eles podem contribuir para o avanço do conhecimento na área. Além disso, são discutidas as implicações práticas dos

resultados, fornecendo insights valiosos para os gestores e profissionais da área, identificando possíveis aplicações e benefícios das descobertas para a tomada de decisões. Na etapa de conclusões, é apresentado uma síntese dos resultados obtidos, bem como as limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

3.3 PROJETO DO MODELO DEA/DDF

A empresa dessa pesquisa está localizada no estado do Rio Grande do Sul, é uma das maiores empresas petroquímicas das Américas e a maior produtora de resinas termoplásticas do Brasil. Possui diversas unidades industriais espalhadas pelo país, além de operações internacionais. Conhecida por sua atuação na produção de polietileno e polipropileno, além de outros produtos petroquímicos.

As DMUs são representadas pelas seis plantas designadas como P1, P2, P3, P4, P5 e P6 durante o período de 2018 a 2022. Os dados mensais foram compilados e analisados, obtendo-se médias e medianas anuais. No Quadro 6, são detalhadas as características das plantas e os produtos resultantes de suas respectivas operações.

Quadro 6 - Plantas e produtos da indústria em estudo

Plantas	Descrição	Tecnologia de produção	Produtos
P1	Unidade Química	Eteno	Q2
P2	Planta de Polietileno	Spherilene	PE5 SPH
P3	Planta de Polietileno	Slurry	PE5 SLR
P4	Planta de Polietileno	Tubular	PE6
P5	Planta 1 de polipropileno	Spheripol	PP1
P6	Planta 2 de polipropileno	Spheripol	PP2

Fonte: Elaborado pela autora.

A planta P1 é a unidade química que produz eteno que é o produto para todas as demais plantas e a utilidades que gera vapor. Os polietilenos (PEs) são resinas termoplásticas amplamente empregadas na produção de filmes para embalagens, utensílios domésticos, fios e cabos, entre outros produtos. Por outro lado, o polipropileno (PP) é um tipo de resina termoplástica usado na fabricação de uma de itens, como fibras têxteis, peças automotivas, utensílios domésticos, equipamentos médicos e diversos outros.

O modelo proposto é aplicado em um período temporal de cinco anos, abrangendo os anos de 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022. O processo de produção da unidade química P1 (Eteno) (Q2) gera energia através das turbinas e caldeiras de vapor na queima de carvão, aonde parte dessa energia é consumida e parte é vendida para outras plantas. Descrevendo os processos, O processo Slurry (SLR) na indústria petroquímica utiliza a tecnologia Cascade Process (Hostalen ACP) com três reatores em cascata para produzir resinas de polietileno de alta densidade. Esse polímero termoplástico é fabricado pela polimerização do etileno, resultando em uma estrutura molecular linear com alta densidade de ligações moleculares. Essas características conferem ao polietileno propriedades como alta resistência à tração, rigidez, resistência ao impacto e resistência química. É amplamente utilizado na fabricação de recipientes plásticos, tubos, garrafas, filmes e outros produtos de plástico (LyondellBasell (LYB), c2024).

O processo Spherilene é um método de produção de polietileno (PE) que utiliza um leito fluidizado em fase gasosa, onde um reator e gás fazem as partículas flutuarem para garantir uma mistura uniforme. Este processo é capaz de fabricar uma ampla variedade de produtos de PE, incluindo polietileno linear de baixa, média e alta densidade. Com essas características, são produzidos filmes para embalagens flexíveis, sacolas plásticas, revestimentos, tubos de água e gás, embalagens industriais, tanques, recipientes para produtos químicos, garrafas plásticas, peças automotivas e produtos de construção (LYB, c2024).

O projeto de última geração do processo Spheripol utiliza os mais novos catalisadores, permitindo a produção de famílias de produtos líderes de mercado com propriedades aprimoradas, reforçando o status de referência dessa tecnologia no setor. A qualidade do produto é incomparável, com variação mínima de propriedades graças à excelente estabilidade do processo e ao desempenho dos catalisadores. O abrangente portfólio de produtos inclui muitos itens feitos sob medida para diversas aplicações de filmes e fibras, além de classes especiais para aplicações em tubos de pressão, copolímeros e para-choques automotivos (LYB, c2024).

O processo Lupotech T, ou tubular, é uma tecnologia de reator tubular de alta pressão desenvolvida para fabricar uma variedade de produtos de polietileno de baixa densidade (LDPE), produzido pela polimerização de etileno em condições de

alta pressão e temperatura. O LDPE possui uma variedade de aplicações, como embalagens flexíveis (sacos plásticos, filmes), recipientes para produtos químicos, tubos flexíveis, revestimentos de fios e cabos, entre outros. Além disso, o processo também produz HEVA (Etileno-Vinil Acetato de Alta Densidade), um copolímero que combina etileno com vinil acetato. O HEVA é utilizado em diversas aplicações, incluindo filmes para embalagens flexíveis, revestimentos para cabos e fios, adesivos termofusíveis, calçados e produtos médicos. Sua combinação única de propriedades o torna uma escolha versátil em diversas indústrias (LYB, c2024).

Para garantir a comparabilidade da análise, as plantas foram divididas em grupos com base nas características dos produtos que são produzidos. O Quadro 7 detalha as plantas e os grupos aos quais estão associadas, com base na produção.

Quadro 7 - Grupo de plantas por produtos

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P1	P2-P3-P4	P5-P6
Químicos	Polietileno	Polipropileno

Fonte: Elaborado pela autora

O Grupo 1, composto pelas plantas químicos, recebeu uma análise separada devido à sua tecnologia de produção única. Enquanto isso, o Grupo 2 abrange as instalações que fabricam resinas termoplásticas de polietileno, e o Grupo 3 se dedica à produção de termoplásticos de polipropileno. As comparações do grupo 2 são realizadas entre as plantas P2-P3-P4, assim como as plantas de Polipropileno do grupo 3 são comparadas entre si (P5-P6).

A produção petroquímica envolve um processo conjunto em que o eteno é produzido através do consumo de água, vapor e insumos de energia, resultando em emissões de CO₂. Essa relação entre a produção e as emissões de dióxido de carbono impede a possibilidade de aumentar a produção e reduzir simultaneamente as emissões. Portanto, neste contexto, é necessário modelar as emissões de CO₂ com base no conceito de descartabilidade fraca de saída indesejável. Esse conceito implica que as emissões de CO₂ devem ser tratadas como uma saída indesejável, que não pode ser completamente eliminada, mas pode ser gerenciada e minimizada por meio de estratégias de controle adequadas (Chen; Han; Zhu, 2017).

Nesta dissertação, a definição das variáveis foi, inicialmente, estabelecida por meio de uma revisão da literatura, considerando estudos relevantes sobre manufatura que utilizam a Análise Envoltória de Dados (DEA) em geral, e pesquisas que exploram a aplicação da Função da Distância Direcional em específico. A lista inicialmente levantada das variáveis utilizadas como referência nos artigos fundamentais para esta dissertação está apresentada no Quadro 8 servindo como ponto de partida para a definição das variáveis neste estudo.

Quadro 8 - Lista das variáveis dos artigos selecionados

Variável - Inputs	Fontes
Água	Song; Wang; Liu, (2014); Lu et al., (2019); Wang; Han; Yin, (2017); Ananda, (2019).
PIB	Song; Wang; Liu, (2014); Iram et al., (2020); Coli; Nissi; Rapposelli, (2011).
Estações de tratamento	Song; Wang; Liu, (2014).
Consumo de energia	Sanz-Díaz et al., (2017); Lu et al., (2019); Ignatius et al., (2016); Iram et al., (2020); Chen; Jia, (2017); Wang; Wang; Wei; Huang, (2018); Huang, (2018); Wang; Han; Yin, (2017); Grigoroudis; Petridis, (2018); Guo et al., (2019b); Wu et al., (2017); Emrouznejad; Yang, (2016); Wang et al., (2017); Tao; Li; Xia, (2012); Shah; Longsheng, (2020); Iram et al., (2020).
Capital fixo	Sanz-Díaz et al., (2017); Wang; Han; Yin, (2017); Wu et al., (2017); Zhang, (2010); Tao; Li; Xia, (2012).
Mão de Obra	Lu Et Al., 2019; Sala-Garrido et al., (2022); Chen; Jia, (2017); Wang; Han; Yin, (2017); Xu et al., (2021); Grigoroudis; Petridis, 2018; Guo et al., (2019b); Wu et al., (2017); Emrouznejad; Yang, (2016); Zofío; Prieto, 2001; Zhang, (2010); Wang et al., (2017); Tao; Li; Xia, (2012); Lin; Lin; Lu, (2018); Li; Zhu; Chen, (2020); Li; Zhu; Chen, (2020).
Despesas operacionais	Sala-Garrido et al., (2022); Xu et al., (2021); Ananda, (2019); Goto; Takahashi, (2017); Lin; Lin; Lu, (2018); Liu et al., (2019).
Investimentos em ativos fixos	Chen; Jia, (2017).
Entrada de poluentes e não poluentes	Wang; Wei; Huang, (2018).
Consumo de matéria-prima	Wang; Han; Yin, (2017); Wang; Wei; Huang, (2018).
Carvão consumido, capacidade do transformador	Liu et al., (2019).
Consumo de combustível	Xu et al., (2021).

Variável - Inputs	Fontes
Produção de energia	Grigoroudis; Petridis, (2018).
Dívidas totais	Goto; Takahashi, (2017).
Ativos fixos	Emrouznejad; Yang, (2016); Zofío; Prieto, (2001); Lin; Lin; Lu, (2018).
Estoque líquido total de capital fixo	Zofío; Prieto, (2001).
População	Iram et al., (2020).
Saídas desejadas	
PIB	Song; Wang; Liu, 2014; Sanz-Díaz et al., 2017; Iram Et Al., 2020; Chen; Jia, 2017; Wang; Wei; Huang, 2018; Grigoroudis; Petridis, 2018; Wu et al., 2017; Coli; Nissi; Rapposelli, 2011; Shah; Longsheng, (2020).
Produção de energia	Lu Et Al., (2019).
Eletricidade consumida	Ignatius et al., 2016; Ananda, (2019).
Volume de água potável	Sala-Garrido et al., (2022).
Geração de eletricidade	Wang; Wei; Huang, (2018).
Produtos	Wang; Han; Yin, (2017).
Receita	Xu et al., 2021; Goto; Takahashi, (2017).
Valor agregado	Guo et al., 2019b; Goto; Takahashi, (2017).
Valor bruto de produção	Emrouznejad; Yang, (2016); Zofío; Prieto, (2001); Zhang, (2010); Tao; Li; Xia, (2012).
Inovação e valor de novos produtos	Wang et al., (2017).
Vendas	Lin; Lin; Lu, (2018).
Saídas Indesejadas	
Emissão de águas residuais	Song; Wang; Liu, (2014); Ananda, (2019); Tao; Li; Xia, (2012).
Emissões de gases de efeito estufa (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs e SF ₆)	Xu et al., (2021); Ananda, (2019); Wu et al., (2017); Zhang, (2010); Lin; Lin; Lu, (2018); Li; Zhu; Chen, (2020).
Emissões de CO ₂ (dióxido de carbono)	Sanz-Díaz et al., (2017); Lu et al., (2019); Ignatius et al., (2016); Iram et al., (2020); Wang; Wei; Huang, (2018); Liu et al., (2019); Grigoroudis; Petridis, (2018); Goto; Takahashi, (2017); Emrouznejad; Yang, (2016); Zofío; Prieto, (2001); Tao; Li; Xia, (2012); Shah; Longsheng, (2020).
Emissão de SO ₂ (dióxido de enxofre)	Chen; Jia, (2017); Wang; Wei; Huang, (2018); Liu et al., (2019); Grigoroudis; Petridis, (2018); Tao; Li; Xia, (2012).
Emissão de NO ₂ (dióxido de nitrogênio)	Wang; Wei; Huang, (2018); Liu et al., (2019); Grigoroudis; Petridis, (2018); Guo et al., (2019b); Coli; Nissi; Rapposelli, (2011).
Emissão de resíduos sólidos industriais	Chen; Jia, (2017); Wang; Han; Yin, (2017); Guo et al., (2019b); Wang et al., (2017); Tao; Li; Xia, (2012); Lin; Lin; Lu, (2018).

Variável - Inputs	Fontes
Emissão de fuligem	Wang; Wei; Huang, (2018).
Emissões de poeira	Guo et al., (2019b).
Consumo de energia	Sanz-Díaz et al., (2017).
Volume de vazamento de água	Sala-Garrido et al., (2022).
Nº de interrupções de abastecimento	Sala-Garrido et al., (2022).
Atrasos de voos	Xu et al., (2021).
Descarte de lixo	Li; Zhu; Chen, (2020).

Fonte: Elaborado pela autora.

As variáveis apresentadas no Quadro 8 desempenham um papel fundamental ao fornecer um panorama abrangente dos dados de entrada e saída desejados e indesejados, conforme identificados na literatura. Esse levantamento é particularmente relevante no contexto da indústria de manufatura, onde as variáveis de entrada e saída mais prevalentes estão minuciosamente discriminadas no quadro em referência. Com base nas variáveis identificadas na literatura, foram estabelecidas as variáveis do modelo. Posteriormente as variáveis foram revisadas e discutidas com especialistas da área, a fim de garantir sua qualidade e confiabilidade. Essa etapa permitiu uma validação adicional dos dados, levando em consideração a expertise e o conhecimento específico dos profissionais envolvidos. As informações referentes aos especialistas selecionados, bem como as justificativas para a escolha de cada um deles, são apresentadas de forma detalhada no Quadro 9.

Quadro 9 - Especialistas da área

Especialistas	Motivo da escolha	Anos
1. Especialista em gestão de projetos (2010), inovação (2012) e em sustentabilidade.	Especialista em Sustentabilidade. Pesquisadora na área de Sustentabilidade.	13
2. Engenheira de empreendimentos na Indústria Petroquímica.	Doutoranda em Eng. De Produção profissional da Indústria Petroquímica.	20
3. Doutor em Engenharia Industrial e Sistemas/Segurança/Análise de Eficiência.	Especialista e pesquisador em DEA e DDF.	4
4. Engenheiro de Produção na Indústria Petroquímica	MBA Supply Chain, profissional da Indústria Petroquímica	14

Especialistas	Motivo da escolha	Anos
5.Engenheiro Químico	Especialista em engenharia de Processos Petroquímicos	2

Fonte: Elaborado pela autora.

O especialista 1 ofereceu informações relevantes relacionadas diretamente à sustentabilidade. Por sua vez, o especialista 2 e 5 forneceram detalhes e especificações sobre os dados, processos produtivos e o entendimento da empresa em estudo. Finalmente, o especialista 3 conduziu discussões sobre o modelo DEA, destacando a Distância Direcional (DDF), além de apresentar alguns critérios de análise baseados na fronteira de eficiência.

Explorando os dados, a indústria petroquímica se destaca pela abrangência de seus processos operacionais, que são em sua maioria complexos e diversificados. Um aspecto crucial é o consumo significativo de água presente em várias etapas do processo, desempenhando um papel fundamental em operações como resfriamento, limpeza e reações químicas (James, 2004). O consumo de energia como entrada é intensivo principalmente nos processos de destilação, compressão, reações químicas e produção de calor. O consumo de energia é um dos principais custos operacionais e, em muitos casos, a indústria busca fontes de energia mais limpas e eficientes para reduzir os custos e a pegada ambiental (Chen; Han; Zhu, 2017). Além disso, quando examinamos os dados de saída, fica claro que a indústria petroquímica representa uma importante fonte de emissões de gases, especialmente de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases de efeito estufa (GEE). Essas emissões ocorrem ao longo de várias etapas do processo de produção e refino de produtos químicos a partir de hidrocarbonetos, como petróleo e gás natural. O dióxido de carbono (CO₂) é predominantemente gerado pela utilização de fontes de energia, combustíveis e eletricidade no processo petroquímico (Chen; Han; Zhu, 2017).

Assim como, durante as etapas de produção, é comum a geração de efluentes líquidos, que podem conter substâncias químicas, produtos intermediários, subprodutos ou resíduos de processo. Os resíduos podem ser divididos em resíduos sólidos, resíduos químicos, embalagens de produtos, materiais de limpeza, entre outros. Explicando sobre a energia consumida: As plantas petroquímicas podem ter sistemas de geração de energia própria, como usinas de cogeração ou caldeiras,

para suprir as necessidades energéticas do processo. Essa geração pode ser confiabilidade de operação para qualquer instabilidade da geração principal. Essas unidades podem utilizar diferentes fontes de energia, como gás natural, óleo combustível ou eletricidade, dependendo da disponibilidade e da viabilidade econômica. Por fim, uma questão de extrema importância é a emissão de gases. Durante a produção petroquímica, podem ocorrer emissões de gases, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (Nox), dióxido de enxofre (SO₂) e compostos orgânicos voláteis (VOCs). Essas emissões podem ser provenientes de combustão de combustíveis, reações químicas ou processos específicos da indústria petroquímica. Com base na revisão da literatura e na relevância para o setor petroquímico, serão definidas as variáveis de entrada (inputs) e saída (outputs) desejadas e indesejadas para a análise. As variáveis desejadas serão aquelas que indicam um desempenho ambiental positivo, enquanto as indesejadas representarão os impactos ambientais negativos

O modelo DEA proposto é utilizado para avaliar a eficiência ambiental de refinarias, e no Quadro 10 apresenta o detalhamento das variáveis definidas para este estudo.

Quadro 10 - Detalhamento das variáveis da Indústria Petroquímica

Variável	Nome	Descrição	Indicador
<i>Input1</i>	Consumo de água	A água é utilizada como solvente e como matéria-prima em alguns processos como resfriamento, limpeza e reações químicas.	m ³ /h
<i>Input2</i>	Consumo de energia	sistemas de energia consumida própria, como usinas de cogeração ou caldeiras, para suprir as necessidades energéticas do processo. Essas unidades podem utilizar diferentes fontes de energia, como gás natural, óleo combustível ou eletricidade, dependendo da disponibilidade e da viabilidade econômica	GJ/h
<i>Output1 - saídas desejadas</i>	Produção	total produzido de acordo com a especificidade de cada planta na indústria petroquímica em um determinado período.	t/mês
<i>Output2 - saídas indesejadas</i>	Geração de efluentes	geração de efluentes líquidos, que podem conter substâncias químicas, produtos intermediários,	m ³ /h

Variável	Nome	Descrição	Indicador
		subprodutos ou resíduos de processo.	
<i>Output3 - saídas indesejadas</i>	Geração de resíduos	resíduos sólidos, resíduos químicos, embalagens de produtos, materiais de limpeza, entre outros	Kg/h
<i>Output4 - saídas indesejadas</i>	Emissão de gases	emissões de gases, como dióxido de carbono (CO ₂), óxidos de nitrogênio (NO _x), dióxido de enxofre (SO ₂) e compostos orgânicos voláteis (VOCs)	Kg/h

Fonte: Elaborado pela autora.

Neste estudo, optou-se por utilizar o modelo DEA/DDF em rendimentos constantes de escala (CRS) com uma abordagem não orientada. Essa configuração CRS foi escolhida considerando a suposição de homogeneidade entre as Unidades de Tomada de Decisão, uma vez que todas fazem parte de uma mesma organização, porque é adequada para benchmarking interno (Macedo, 2023, p.94; De Souza et al., 2018). O modelo matemático proposto, tem o objetivo de: i) minimizar as entradas, ii) maximizar as saídas desejadas e iii) minimizar as saídas indesejadas.

3.4 COLETA DE DADOS

A base de dados empregada neste estudo foi compilada a partir de planilhas fornecidas pela empresa e relatórios anuais disponíveis ao público. A integração dessas fontes de dados internos da empresa com os relatórios anuais contribuiu significativamente para a robustez das análises realizadas nesta pesquisa

A fim de aprimorar a compreensão e a interpretação dos dados incorporados neste estudo, a Tabela 1 apresenta as medianas e desvios padrão dos inputs e outputs. A estatística descritiva desempenha um papel fundamental na análise estatística, buscando resumir, organizar e destacar os principais elementos dos dados coletados (Cooksey, 2020).

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis

INPUTS	Dados	Descrição	Média	Desvio Padrão
	Entrada	Consumo de água (m ³)		218.459,64

	Entrada	Consumo de energia (GJ)	660.302,89	1.475.649,43
OUTPUTS	Saída indesejada	Geração de efluentes (m ³)	57.138,93	108.686,99
	Saída indesejada	Geração de resíduos (Kg)	67.676,00	81.135,76
	Saída indesejada	Emissão de gases (tCO ₂ e)	39.058,96	94.578,28
	Saída desejada	Produção (t)	60.412,5	96.315,73

Fonte: Elaborado pela autora

O consumo de água, os valores representam o consumo médio em metros cúbicos e o desvio padrão dos valores de consumo entre as diferentes unidades produtivas consideradas na análise. O consumo de energia, a média representa a quantidade média de energia gerada em giga joules, enquanto o desvio padrão indica o quanto os valores de consumo de energia variam entre as DMUs avaliadas. Para os efluentes, a média refere-se à quantidade média de efluentes gerados em metros cúbicos, e o desvio padrão mostra a dispersão dos valores de geração de efluentes entre as DMUs. Na geração de resíduos, a média representa a quantidade média de resíduos gerados em quilogramas, e o desvio padrão indica a variabilidade nos valores de geração de resíduos entre as diferentes DMUs. As emissões de gases são quantificadas utilizando a unidade de medida 'tCO₂e', que representa toneladas de dióxido de carbono equivalente. Essa métrica é amplamente adotada para expressar de forma padronizada as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de indústrias petroquímicas ou outras fontes. O volume de produção corresponde a quantidade em toneladas produzidas de químicos, resinas termoplásticas em especial o polietileno e polipropileno.

3.5 ANÁLISE DOS DADOS

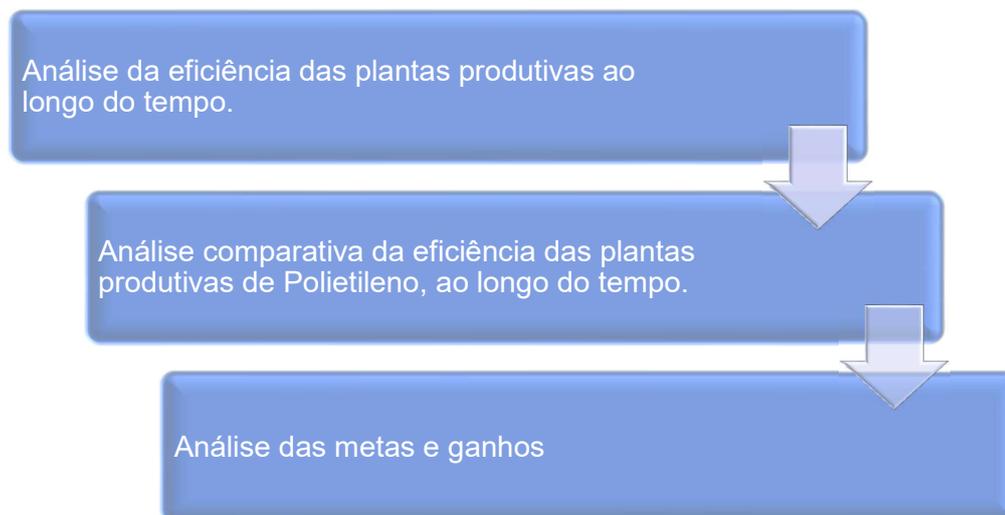
A análise de dados é um processo de avaliação de dados usando raciocínio analítico e lógico para examinar cada componente dos dados fornecidos. O objetivo da análise de dados é extrair informações úteis dos dados e tomar decisões com base neles (Islam, 2020). A análise de dados envolve uma série de operações estreitamente relacionadas que são realizadas visando resumir os dados coletados e organizá-los para fornecer respostas às perguntas de pesquisa ou sugerir

hipóteses ou perguntas, caso nenhuma dessas perguntas ou hipóteses tenha iniciado o estudo (Singh; Singh, 2015).

Os dados coletados foram aplicados no Studio, um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para a linguagem de programação R. A linguagem de programação R e seu popular ambiente de desenvolvimento, o RStudio, que são amplamente usados por pesquisadores empíricos para estatística computacional (Hair et al., 2021).

Os resultados gerados a partir do RStudio retornam à eficiência relativa de cada DMU. Além disso, é possível identificar as DMUS benchmarking para cada DMU ineficiente. O DEA também retorna os pesos e proporções para cada variável de entrada e saída usados para calcular a eficiência relativa das DMUs. Esses pesos mostram a contribuição de cada variável para a eficiência geral da DMU. Após obter os resultados de eficiência do RStudio, será iniciado o processo de análise dos dados. A Figura 5 ilustra os procedimentos realizados.

Figura 5 - Procedimentos de análise de dados



Fonte: Elaborado pela autora

Por meio da DEA/DDF pretende-se identificar os escores de eficiência ao longo do tempo. As plantas serão analisadas tanto individualmente (P1) quanto agrupadas por categorias de produtos (P2-P3-P4 e P5-P6), buscando obter uma compreensão completa da eficiência operacional. Os grupos são definidos da seguinte forma: Grupo 1 engloba os produtos químicos, representados pela planta P1 que trabalha com eteno. O Grupo 2 abrange a produção de polietileno, com as

plantas P2 (utilizando o processo Spherilene), P3 (Slurry) e P4 (Tubular). As plantas que compõem o Grupo 3 são a P5 e P6, as quais adotam a tecnologia Spheripol.

Após a formulação dos grupos em termos de comparabilidade, percebeu-se que as plantas de Polietileno executam a produção, considerando tecnologias de produção distintas. Desta forma, é avaliada a hipótese relacionada ao impacto (positivo ou negativo) da tecnologia de produção na eficiência ambiental, considerando especificamente as plantas produtivas deste produto (grupo 2)

Para avaliar se existe diferença entre as eficiências das plantas, foram realizadas análises estatísticas. Inicialmente foi realizado o teste de *Shapiro-Wilk* para avaliar a normalidade dos dados relacionado aos scores de eficiência de cada planta. Como os dados não cumpriram o pressuposto de normalidade, foi utilizado o teste não paramétrico de *Mann-Whitney* para avaliar a diferença as medianas entre os scores de eficiência. O teste *Mann-Whitney U* é indicado para avaliar a diferenças entre as medianas de grupos de dados independentes (Wall Emerson, 2023).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da eficiência são analisados por grupos de produtos. Além disso, são realizadas as análises em relação aos efeitos proporcionados pela tecnologia de produção na eficiência ambiental. Por fim, são analisados as metas e os ganhos.

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DA PLANTA DE QUÍMICOS – P1

A unidade de processamento P1 usa a nafta como matéria-prima. Os produtos resultantes desse processo são utilizados internamente ou comercializados, incluem condensados, GLP, eteno, propeno, butadieno e aromáticos. A Tabela 2 mostra a média anual da eficiência da planta P1. Os escores de eficiência considerando todos os períodos são mostrados no Apêndice 3.

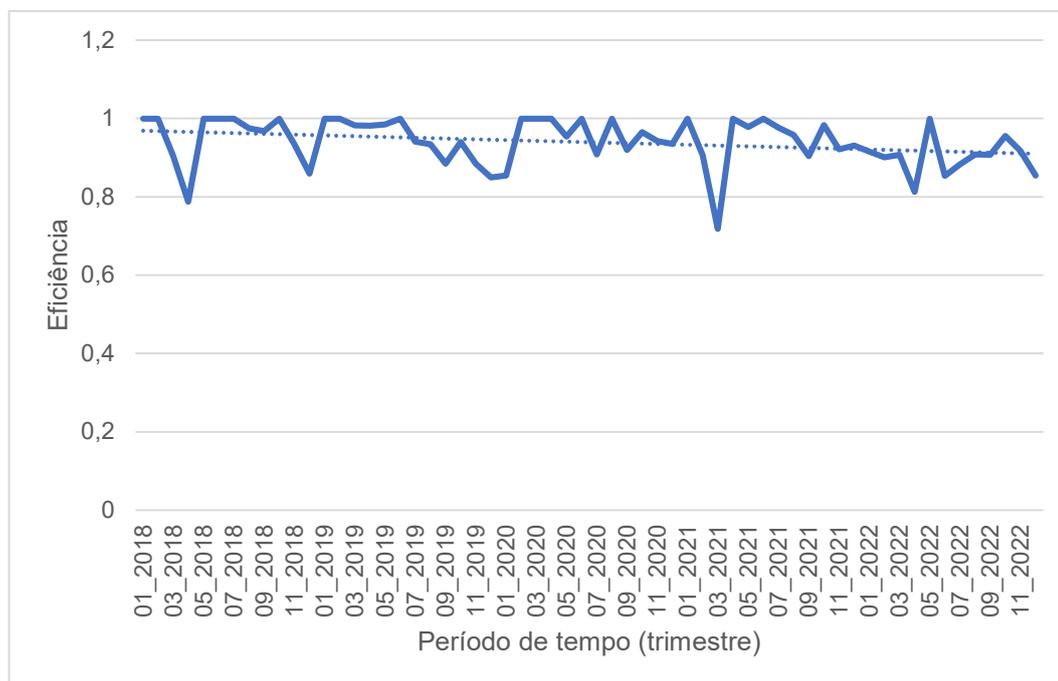
Tabela 2 - Eficiência unidade químicos – P1

Período	Média anual
2018	0,952
2019	0,948
2020	0,956
2021	0,939
2022	0,901
Média	0,939
Desvio padrão	0,022
Mediana	0,948

Fonte: Elaborada pela autora.

A variação nos níveis de eficiência ao longo dos anos pode ser influenciada por uma série de fatores, como aumento no consumo de água e energia, geração de resíduos e efluentes e aumento nas emissões de gases. A média geral desses anos foi de 93,96% e a mediana de 94,84%. O Gráfico 2 apresenta os índices de eficiência da planta no período de cinco anos, considerando cada trimestre.

Gráfico 2 - Índice de eficiência da planta P1



Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência da planta diminuiu em abril de 2018, coincidindo com um aumento no consumo de energia durante esse período. Manutenções em equipamento de compressão pode levar a necessidade de compensação por meio de outros equipamentos ou processos, aumentando potencialmente o consumo de energia. Fatores externos como restrições logísticas podem indicar períodos de operações menos eficientes, o que pode resultar em um aumento no consumo de energia para alcançar as metas de produção. Contaminações ácidas resultam em ajustes nos processos de produção que podem aumentar temporariamente o consumo de energia. Durante o período de 2019 a 2022, a unidade química P1 registrou as maiores emissões, com uma média de 15 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e), o que corresponde a 71% das emissões totais de todas as plantas.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS PLANTAS DE POLIETILENO P2-P3-P4

Para uma análise mais abrangente da eficiência e para identificar semelhanças entre as tecnologias de produção, as plantas foram categorizadas com

base nos tipos de produto fabricados. As resinas termoplásticas de polietileno foram agrupadas no conjunto P2-P3-P4. A Tabela 3 apresenta a média, mediana e desvio padrão da eficiência das plantas de polietileno no período. Os escores de eficiência considerando todos os períodos são mostrados no Apêndice 2.

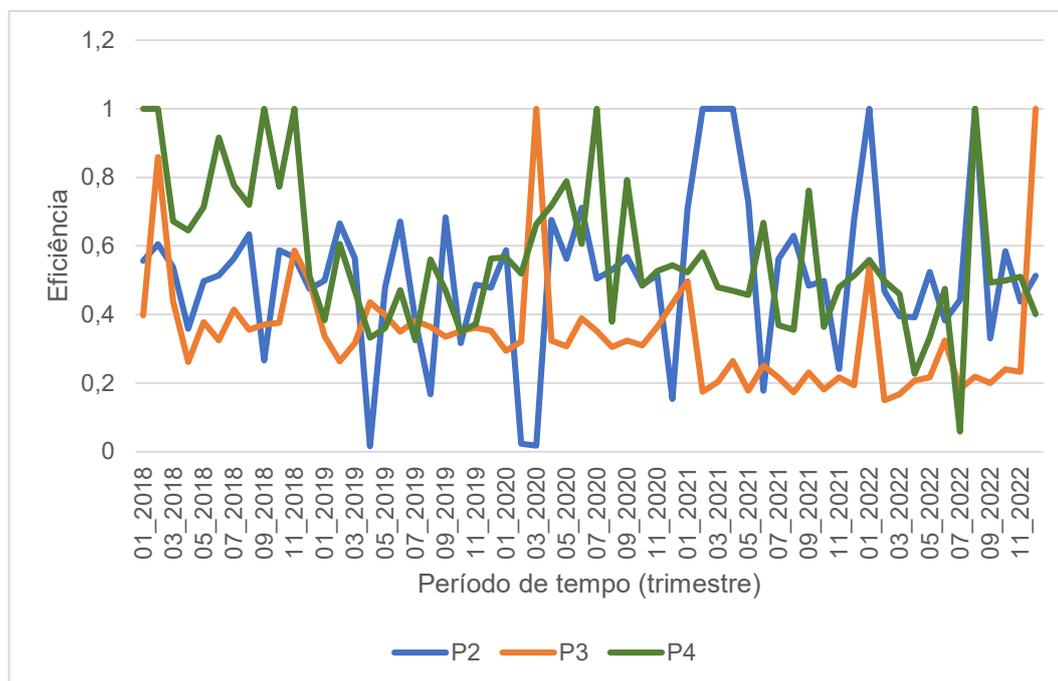
Tabela 3 - Eficiência das plantas de polietileno P2-P3-P4

Período	Média anual P2 Spherilene	Média anual P3 Slurry	Média anual P4 Tubular
2018	0,513	0,438	0,811
2019	0,451	0,354	0,439
2020	0,444	0,393	0,632
2021	0,642	0,232	0,502
2022	0,539	0,307	0,460
Média	0,518	0,345	0,569
Desvio padrão	0,080	0,079	0,155
Mediana	0,513	0,354	0,502

Fonte: Elaborada pela autora.

Com base nos dados fornecidos para as médias anuais das plantas P2, P3 e P4 ao longo dos anos de 2018 a 2022, juntamente com as estatísticas como média, desvio padrão e mediana, podemos fazer algumas observações sobre as plantas. A planta P2 apresenta uma média anual relativamente estável ao longo dos anos, com uma média de 0,518. A planta P3 mostra uma tendência de queda em suas eficiências ao longo dos anos, com uma média anual de 0,345, a mediana de 0,354 reforça que a eficiência da planta tem sido mais baixa ao longo do período analisado. Para a planta P4, o desvio padrão de 0.155 indica que houve variações consideráveis nas eficiências ao longo dos anos, sugerindo possíveis variações na operação ou no processo. A mediana de 0.502 indica que, apesar das flutuações, a eficiência da planta P4 tende a se concentrar em torno desse valor. As plantas P2 e P3 que apresentam desvio padrão mais baixo podem indicar uma operação mais estável, ao contrário da P4 com desvio padrão de 0,155 que pode sugerir instabilidade no processo. O Gráfico 3 ilustra o comportamento da eficiência das plantas de polietileno no período de cinco anos, considerando cada trimestre.

Gráfico 3 - Eficiência das plantas de polietileno P2 – P3 – P4

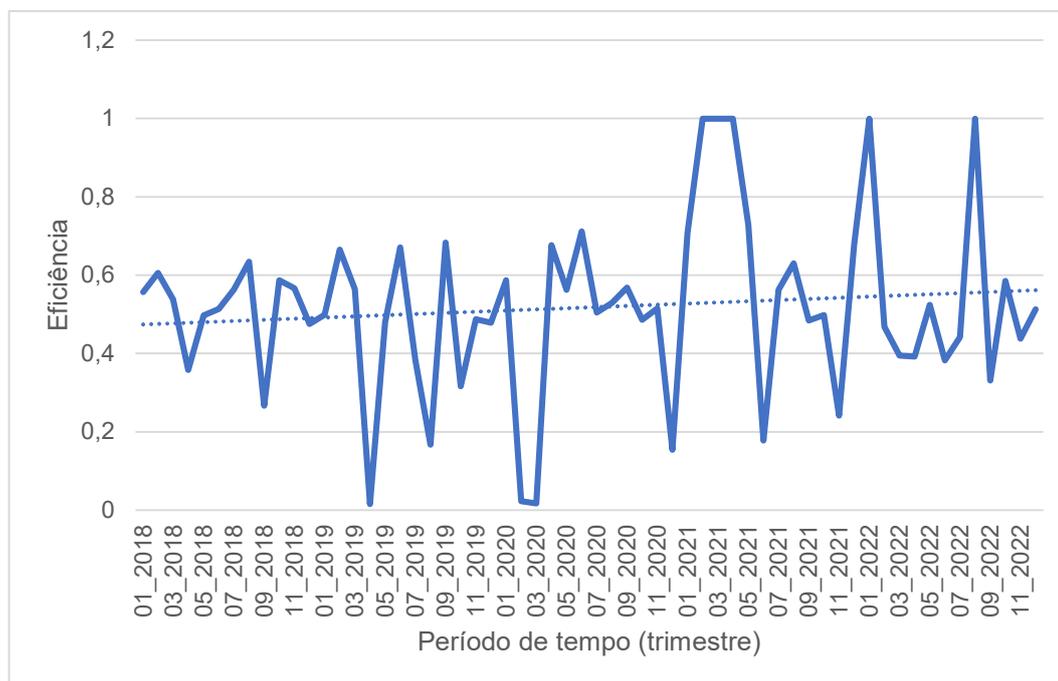


Fonte: Elaborado pela autora.

A oscilação nos scores e os baixos índices de eficiência estão relacionados, em parte, ao aumento do consumo de água. É crucial enfatizar que a avaliação de eficiência por produto engloba uma visão integrada das três unidades de produção, levando em conta o consumo de água e energia, bem como a geração de efluentes e resíduos, além do volume de produção. Portanto, a eficiência observada não é estática, mas sim flutuante, refletindo a interação complexa e dinâmica entre esses fatores operacionais e de produção ao longo do tempo. A média das emissões de gases das plantas de polietileno P2-P3 e P4 é de 241,01t(CO₂e) em comparação com as plantas de polipropileno que é de 584,31t(CO₂e) no mesmo período.

Com o intuito de promover uma compreensão mais clara do comportamento das plantas, apresentamos abaixo os gráficos individuais correspondentes a cada uma delas. O Gráfico 4 ilustra o comportamento da planta de polietileno de alta densidade P2.

Gráfico 4 - Eficiência da planta de polietileno P2

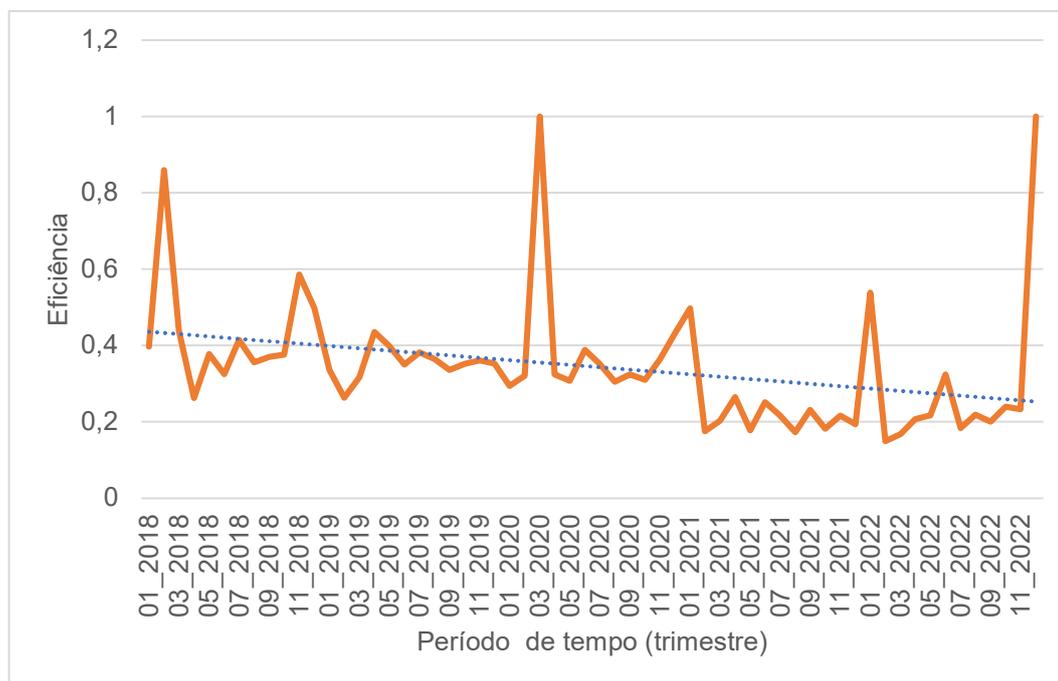


Fonte: Elaborado pela autora.

Os pontos de menor eficiência estão relacionados ao maior consumo de água na planta. Fatores, incluindo o volume de produção abaixo do esperado, o uso intensivo de água para limpeza e os problemas de qualidade da água de reposição, podem contribuir para um aumento no consumo total de água na planta P2. Paradas de equipamentos como compressores para manutenção mecânica acarretam redução da produção, impactando diretamente a eficiência operacional. Os testes nos catalisadores têm como resulta em um aumento no consumo de água e energia na geração de efluentes e resíduos.

A planta P3, produz resina termoplástica de polietileno de alta densidade, uma característica importante dessa produção é o uso de processos de polimerização. O vapor é consumido em abundância neste processo, desempenhando um papel crucial ao fornecer energia térmica, como no processo de destilação. Como resultado, há um consumo elevado de água e energia nesta operação. O Gráfico 5 ilustra a eficiência da planta P3 no período.

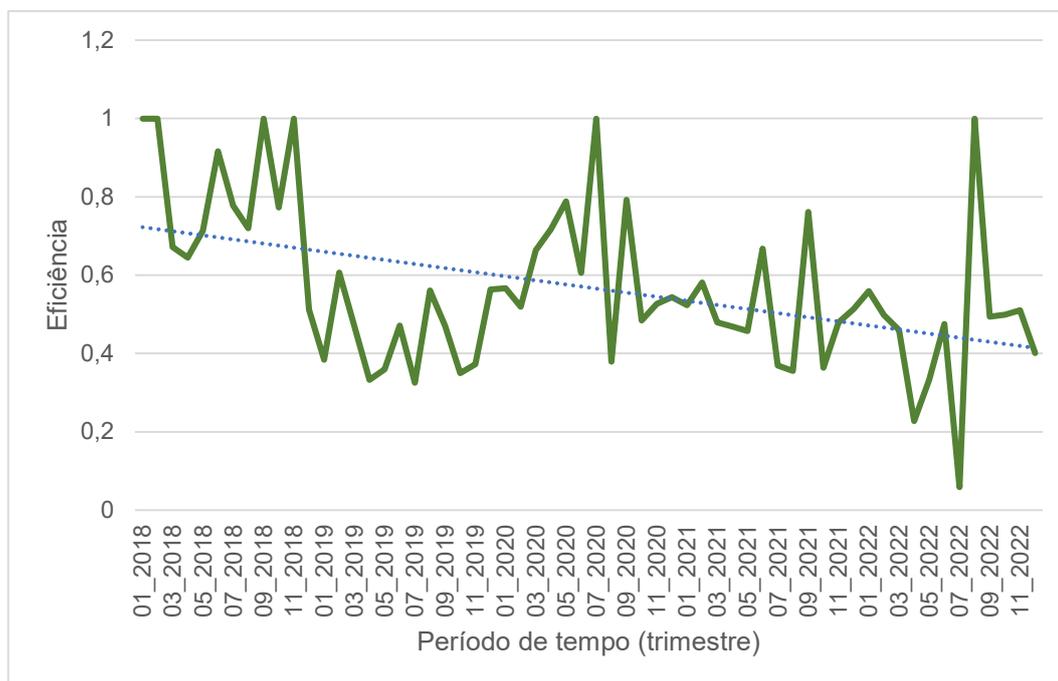
Gráfico 5 - Eficiência da planta de polietileno P3



Fonte: Elaborado pela autora.

O vapor é consumido abundantemente neste processo, desempenhando um papel crucial ao fornecer energia térmica, como no processo de destilação. Como resultado, há um consumo significativo de água e energia nesta operação. A eficiência média da planta P3 é de 0,345 (34%), indicando uma menor eficiência em comparação com as demais. Esses resultados são atribuídos a desafios como perda de vapor devido a temperaturas elevadas, exigindo reposição de água e resultando em um aumento no consumo de água e energia. Além disso, há ocorrência de efluente acima do previsto devido a vazamentos subterrâneos. O Gráfico 6 mostra os scores de eficiência da planta P4 no período.

Gráfico 6 – Eficiência da planta de polietileno P4



Fonte: Elaborado pela autora.

Durante os períodos de baixa eficiência, observou-se um aumento no consumo de água devido à necessidade de realizar atividades de resfriamento, além de um consumo de vapor acima do estipulado. O consumo de água pode aumentar devido à produção excedendo o planejado para o período, assim como à geração de efluentes e resíduos.

4.3 ANÁLISE DO IMPACTO DA TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO NA EFICIÊNCIA – PLANTAS DE POLIETILENO (P2-P3-P4)

A compreensão do impacto da tecnologia de produção na eficiência ambiental é essencial para avaliar os potenciais efeitos das escolhas tecnológicas sobre o meio ambiente. Embora outros fatores, além da tecnologia – não capturadas nesta avaliação - também possam afetar a eficiência, procurou-se atribuir as diferenças ou não dos níveis de eficiência a tecnologia de produção. Essa hipótese foi discutida e validada com os especialistas do processo (Especialista 2 e Especialista 5).

Para investigar possíveis indícios dos efeitos da utilização de cada tecnologia na eficiência ambiental, foram formuladas hipóteses específicas, as quais foram posteriormente testadas utilizando o teste de Mann-Whitney. Após a identificação

das diferenças das tecnologias de cada planta tornou-se essencial elaborar as hipóteses para contatar o impacto das tecnologias sobre o resultado da eficiência, são elas:

H0a: Não existem evidências da diferença entre as eficiências ambientais das plantas que utilizam tecnologia de produção Spherilene e Slurry.

H1a: Existem evidências da diferença entre as eficiências ambientais das plantas que utilizam tecnologia de produção Spherilene e Slurry.

H0b: Não existem evidências da diferença entre as eficiências ambientais das plantas que utilizam tecnologia de produção Spherilene e Tubular.

H1b: Existem evidências da diferença entre as eficiências ambientais das plantas que utilizam tecnologia de produção Spherilene e Tubular.

H0c: Não existem evidências da diferença entre as eficiências ambientais das plantas que utilizam tecnologia de produção Slurry e Tubular.

H1c: Existem evidências da diferença entre as eficiências ambientais das plantas que utilizam tecnologia de produção Slurry e Tubular.

Nas hipóteses H0 e H1 as terminações a, b e c referem-se respectivamente as tecnologias Spherilene, Slurry e Tubular. Nos resultados do teste, um valor de $p \leq 0,05$ indica diferença significativa entre as medianas, enquanto um valor de $p \geq 0,05$ indica que as medianas não diferem de maneira significativa (Wall Emerson, 2023). A Tabela 4 apresenta a matriz de resultados do teste Mann-Whitney e a tecnologia de produção de cada planta de polietileno.

Tabela 4 - Matriz dos resultados teste Mann-Whitney

	P2 – Spherilene	P3 – Slurry	P4 – Tubular
P2 – Spherilene			
P3 – Slurry	< 0,001		
P4 – Tubular	0,517	< 0,001	

Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 5 apresenta uma comparação das medianas e o resultado do teste de hipóteses.

Tabela 5 - Análise comparativa – resultado do teste de hipótese

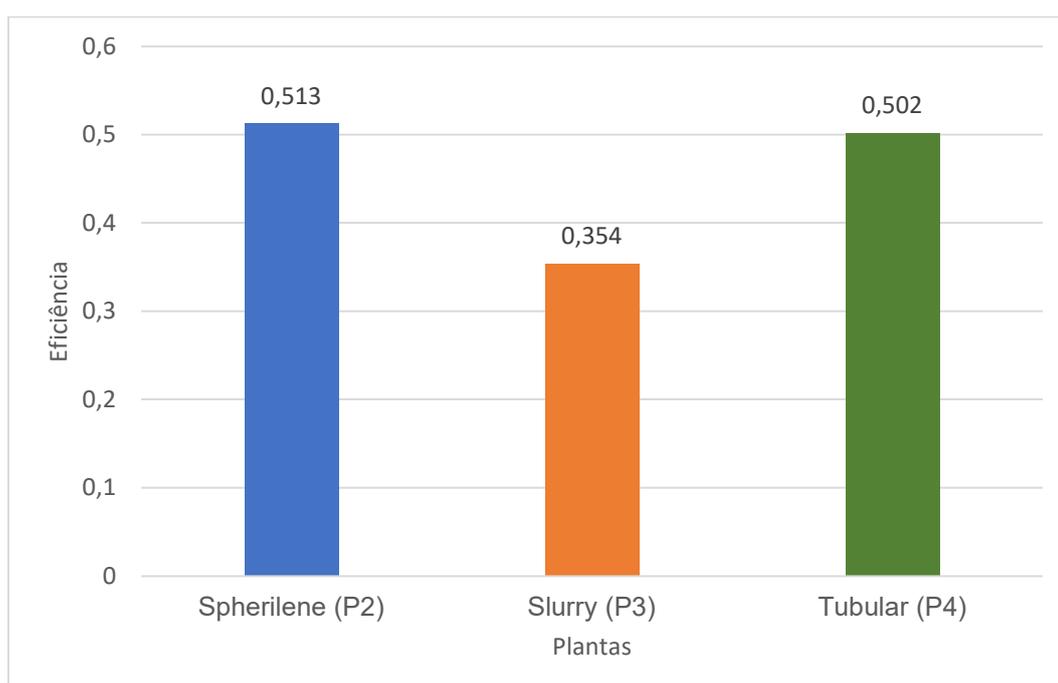
Descrição	Análise comparativa		
	Spherilene (P2)	0,513	0,513
Slurry (P3)	0,354		0,354
Tubular (P4)		0,502	0,502
Diferença	0,159	0,011	0,148
MW (p-value)	<0,001	0,517	<0,001
Teste hipótese	Rejeita H0 – Não rejeita H1	Não rejeita H0 – Rejeita H1	Rejeita H0 – Não rejeita H1

Fonte: Elaborada pela autora.

A diferença entre a planta Spherilene e tecnologia Tubular é de 1% o que pode ser considerado relativamente baixo. Neste contexto, a conclusão é que a hipótese nula (H0b) não pode ser rejeitada. Isso significa que não foram encontradas evidências que indiquem uma diferença significativa nas eficiências ambientais entre as plantas que adotam diferentes tecnologias Spherilene e Tubular.

A análise das tecnologias que empregam o processo Slurry, em comparação com a Spherilene e a Tubular, revela uma interferência negativa nos resultados obtidos. Essa observação sugere que a utilização da tecnologia Slurry desempenha um papel significativo no comportamento da eficiência ambiental, destacando a sua influência no contexto das comparações realizadas. No Gráfico 7 pode-se observar a mediana da eficiência plantas de polipropileno.

Gráfico 7 – Mediana da eficiência – plantas polietileno



Fonte: Elaborado pela autora.

A mediana da eficiência da planta P2 com tecnologia de produção Spherilene apresenta maior eficiência entre as demais, nessa análise a Slurry representa menor eficiência das demais.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS PLANTAS DE POLIPROPILENO P5-P6

Seguindo as análises por tipo de produto, as duas plantas que produzem resinas termoplásticas de polipropileno foram agrupadas sendo representadas como P6 - P7. A Tabela 6 apresenta a média, mediana e desvio padrão da eficiência das plantas de polipropileno no período. Os escores de eficiência considerando todos os períodos são mostrados no Apêndice 3.

Tabela 6 -Eficiência da unidade de polipropileno – P5-P6

Período	Média anual P5 Spheripol	Média anual P6 Spheripol
2018	0,992	0,96
2019	0,969	0,942
2020	0,962	0,936
2021	0,941	0,949
2022	0,813	0,855
Média período	0,935	0,928
Desvio padrão	0,071	0,042
Mediana	0,962	0,942

Fonte: Elaborado pela autora.

Os scores de eficiência demonstram uma tendência decrescente na eficiência média anual ao longo dos anos. Começando com uma média de eficiência de 0,975 em 2018, há uma queda constante até chegar a 0,834 em 2022. Isso indica que, em média, a eficiência das unidades de polipropileno diminuiu ao longo dos anos. Não é possível observar a variação da eficiência nas plantas de polipropileno. O Gráfico 8 apresenta os índices de eficiência da planta no período de cinco anos, considerando cada trimestre.

Gráfico 8- Eficiência das plantas de polipropileno P6-P7



Fonte: Elaborado pela autora.

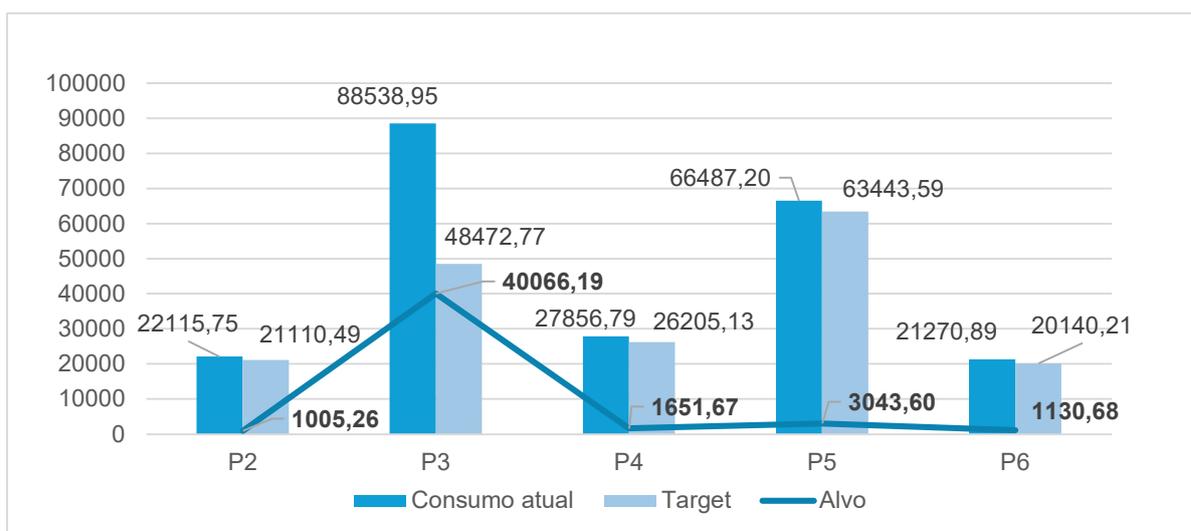
Embora as plantas de polipropileno registrem uma redução nos índices de eficiência, destacam-se pela sua estabilidade nessas medidas. Questões como a diminuição da produção e o aumento na geração de efluentes devido ao excesso de chuvas estão entre os motivos para os níveis inferiores de eficiência observados. O baixo volume de produção impacta diretamente na eficiência, conforme evidenciado pelo gráfico que mostra a baixa eficiência da planta P5 durante o primeiro trimestre de 2021. Além disso, destacam-se problemas como vazamentos registrados em maio de 2022. É importante ressaltar que para cada resultado de baixa eficiência, existe uma situação específica que demanda uma análise aprofundada.

4.5 ANÁLISE DAS METAS E GANHOS POR PLANTA

O cálculo dos alvos e folgas são valores de referência que devem ser utilizados como meta de melhorias. Esses parâmetros indicam qual a quantidade de insumos ou recursos que podem ser reduzidos ou ampliados para melhorar a eficiência do sistema. É importante salientar que o modelo adotado neste trabalho é não orientado, visando aumentar a eficiência ao reduzir os inputs, os outputs não desejados, enquanto aumenta os outputs desejáveis. A partir dos resultados obtidos

peelo modelo, é possível identificar quais inputs e outputs contribuem para o aumento da eficiência, seja por meio de sua redução ou acréscimo. Os gráficos a seguir exibem a média atual e os objetivos para cada indicador, nas plantas de polietileno e polipropileno, evidenciando o potencial de melhoria de cada DMU, ao longo do período de estudo.

Gráfico 9 - Metas por plantas consumo de água (m³)

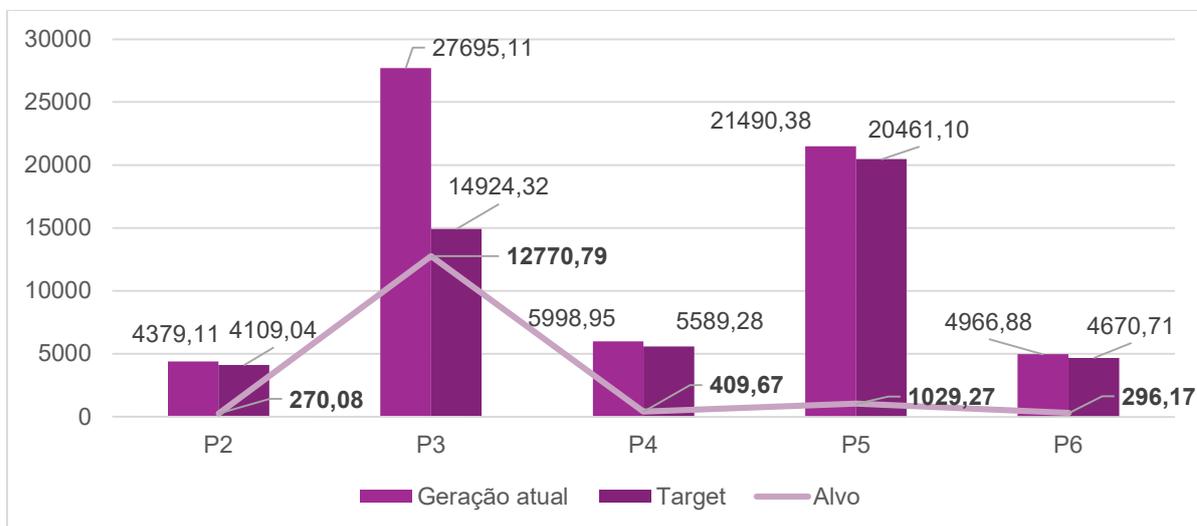


Fonte: Elaborado pela autora.

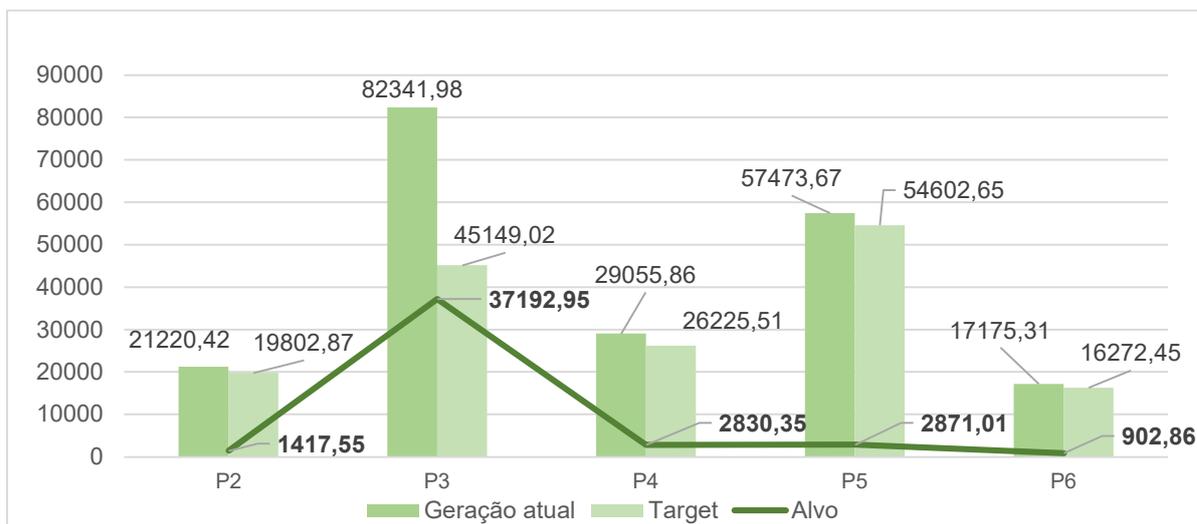
Gráfico 10 - Metas por plantas consumo de energia (GJ)



Fonte: Elaborado pela autora.

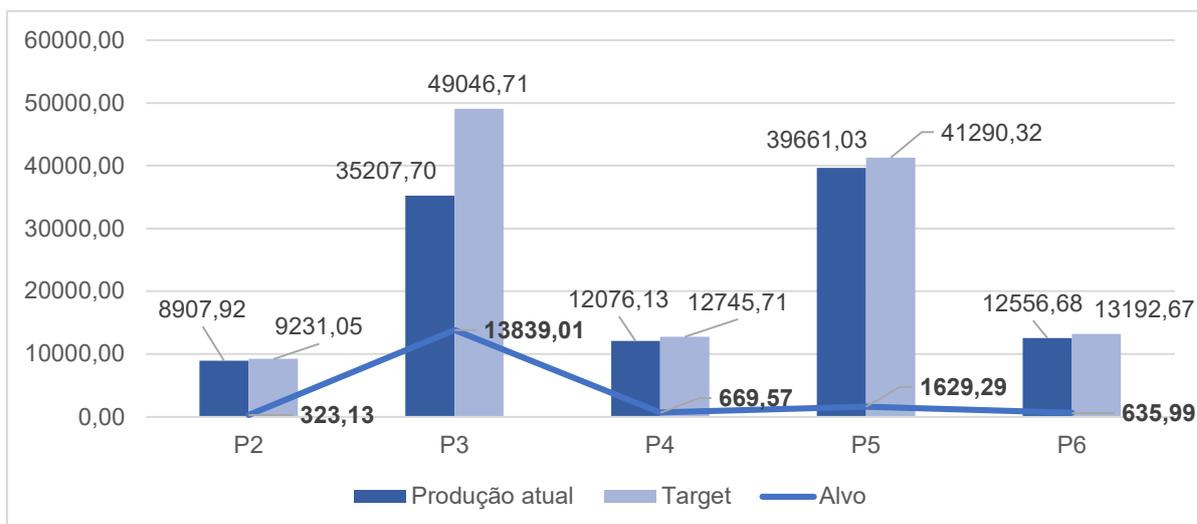
Gráfico 11 - Metas por plantas geração de efluentes (m³)

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 12- Metas por plantas geração de resíduos (Kg³)

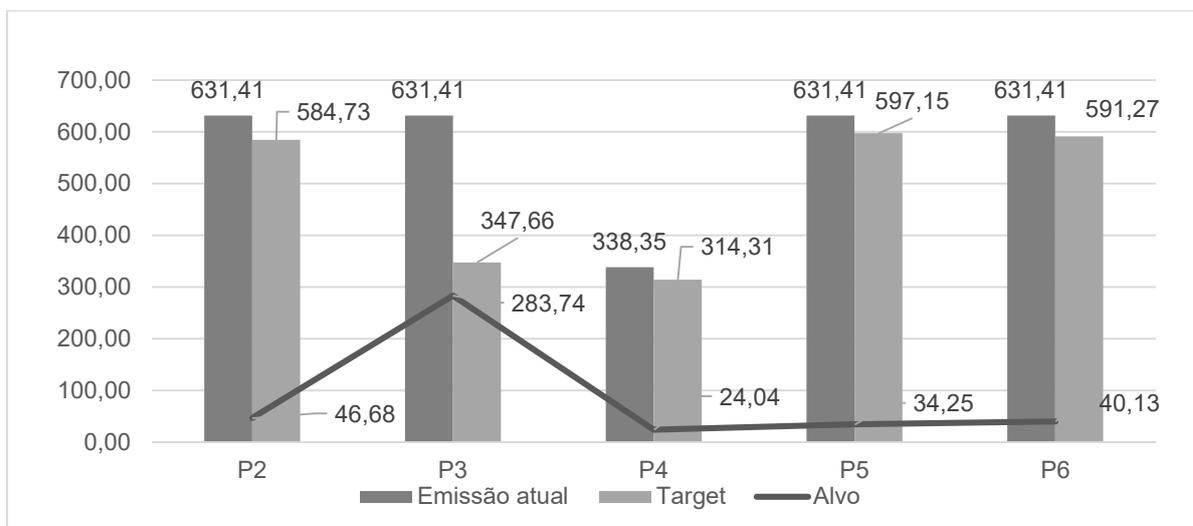
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 13 - Metas produção (Kg)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 14 - Metas por plantas emissões de gases (tCO2)



Fonte: Elaborado pela autora.

Os consumos de água e energia, as gerações de efluentes e resíduos, as emissões e a produção representam o volume total atual. O target indica o quanto deveria ser consumido para melhorar a eficiência, enquanto o alvo é a diferença entre o consumo atual e o target, sendo este valor considerado como a redução ou ampliação necessária para reduzir as ineficiências. A planta P3 apresenta o menor índice médio de eficiência no período, o que é confirmado pelo maior alvo observado em todos os inputs e outputs. Além disso, os resultados indicam que as plantas mais eficientes, como a P5 (com eficiência de 0,949), apresenta altos níveis de produção

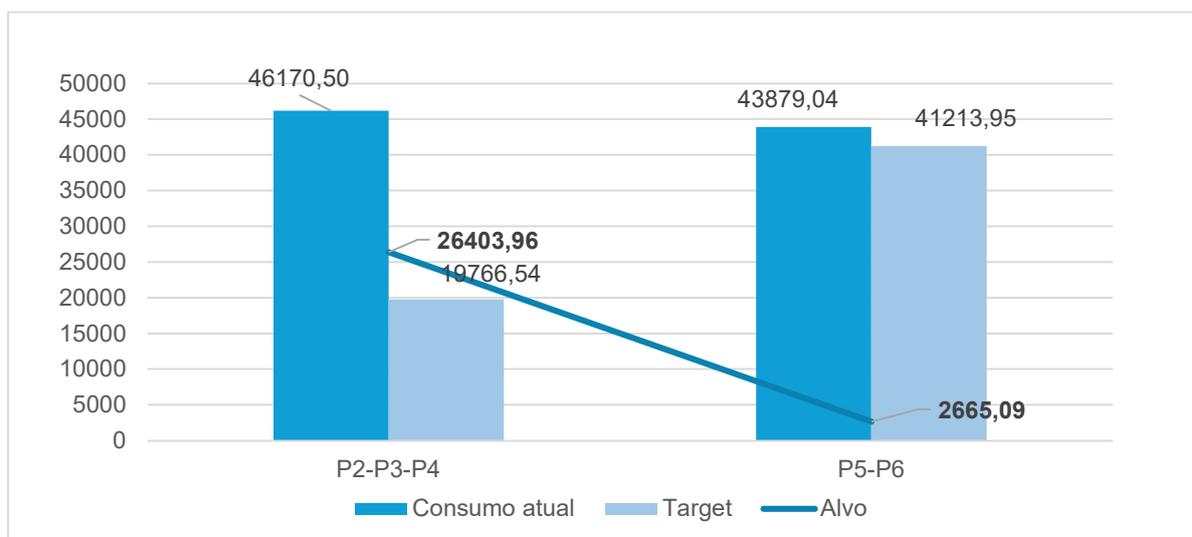
em relação à quantidade de água e energia utilizadas. Isso é evidenciado pelo baixo consumo-alvo desses dois insumos. As plantas P5 e P6 apresentam uma boa utilização dos recursos, porém podem aumentar a produção para melhorar a eficiência. Essas observações podem ser um ponto de partida para análises mais detalhadas sobre como cada planta gerencia seus recursos e quais estratégias poderiam ser aplicadas para melhorar a eficiência geral.

4.5.1 Análise das metas e ganhos por tipo de produto (grupos de análise)

A verificação dos alvos e folgas foi realizada também por grupo de produto fabricados. Os produtos estão divididos em P1 unidade química (grupo 1), P2-P3-P4 (grupo 2) para resinas termoplásticas polietileno e P5-P6 (grupo 3) em resinas termoplásticas de polipropileno. Para uma análise mais precisa, optou-se por focar apenas nas plantas de resinas termoplásticas devido à similaridade dos produtos.

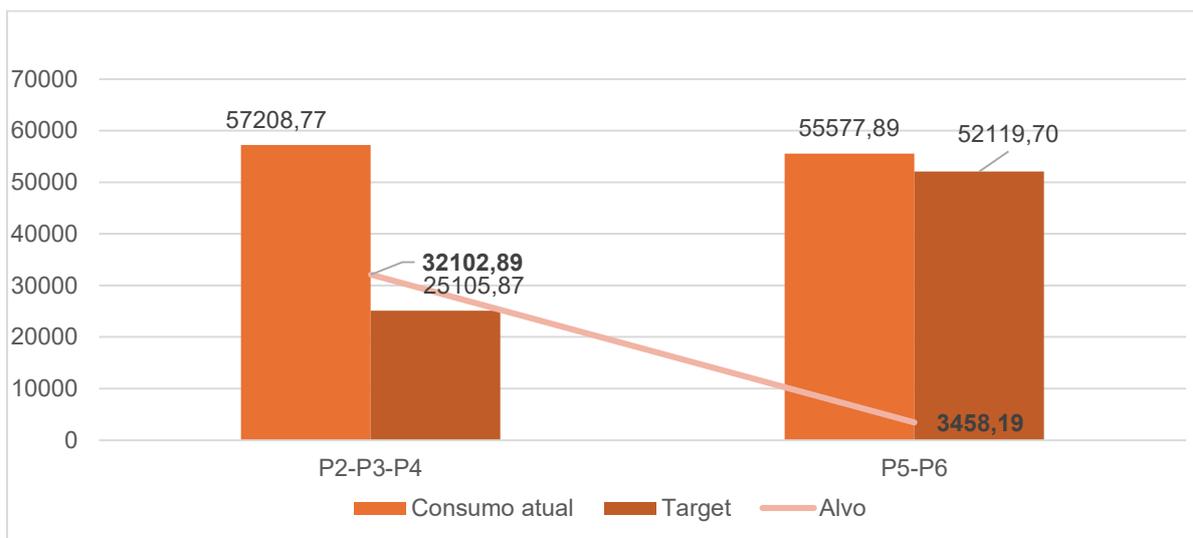
Os gráficos a seguir, apresentam a média dos objetivos de cada indicador, destacando o potencial de melhoria de cada DMU ao longo do período analisado e os resultados dos alvos por tipo de produto.

Gráfico 15 – Meta por produto consumo de água (m³)



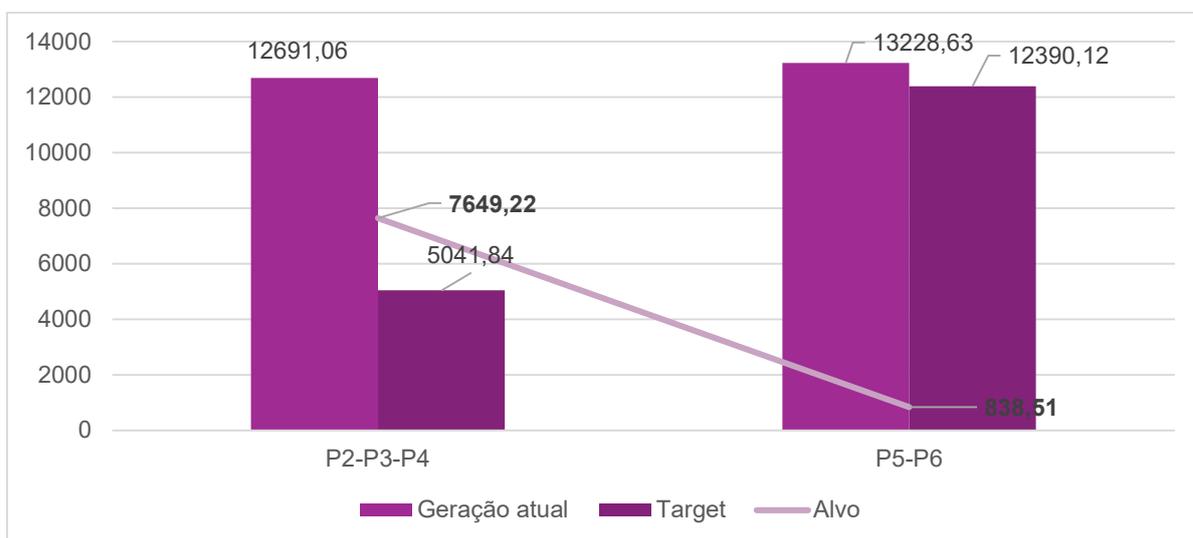
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 16 - Meta por produto consumo de energia (GJ)



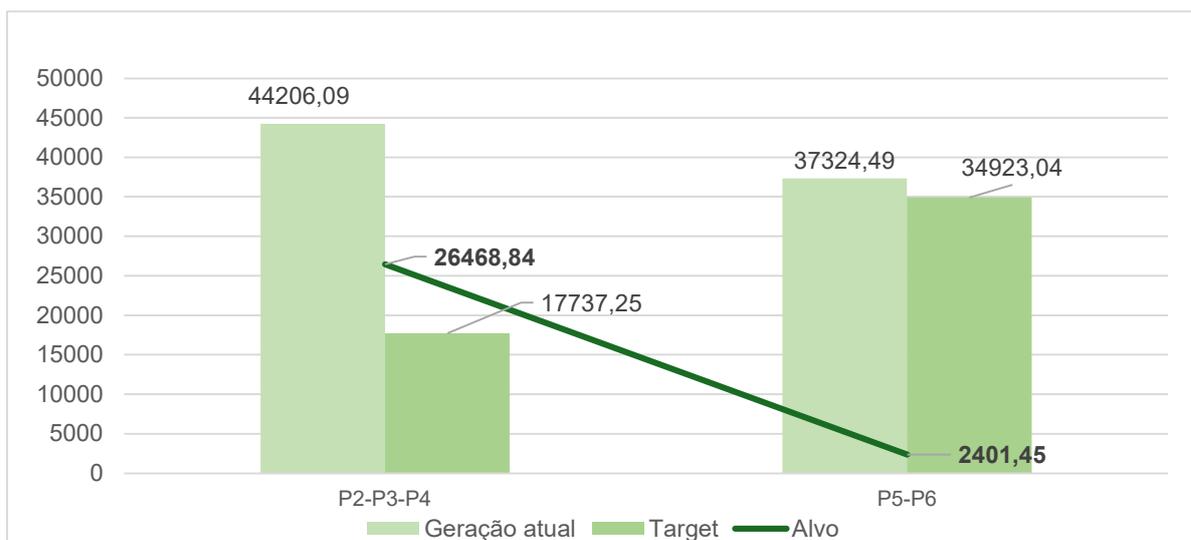
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 17 - Meta por produto geração de efluentes (m³)



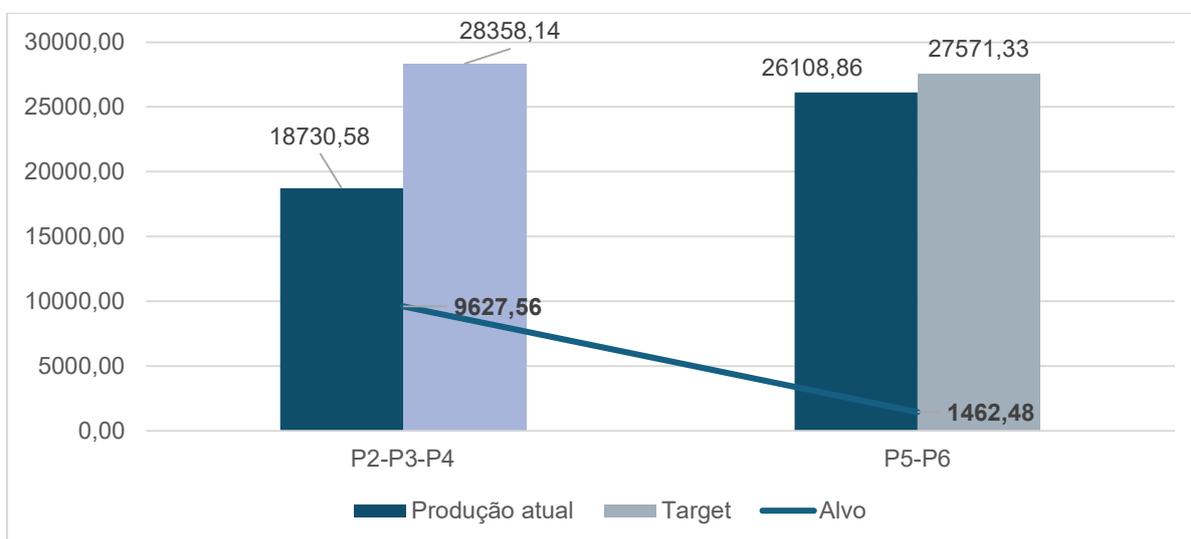
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 18 - Meta por produto geração de resíduos (Kg)

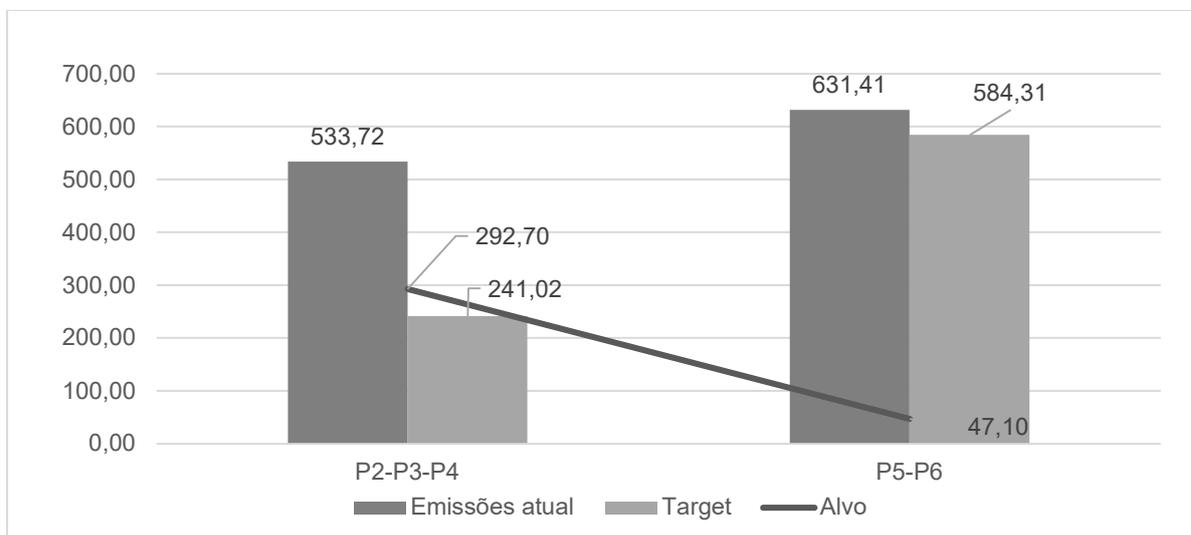


Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 19 - Meta por produto produção (t)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 20 - Metas por produto emissões de gases (tCO₂)

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados das plantas P2-P3-P4 destacam a necessidade de uma maior redução dos insumos, evidenciando a baixa eficiência da planta P3. Os scores de eficiência por planta mostram que a planta P3 está prejudicando os índices de desempenho do grupo, indicando que medidas corretivas específicas são necessárias para melhorar a sua performance. Para a produção dessas resinas, ao reduzir o consumo de água e energia, a geração de resíduos e emissões de gases viabiliza um possível ganho de eficiência, podendo ainda aumentar a produção. A produção de resinas termoplásticas de polipropileno apresenta um nível médio de eficiência de 0,9317, muito superior às plantas de polietileno com escores de 0,4597.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a análise dos resultados, é crucial realizar uma reflexão sobre as contribuições deste estudo. As seções subsequentes exploram as contribuições da pesquisa tanto para o avanço da teoria quanto para a empresa.

Este estudo representa uma contribuição acadêmica significativa ao expandir o entendimento da eficiência ambiental na indústria petroquímica. Ao investigar os processos e práticas neste contexto específico, oferece insights que podem ampliar o conhecimento existente sobre sustentabilidade industrial. Neste estudo, ao procurar pela planta mais eficiente, direcionamos nossa atenção para o Grupo 2, composto por três plantas distintas em tecnologia, mas comparáveis em termos de tipo de produto dentro do Grupo 2, a Planta P4 se destaca como a mais eficiente, evidenciando a melhor média anual de eficiência em comparação com as demais unidades. Várias características importantes dessa planta podem justificar essa maior eficiência: i) consumo de energia reduzido; ii) emissão de CO₂e menor; iii) baixo número de intercorrências no período, como problemas operacionais. Chen e Jia (2016) realizaram uma análise da eficiência ambiental nas indústrias regionais da China. Nesse estudo, os autores sugerem metas concretas, como a redução do consumo de energia, para os governos locais com base nas indústrias mais eficientes. As emissões de gases comprometem a eficiência ambiental, sendo que o uso de combustíveis fósseis é a principal fonte de emissões globais de CO₂ na atmosfera (Emrouznejad; Yang, 2016b).

A indústria petroquímica desempenha um papel significativo na economia regional, fornecendo uma ampla gama de produtos para diversas aplicações industriais e de consumo. No entanto, seu processo produtivo muitas vezes é associado a impactos ambientais significativos, como emissões de gases de efeito estufa, poluição do ar e contaminação do solo e da água. Nesse contexto, foram exploradas nesse trabalho as tecnologias dos processos, e na análise por grupo de produto. Entre as plantas que produzem polietileno P2-P3-P4, com as tecnologias Spherilene, Slurry e Tubular respectivamente, a tecnologia Slurry apresenta a menor eficiência. Essa constatação foi confirmada pelo especialista 1, destacando as lacunas e obstáculos enfrentados pela planta nesse contexto específico,

particularmente relacionados aos custos de manutenção, indicando a presença de tecnologia antiquada.

Além das tecnologias, impactarem nos resultados da eficiência ambiental, o controle das saídas indesejadas contribui negativamente para os índices de eficiência. Isso pode ser observado nos resultados das metas (alvos e folgas), que indicam que a planta com menor índice de eficiência gera mais resíduos e efluentes. Uma grande vantagem do DDF é sua capacidade de aumentar as saídas desejáveis enquanto reduz as saídas indesejáveis simultaneamente (Zhang; Choi, 2014b), (Ramli; Munisamy; Arabi, 2013a). A produção como saída desejada, poder ser aumentada nas três plantas do grupo 2 com a mesma quantidade de insumos. Porém a carga de produção da empresa em análise está diretamente relacionada a fatores externos. É importante notar que nos períodos de 2020, 2021 e 2022 ocorreram flutuações significativas na capacidade produtiva devido a esses fatores externos, por exemplo a pandemia da COVID-19.

Diferentes estudos que avaliam a eficiência ambiental utilizam a Análise Envoltória de Dados (DEA). Alguns desses estudos comparam a eficiência ambiental entre países ou entre diferentes setores manufatureiros (Shao; Wang, 2016). Outros propõem novas metodologias para a medição do desempenho ambiental (Zoffó; Prieto, 2001b). Em cada um desses segmentos, são empregados dados de entradas e saídas apropriados para análise. As informações sobre os inputs e outputs encontrados em outros estudos relacionados à indústria de manufatura estão alinhadas com os dados empregados neste trabalho. Nos estudos relacionados à indústria petroquímica, o consumo de energia e as emissões de gases são constantemente considerados como entradas e saídas indesejadas.

Alguns desses estudos abrangem uma grande amplitude, como por exemplo a avaliação da eficiência ambiental de 103 instalações industriais italianas (Coli; Nissi; Rapposelli, 2011b). Nesse sentido, um ponto relevante para a complexidade de trabalhos extensos está na confiabilidade dos dados, os quais devem ser consistentes e precisos para garantir resultados robustos e confiáveis.

Ao longo da pesquisa, diversas contribuições práticas e gerenciais são identificadas, direcionadas para a empresa em estudo. Uma das principais contribuições é a identificação dos recursos com sugestão de redução como geração de resíduos e efluentes (saídas indesejadas) e maximização da produção como uma

saída positiva e desejada. Esses escores permitem comparar o desempenho ambiental das plantas identificando tanto pontos fortes quanto áreas de oportunidade para melhoria.

Para melhorar a eficiência e minimizar a descartabilidade em todos os processos produtivos, é fundamental considerar diferentes tecnologias e parâmetros de produção. Processos que demonstram um desempenho superior em termos de consumo de recursos, gerando menos efluentes e resíduos durante a produção. Em contrapartida, plantas que apresentam menor eficiência nesses aspectos. Isso sugere que a escolha da tecnologia de produção pode ser crucial para aumentar a eficiência ambiental na indústria petroquímica.

Outro aspecto relevante abordado é a comparação das tecnologias utilizadas nas diferentes plantas. Essa análise permite determinar quais tecnologias contribuem mais para uma maior eficiência ambiental, fornecendo assim orientações claras para futuros investimentos em novas instalações. Além disso, a dissertação oferece insights cruciais para a gestão operacional da empresa. Através da identificação das plantas com alto consumo de recursos como água e energia, bem como aquelas que geram maiores quantidades de efluentes, resíduos e emissões de gases, a empresa pode direcionar seus esforços para implementar medidas de melhoria nessas áreas. Por fim, o estudo também aponta para a importância de identificar plantas que apresentam desempenho ambiental abaixo do esperado, o que pode levar a decisões estratégicas como a desativação de unidades não rentáveis ou não alinhadas aos objetivos ambientais da empresa.

Assim, a avaliação da eficiência ambiental realizada nesta dissertação não apenas fornece uma visão abrangente do desempenho ambiental da empresa, mas também oferece orientações práticas e estratégicas para a melhoria contínua de suas operações, contribuindo assim para sua sustentabilidade ambiental e competitividade no mercado.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência ambiental ao longo do tempo do processo produtivo de uma empresa petroquímica, utilizando o modelo DEA. Para atingir esse propósito, foi realizado um estudo de caso em uma empresa brasileira do setor petroquímico, empregando a técnica de análise envoltória de dados (DEA) com a função da distância direcional (DDF).

Ao analisar os estudos que investigam a eficiência ambiental em empresas de manufatura utilizando a DEA, percebe-se que essas pesquisas têm uma ampla aplicação em diversos segmentos, incluindo indústrias de carvão, energia e outros setores. Esses estudos, que buscam identificar os índices de eficiência ambiental, são conduzidos em empresas de manufatura de diversos países, sendo a China o país mais frequentemente analisado na maioria dessas pesquisas.

A indústria em análise exibe diferentes tecnologias, as quais foram avaliadas com base em suas características de produção. Foi constatado que a planta que emprega a tecnologia Slurry (planta P3) apresenta a menor eficiência. Esta conclusão está em consonância com os relatórios internos da empresa, que evidenciam os desafios enfrentados pela planta P3, bem como os investimentos necessários para aprimorar uma tecnologia considerada obsoleta.

Ao analisar os escores da eficiência ao longo do tempo, foi constatado que as plantas responsáveis pela produção de resinas termoplásticas de polietileno têm potencial para aumentar sua produção (saída desejada) utilizando a mesma quantidade de insumos. Além disso, a unidade química P1 também poderia aumentar sua produção. Quanto às saídas indesejadas, conforme os resultados, há oportunidade de reduzir a geração de efluentes e resíduos de todas as plantas. A planta que utiliza tecnologia menos eficiente tem um impacto negativo na eficiência ambiental. Seus processos produtivos, marcados por frequentes paradas, resultam na perda de vapor para reiniciar os processos, demandando uma quantidade maior de água e energia.

As emissões de gases não se apresentam de maneira significativa como uma saída indesejada, sugerindo, por meio dos relatórios, que não estão completamente consideradas nas medições. Enquanto isso, as gerações de efluentes e resíduos aparecem significativamente como saída indesejada e possibilidade de redução,

demandando uma oportunidade para mitigar seu impacto ambiental e promover práticas mais sustentáveis.

Esta pesquisa apresenta algumas limitações, incluindo uma análise não aprofundada das tecnologias envolvidas. No entanto, as informações disponíveis permitiram a realização das análises apresentadas neste estudo. As emissões de CO₂e para os anos em que os relatórios não continham dados de controle foram estimadas utilizando a média dos anos correspondentes. No entanto, é importante ressaltar que essa abordagem pode introduzir certa imprecisão nos resultados, pois não reflete diretamente as condições específicas de cada período.

Durante esta pesquisa, surgiu uma oportunidade promissora para pesquisas subsequentes. Uma abordagem seria ajustar os índices de entrada e saída conforme as metas estabelecidas, reexecutar o modelo e analisar os resultados em termos de eficiência. Com base nesses resultados, a empresa pode tomar decisões mais adequadas para melhorias. Explorando ainda mais a indústria petroquímica, investigações que se aprofundassem na otimização das tecnologias de produção e conduzissem análises comparativas mais minuciosas poderiam oferecer insights cruciais para aprimorar a eficiência e a sustentabilidade do setor. Esses estudos poderiam também identificar oportunidades de inovação e aperfeiçoamento dos processos industriais, promovendo avanços substanciais na competitividade e no desempenho ambiental das empresas petroquímicas.

Este estudo enfatiza a importância da eficiência ambiental no contexto da indústria petroquímica. Ao avaliar a eficiência ao longo do tempo e identificar áreas de oportunidade para melhorias, demonstramos como práticas sustentáveis podem ser integradas aos processos produtivos. A busca por eficiência não só beneficia o meio ambiente, reduzindo emissões e resíduos, mas também fortalece a competitividade das empresas, impulsionando a inovação e a excelência operacional. Portanto, investir em medidas que promovam a eficiência ambiental não é apenas uma escolha ética, mas também estratégica para garantir um futuro sustentável para a indústria petroquímica e para o planeta como um todo.

REFERÊNCIAS

ANANDA, J. Explaining the environmental efficiency of drinking water and wastewater utilities. **Sustainable Production and Consumption**, v. 17, n. xxxx, p. 188–195, 2019.

CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; SOUSA-ZOMER, T. T.; TORTORELLA, G. Methodological concerns in case-based research in industrial engineering: revisiting the challenges towards further recommendations. **Production**, v. 33, 2023.

CHAMBERS, R. G.; CHUNG, Y.; FÄRE, R. Benefit and distance functions. **Journal of Economic Theory**, v. 70, n. 2, p. 407–419, 1996.

CHEN, C. M. Evaluating eco-efficiency with data envelopment analysis: An analytical reexamination. **Annals of Operations Research**, v. 214, n. 1, p. 49–71, 2014.

CHEN, L.; JIA, G. Environmental efficiency analysis of China's regional industry: a data envelopment analysis (DEA) based approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 846–853, 2017a.

CHEN, L.; JIA, G. Environmental efficiency analysis of China's regional industry: a data envelopment analysis (DEA) based approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 846–853, 2017b.

CHEN, Y.; HAN, Y.; ZHU, Q. Energy and environmental efficiency evaluation based on a novel data envelopment analysis: An application in petrochemical industries. **Applied Thermal Engineering**, v. 119, p. 156–164, 2017a.

CHEN, Y.; HAN, Y.; ZHU, Q. Energy and environmental efficiency evaluation based on a novel data envelopment analysis: An application in petrochemical industries. **Applied Thermal Engineering**, v. 119, p. 156–164, 2017b.

CHENG, M. et al. Analysis of coordinated development of energy and environment in China's manufacturing industry under environmental regulation: A comparative study of sub-industries. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 22, 2019.

CHUNG, Y. H.; FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. **Journal of Environmental Management**, v. 51, n. 3, p. 229–240, 1997.

COLI, M.; NISSI, E.; RAPPOSELLI, A. Monitoring environmental efficiency: An application to Italian provinces. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 1, p. 38–43, 2011a.

COLI, M.; NISSI, E.; RAPPOSELLI, A. Monitoring environmental efficiency: An application to Italian provinces. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 1, p. 38–43, 2011b.

COOKSEY, R. W. **Illustrating Statistical Procedures: Finding Meaning in Quantitative Data, Third Edition**. [s.l.: s.n.].

ELLER, S. L.; HARTLEY, P. R.; MEDLOCK, K. B. Empirical evidence on the operational efficiency of National Oil Companies. **Empirical Economics**, v. 40, n. 3, p. 623–643, 2011a.

ELLER, S. L.; HARTLEY, P. R.; MEDLOCK, K. B. Empirical evidence on the operational efficiency of National Oil Companies. **Empirical Economics**, v. 40, n. 3, p. 623–643, 2011b.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. LIANG. CO2 emissions reduction of Chinese light manufacturing industries: A novel RAM-based global Malmquist-Luenberger productivity index. **Energy Policy**, v. 96, p. 397–410, 2016a.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. LIANG. CO2 emissions reduction of Chinese light manufacturing industries: A novel RAM-based global Malmquist-Luenberger productivity index. **Energy Policy**, v. 96, p. 397–410, 2016b.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. LIANG. A framework for measuring global Malmquist–Luenberger productivity index with CO2 emissions on Chinese manufacturing industries. **Energy**, v. 115, n. 2016, p. 840–856, 2016c.

FANG, L. Opening the “black box” of environmental production technology in a nonparametric analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 286, n. 2, p. 769–780, 2020.

FLACH, L. et al. Efficiency of expenditure on education and learning by Brazilian states: A study with Data Envelopment Analysis. **Contabilidad y Negocios**, v. 12, n. 23, p. 111–128, 2017.

FLEESON, W. et al. No {Title}. **Journal of Personality and Social Psychology**, v. 1, n. 1, p. 1188–1197, 2017.

FRANCISCO, C. A. C.; DE ALMEIDA, M. R.; DA SILVA, D. R. Efficiency in Brazilian refineries under different DEA technologies. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 4, n. 1, 2012a.

FRANCISCO, C. A. C.; DE ALMEIDA, M. R.; DA SILVA, D. R. Efficiency in Brazilian refineries under different DEA technologies. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 4, n. 1, 2012b.

GABDULLINA, G. K. et al. State regulation measures and existing state strategy for the development of petrochemical industry in Russia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 981, n. 2, 2022a.

GABDULLINA, G. K. et al. State regulation measures and existing state strategy for the development of petrochemical industry in Russia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 981, n. 2, 2022b.

GEELS, F. W. Conflicts between economic and low-carbon reorientation processes: Insights from a contextual analysis of evolving company strategies in the United Kingdom petrochemical industry (1970–2021). **Energy Research and Social Science**, v. 91, n. July, p. 102729, 2022a.

GEELS, F. W. Conflicts between economic and low-carbon reorientation processes: Insights from a contextual analysis of evolving company strategies in the United Kingdom petrochemical industry (1970–2021). **Energy Research and Social Science**, v. 91, n. July, p. 102729, 2022b.

GOTO, M.; TAKAHASHI, T. Operational and Environmental Efficiencies of Japanese Electric Power Companies from 2003 to 2015: Influence of Market Reform and Fukushima Nuclear Power Accident. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2017, 2017.

GRIGOROUDIS, E.; PETRIDIS, K. Evaluation of national environmental efficiency under uncertainty using data envelopment analysis. **Understanding Risks and**

Uncertainties in Energy and Climate Policy: Multidisciplinary Methods and Tools for a Low Carbon Society, p. 161–181, 2018.

GUO, L. et al. Classification and disposal strategy of excess sludge in the petrochemical industry. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 6, p. 1–15, 2019a.

GUO, S. D. et al. Industrial environmental efficiency assessment for China's western regions by using a SBM-based DEA. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 26, p. 27542–27550, 2019b.

GUO, S. D. et al. Industrial environmental efficiency assessment for China's western regions by using a SBM-based DEA. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 26, p. 27542–27550, 2019c.

HAIR, J. F. et al. **An Introduction to Structural Equation Modeling**. [s.l.: s.n.].

HALLOT, F. A. M. CONSOLIDAÇÃO DO SETOR PETROQUÍMICO BRASILEIRO AVALIANDO A BRASKEM. **The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies**, p. 1–8, 2019.

HAN, J. et al. Manufacturing transfer and environmental efficiency: Evidence from the spatial agglomeration of manufacturing in China. **Journal of Environmental Management**, v. 314, n. March, p. 115039, 2022.

IEA, I. E. A. The future of petrochemicals – Towards more sustainable plastics and fertilizers. **IEA Publications**, p. 1–130, 2018a.

IEA, I. E. A. The future of petrochemicals – Towards more sustainable plastics and fertilizers. **IEA Publications**, p. 1–130, 2018b.

IGNATIUS, J. et al. Carbon efficiency evaluation: An analytical framework using fuzzy DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 2, p. 428–440, 2016a.

IGNATIUS, J. et al. Carbon efficiency evaluation: An analytical framework using fuzzy DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 2, p. 428–440, 2016b.

IRAM, R. et al. Economics of energy and environmental efficiency: evidence from OECD countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 4, p. 3858–3870, 2020a.

IRAM, R. et al. Economics of energy and environmental efficiency: evidence from OECD countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 4, p. 3858–3870, 2020b.

ISLAM, M. Data Analysis: Types, Process, Methods, Techniques and Tools. **International Journal on Data Science and Technology**, v. 6, n. 1, p. 10, 2020.

JAMES, G. S. **Handbook of Petrochemical Processes**. [s.l.: s.n.].

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: A research method to production engineering. **Gestao e Producao**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LEE, D. S. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. **Atmospheric Environment**, v. 244, n. July 2020, 2021.

LI, H.; ZHU, X.; CHEN, J. Total factor waste gas treatment efficiency of China's iron and steel enterprises and its influencing factors: An empirical analysis based on the four-stage SBM-DEA model. **Ecological Indicators**, v. 119, n. February, p. 106812, 2020a.

LI, H.; ZHU, X.; CHEN, J. Total factor waste gas treatment efficiency of China's iron and steel enterprises and its influencing factors: An empirical analysis based on the four-stage SBM-DEA model. **Ecological Indicators**, v. 119, n. February, p. 106812, 2020b.

LIN, F.; LIN, S. W.; LU, W. M. Sustainability assessment of Taiwan's semiconductor industry: A new hybrid model using combined analytic hierarchy process and two-stage additive network data envelopment analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 11, p. 1–16, 2018a.

LIN, F.; LIN, S. W.; LU, W. M. Sustainability assessment of Taiwan's semiconductor industry: A new hybrid model using combined analytic hierarchy process and two-stage additive network data envelopment analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 11, p. 1–16, 2018b.

LIU, X. et al. Environmental Performance and Benchmarking Information for Coal-Fired Power Plants in China: A DEA Approach. **Computational Economics**, v. 54, n. 4, p. 1287–1302, 2019a.

LIU, X. et al. Environmental Performance and Benchmarking Information for Coal-Fired Power Plants in China: A DEA Approach. **Computational Economics**, v. 54, n. 4, p. 1287–1302, 2019b.

LOZANO, S.; SOLTANI, N. Efficiency assessment using a multidirectional DDF approach. **International Transactions in Operational Research**, v. 27, n. 4, p. 2064–2080, 2020.

LU, Y. H. et al. Analysis of environmental productivity on fossil fuel power plants in the U.S. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 24, p. 1–27, 2019a.

LU, Y. H. et al. Analysis of environmental productivity on fossil fuel power plants in the U.S. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 24, p. 1–27, 2019b.

LYU, K.; BIAN, Y.; YU, A. Environmental efficiency evaluation of industrial sector in China by incorporating learning effects. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2464–2474, 2016.

LYONDELLBASELL (LYB). **Products & technology**. [S. l.]: LYB, c2024. Disponível em: <http://www.lyondellbasell.com/technology>. Acesso em: 4 jun. 2024.

MACEDO, P. **Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis**. [s.l.: s.n.].

MACEDO, P. **Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis**. [s.l.: s.n.].

MACHADO, G. S. et al. Impacts on the efficiency of public expenditure in the fundamental education of São Paulo cities through the expenditure element categories. **REVISTA AMBIENTE CONTÁBIL - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - ISSN 2176-9036**, v. 14, n. 1, 2022.

MEKAROONREUNG, M.; JOHNSON, A. L. Estimating the efficiency of American petroleum refineries under varying assumptions of the disposability of bad outputs. n. July, 2015a.

MEKAROONREUNG, M.; JOHNSON, A. L. Estimating the efficiency of American petroleum refineries under varying assumptions of the disposability of bad outputs. n. July, 2015b.

MUÑOZ-VILLAMIZAR, A. et al. Manufacturing and environmental practices in the Spanish context. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 268–275, 2018.

PRASAJA, L. E.; HADIYANTO. The Application Potential of Eco-Efficiency for Greening Company. **E3S Web of Conferences**, v. 31, p. 3–6, 2018.

QUEIROZ, M. V. A. B.; SAMPAIO, R. M. B.; SAMPAIO, L. M. B. Dynamic efficiency of primary education in Brazil: Socioeconomic and infrastructure influence on school performance. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 70, n. August 2019, p. 100738, 2020.

RAMLI, N. A.; MUNISAMY, S.; ARABI, B. Scale directional distance function and its application to the measurement of eco-efficiency in the manufacturing sector. **Annals of Operations Research**, v. 211, n. 1, p. 381–398, 2013a.

RAMLI, N. A.; MUNISAMY, S.; ARABI, B. Scale directional distance function and its application to the measurement of eco-efficiency in the manufacturing sector. **Annals of Operations Research**, v. 211, n. 1, p. 381–398, 2013b.

SALA-GARRIDO, R. et al. Eco-efficiency assessment under natural and managerial disposability: an empirical application for Chilean water companies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 2, p. 3222–3234, 2023.

SANZ-DÍAZ, M. T. et al. An analysis of Spain's global and environmental efficiency from a European Union perspective. **Energy Policy**, v. 104, n. January 2017, p. 183–193, 2017a.

SANZ-DÍAZ, M. T. et al. An analysis of Spain's global and environmental efficiency from a European Union perspective. **Energy Policy**, v. 104, n. January 2017, p. 183–193, 2017b.

SHAH, S. A. A.; LONGSHENG, C. New environmental performance index for measuring sector-wise environmental performance: a case study of major economic sectors in Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 33, p. 41787–41802, 2020a.

SHAH, S. A. A.; LONGSHENG, C. New environmental performance index for measuring sector-wise environmental performance: a case study of major economic sectors in Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 33, p. 41787–41802, 2020b.

SHAO, Y.; WANG, S. Productivity growth and environmental efficiency of the nonferrous metals industry: an empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1663–1671, 2016.

SINGH, N.; SINGH, A. K. Data Analysis in Business Research: Key Concepts. **International Journal of Research in Management & Business Studies**, v. 2, n. 1, p. 50–55, 2015.

SMITH, L.; BALL, P. Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 227–238, 2012.

SONG, M.; WANG, S.; LIU, W. A two-stage DEA approach for environmental efficiency measurement. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 5, p. 3041–3051, 2014a.

SONG, M.; WANG, S.; LIU, W. A two-stage DEA approach for environmental efficiency measurement. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 5, p. 3041–3051, 2014b.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Returns to Scale and Damages to Scale with Strong Complementary Slackness Conditions in DEA Assessment: Japanese Corporate Effort on Environment Protection. **Energy Economics**, v. 34, n. 5, p. 1422–1434, 2012.

TAO, F.; LI, L.; XIA, X. H. Industry efficiency and total factor productivity growth under resources and environmental constraint in China. **The Scientific World Journal**, v. 2012, 2012a.

TAO, F.; LI, L.; XIA, X. H. Industry efficiency and total factor productivity growth under resources and environmental constraint in China. **The Scientific World Journal**, v. 2012, 2012b.

TEIXEIRA, F.; GUERRA, O.; CAVALCANTE, L. R. Decisões de investimento e movimentos de reestruturação: um modelo de análise da indústria petroquímica. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 13, n. 3, p. 511–537, 2009.

TONE, K.; TOLOO, M.; IZADIKHAH, M. A modified slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 287, n. 2, p. 560–571, 2020.

TONE, K.; TSUTSUI, M. Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach. **Omega (United Kingdom)**, v. 42, n. 1, p. 124–131, 2014.

VIANA, F. L. INDÚSTRIA PETROQUÍMICA. p. 1–13, 2021.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. **CASE RESEARCH Case research in operations management.** , 2002.

WALL EMERSON, R. Mann-Whitney U test and t-test. **Journal of Visual Impairment and Blindness**, v. 117, n. 1, p. 99–100, 2023.

WANG, H.; WANG, X.; WANG, Y. Transverse and longitudinal analysis of the environmental efficiency of Chinese industries. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 58, n. 5–6, p. 961–970, 2013.

WANG, J. Q. et al. The TOC-based algorithm for solving multiple constraint resources: A re-examination. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 61, n. 1, p. 138–146, 2014.

WANG, K.; WEI, Y. M.; HUANG, Z. Environmental efficiency and abatement efficiency measurements of China's thermal power industry: A data envelopment analysis based materials balance approach. **European Journal of Operational Research**, v. 269, n. 1, p. 35–50, 2018a.

WANG, K.; WEI, Y. M.; HUANG, Z. Environmental efficiency and abatement efficiency measurements of China's thermal power industry: A data envelopment analysis based materials balance approach. **European Journal of Operational Research**, v. 269, n. 1, p. 35–50, 2018b.

WANG, X.; HAN, L.; YIN, L. Environmental efficiency and its determinants for manufacturing in China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2017.

WOO, C. et al. The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy: A Malmquist index analysis of OECD countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 367–376, 2015.

WU, J. et al. Environmental efficiency evaluation of industry in China based on a new fixed sum undesirable output data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 74, n. October 2010, p. 96–104, 2014.

WU, J. et al. Measuring energy and environmental performance for regions in China by using DEA-based Malmquist indices. **Operational Research**, v. 17, n. 3, p. 715–735, 2017a.

WU, J. et al. Measuring energy and environmental performance for regions in China by using DEA-based Malmquist indices. **Operational Research**, v. 17, n. 3, p. 715–735, 2017b.

XIE, B. C. et al. Environmental efficiency and abatement cost of China's industrial sectors based on a three-stage data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 626–636, 2017.

XIE, J.; ZHOU, S.; CHEN, Y. Integrated data envelopment analysis methods for measuring technical, environmental, and eco-efficiencies. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117939, 2019.

XU, Y. et al. Evaluating the environmental efficiency of the U.S. airline industry using a directional distance function DEA approach. **Journal of Management Analytics**, v. 8, n. 1, p. 1–18, 2021.

YANG, H.; POLLITT, M. Incorporating both undesirable outputs and uncontrollable variables into DEA: The performance of Chinese coal-fired power plants. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1095–1105, 2009.

YIN, C. Environmental efficiency and its determinants in the development of China's western regions in 2000–2014. **Chinese Journal of Population Resources and Environment**, v. 15, n. 2, p. 157–166, 2017.

ZHANG, N.; CHOI, Y. A note on the evolution of directional distance function and its development in energy and environmental studies 1997-2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 50–59, 2014a.

ZHANG, N.; CHOI, Y. A note on the evolution of directional distance function and its development in energy and environmental studies 1997-2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 50–59, 2014b.

ZHANG, Q. et al. Drivers of improved PM2.5 air quality in China from 2013 to 2017. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 116, n. 49, p. 24463–24469, 2019.

ZHANG, T. Environmental performance assessment of China's manufacturing. **Asian Economic Journal**, v. 24, n. 1, p. 45–68, 2010a.

ZHANG, T. Environmental performance assessment of China's manufacturing. **Asian Economic Journal**, v. 24, n. 1, p. 45–68, 2010b.

ZOFÍO, J. L.; PRIETO, A. M. Environmental efficiency and regulatory standards: The case of CO2 emission from OECD industries. **Resource and Energy Economics**, v. 23, n. 1, p. 63–83, 2001a.

ZOFÍO, J. L.; PRIETO, A. M. Environmental efficiency and regulatory standards: The case of CO2 emission from OECD industries. **Resource and Energy Economics**, v. 23, n. 1, p. 63–83, 2001b.

Apêndice 1 - PROTOCOLO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA

Protocolo de Pesquisa		
Título da Pesquisa: Avaliação da eficiência técnica ambiental: estudo de caso de uma empresa Petroquímica com utilização da função da distância direcional.		
Equipe de trabalho: Mestranda Katia Maete e Prof. Dr. Fábio Piran		
Stakeholders: Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS		
Revisão: 00	Data: 10/11/2022	Revisado por:
1. Questão de pesquisa:		
Como a indústria Petroquímica pode ser definida como eficiente considerando a eficiência técnica ambiental?		
2. Objetivo(s) da pesquisa:		
Objetivo geral: O estudo tem como objetivo avaliar a eficiência técnica ambiental, considerando saídas indesejadas aplicando a função da distância direcional de uma empresa Petroquímica. Objetivos específicos: i) Efetuar análise crítica dos estudos que avaliam a eficiência ambiental em empresas de manufatura com utilização da DEA e suas variações; ii) Identificar as tecnologias utilizadas na produção e analisar se essas tecnologias impactam na eficiência ambiental do processo produtivo; iii) Efetuar uma análise identificando as metas e ganhos em relação a possibilidade de aumento na geração das saídas desejadas e redução das saídas indesejadas do processo produtivo.		
3. Escopo da revisão:		
3.1 Amplitude:	<input checked="" type="radio"/> Restrita	<input type="radio"/> Ampla
3.2 Profundidade:	<input type="radio"/> Superficial	<input type="radio"/> Profunda
3.3 Tipo da revisão:	<input checked="" type="radio"/> Agregativa	<input type="radio"/> Configurativa
4. Framework teórico:		
<p>E correto afirmar que a eficiência de uma empresa Petroquímica está diretamente relacionada com utilização de recursos naturais, na redução de poluentes e no gerenciamento de resíduos. Apresentar informações sobre uma data situação de um grupo ou entidade, explorar a frequência com que ocorre e como se liga a outros fenômenos é um dos macros objetivos para se realizar uma pesquisa (SELLTZ et al., 1975).</p> <p>Esse trabalho explora a eficiência ambiental na indústria de transformação buscando considerar as saídas desejadas e indesejadas utilizando o modelo matemático DEA de uma indústria petroquímica e sua unidade de negócio. Buscando identificar a influência das tecnologias aplicadas no processo produtivo, esta pesquisa destaca a contribuição dessas tecnologias para os índices de eficiência ambiental.</p>		
5. Horizonte temporal:		
Até 2022.		
6. String de busca:		
Inglês: undesirable outputs; environmental technical efficiency; with directional distance function		

without directional distance function.

Environmental efficiency and manufacturing industry (buscar)

Petrochemical industry investments

Petrochemical industry strategy

Título e assunto

("Environmental efficiency" and "directional distance function" and "undesirable outputs") OR
("Environmental efficiency" and "undesirable outputs")

Português

("Eficiência ambiental" e "função de distância direcional" e "saídas indesejáveis") OU
("Eficiência ambiental" e "resultados indesejáveis")

7. Fontes de busca:

EBSCO, Science Direct, Scopus, Wef of Science e Scielo

8. Abordagem de busca:

<input checked="" type="checkbox"/> Busca direta	<input type="checkbox"/> Contato com especialistas	<input checked="" type="checkbox"/> Bola de neve	<input type="checkbox"/> Outra:
--	--	--	---------------------------------

9. Critérios de Elegibilidade:

9.1 Critérios de inclusão:	Idioma inglês e português, artigos, livros e congressos nas áreas de manufatura, artigos com modelo DEA e DDF.
-----------------------------------	--

9.2 Critérios de exclusão:	Idiomas diferentes que inglês e português. Artigos sobre indústria de cimento, tecnologia e avaliação de performance.
-----------------------------------	---

10. Análise de dados:

10.1 Análise Cientométrica:	<input type="checkbox"/> Desenvolvimento científico
------------------------------------	---

10.2 Análise Bibliométrica:	<input type="checkbox"/> Desempenho da pesquisa	<input type="checkbox"/> Mapeamento científico
------------------------------------	---	--

10.3 Análise de Conteúdo:	<input checked="" type="checkbox"/> Agregativa	<input type="checkbox"/> Análise Temática	<input type="checkbox"/> Análise estrutural
----------------------------------	--	---	---

11. Síntese de dados:

11.1 Síntese agregativa:	<input checked="" type="checkbox"/> Meta-análise quantitativa	<input type="checkbox"/> Meta-análise qualitativa
---------------------------------	---	---

11.2 Síntese configurativa:	<input type="checkbox"/> Meta-síntese	<input type="checkbox"/> Outra:
------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------

Apêndice 2 - LISTA DE ARTIGOS INCLUSOS NESSA PESQUISA

	Título	Autor
1	Classification and Disposal Strategy of Excess Sludge in the Petrochemical Industry	(Guo Et Al., 2019a)
2	Conflicts between economic and low-carbon reorientation processes: Insights from a contextual analysis of evolving company strategies in the United Kingdom petrochemical industry (1970–2021)	(Geels, 2022)
3	Decisões de investimento e movimentos de reestruturação: um modelo de análise da indústria petroquímica	(Teixeira; Guerra; Cavalcante, 2009)
4	Efficiency in Brazilian Refineries Under Different DEA Technologies	(Francisco; De Almeida; Da Silva, 2012)
5	State regulation measures and existing state strategy for the development of petrochemical industry in Russia	(Gabdullina Et Al., 2022)
6	Energy and environmental efficiency evaluation based on a novel Data Envelopment Analysis: An application in petrochemical industries	(Chen; Han; Zhu, 2017)
7	A two-stage DEA approach for environmental efficiency measurement	(Song; Wang; Liu, 2014b)
9	An analysis of Spain's global and environmental efficiency from a European Union perspective	(Sanz-Díaz Et Al., 2017b)
10	Analysis of Environmental Productivity on Fossil Fuel Power Plants in the U.S.	(Lu Et Al., 2019a)
11	Calculation of China's environmental efficiency and relevant hierarchical cluster analysis from the perspective of regional differences	(SONG ET AL., 2013)
12	Carbon Efficiency Evaluation: An Analytical Framework Using Fuzzy DEA	(Ignatius Et Al., 2016b)
13	Eco-efficiency assessment under natural and managerial disposability: an empirical application for Chilean water companies	(Sala-Garrido Et Al., 2023)
14	Economics of energy and environmental efficiency: evidence from OECD countries	(Iram Et Al., 2020b)
15	Environmental efficiency analysis of China's regional industry: a data envelopment analysis (DEA) based approach	(CHEN; JIA, 2017)
16	Environmental efficiency and abatement efficiency measurements of China's thermal power industry: A data envelopment analysis based materials balance approach	(Wang; Wei; Huang, 2018b)
17	Environmental Efficiency and Its Determinants for Manufacturing in China	(Wang; Han; Yin, 2017)
18	Environmental efficiency and its determinants in the development of China's western regions in 2000–2014	(Yin, 2017)
19	Environmental efficiency evaluation of industrial sector in China by incorporating learning effects	(Lyu; Bian; Yu, 2016)
20	Environmental efficiency evaluation of industry in China based on a new fixed sum undesirable output data envelopment analysis	(Wu Et Al., 2014)
21	Environmental efficiency measurement when producers control pollutants under heterogeneous conditions: a generalization of the materials balance approach	(Eder, 2022)
22	Environmental Performance and Benchmarking Information for Coal-Fired Power Plants in China: A DEA Approach	(Liu Et Al., 2019b)
23	Evaluating the environmental efficiency of the U.S. airline industry using a directional distance function DEA approach	(Xu Et Al., 2021)
25	Explaining the environmental efficiency of drinking water and wastewater utilities	(Ananda, 2019)

	Título	Autor
26	Industrial environmental efficiency assessment for China's western regions by using a SBM-based DEA	(Guo Et Al., 2019c)
27	Integrated data envelopment analysis methods for measuring technical, environmental, and eco-efficiencies	(Xie; Zhou; Chen, 2019)
28	Measuring energy and environmental performance for regions in China by using DEA-based Malmquist indices	(Wu Et Al., 2017b)
29	Measuring technical, environmental and ecoefficiency in municipal solid waste management in Chile	(Sala-Garrido Et Al., 2022)
30	Methodological comparison between two unified (operational and environmental) efficiency measurements for environmental assessment	(SUEYOSHI; GOTO, 2011)
31	Monitoring environmental efficiency: An application to Italian provinces	(Coli; Nissi; Rapposelli, 2011a)
32	Opening the "black box" of environmental production technology in a nonparametric analysis	(Fang, 2020)
33	Operational and Environmental Efficiencies of Japanese Electric Power Companies from 2003 to 2015: Influence of Market Reform and Fukushima Nuclear Power Accident	(Goto; Takahashi, 2017)
34	The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy: A Malmquist index analysis of OECD countries	(Woo Et Al., 2015)
35	A framework for measuring global MalmquistLuenberger productivity index with CO2 emissions on Chinese manufacturing industries	(Emrouznejad; Yang, 2016c)
36	Analysis of Coordinated Development of Energy and Environment in China's Manufacturing Industry under Environmental Regulation: A Comparative Study of Sub-Industries	(Cheng Et Al., 2019)
37	Environmental efficiency and abatement cost of China's industrial sectors based on a three-stage data envelopment analysis	(Xie Et Al., 2017)
38	Environmental efficiency and regulatory standards: the case of CO2 emissions from OECD industries	(Zofío; Prieto, 2001a)
39	Environmental Performance Assessment of China's Manufacturing	(Zhang, 2010b)
40	Estimation of innovation's green performance: A range-adjusted measure approach to assess the unified efficiency of China's manufacturing industry	(Wang Et Al., 2017)
41	Evaluating eco-efficiency with data envelopment analysis: an analytical reexamination	(Chen, 2014)
42	Industry Efficiency and Total Factor Productivity Growth under Resources and Environmental Constraint in China	(Tao; Li; Xia, 2012b)
43	Manufacturing transfer and environmental efficiency: Evidence from the spatial agglomeration of manufacturing in China	(Han Et Al., 2022)
44	Manufacturing and environmental practices in the Spanish context	(Muñoz-Villamizar Et Al., 2018)
45	Network-like DEA Approach for Environmental Assessment : Evidence from U.S. Manufacturing Sectors	(Yu Yu, Weiwei Zhu, Qinfen Shi, 2016)
46	New environmental performance index for measuring sector-wise environmental performance: a case study of major economic sectors in Pakistan	(Shah; Longsheng, 2020b)
47	Promoting energy and environmental efficiency within a positive feedback loop: Insights from global value chain	(Liu Et Al., 2018)

	Título	Autor
48	Returns to Scale and Damages to Scale with Strong Complementary Slackness Conditions in DEA Assessment: Japanese Corporate Effort on Environment Protection	(Sueyoshi; Goto, 2012)
49	Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows	(Smith; Ball, 2012)
50	Sustainability Assessment of Taiwan's Semiconductor Industry: A New Hybrid Model Using Combined Analytic Hierarchy Process and Two-Stage Additive Network Data Envelopment Analysis	(Lin; Lin; Lu, 2018b)
51	Total factor waste gas treatment efficiency of China's iron and steel enterprises and its influencing factors: An empirical analysis based on the four-stage SBM-DEA model	(Li; Zhu; Chen, 2020b)
52	Transverse and longitudinal analysis of the environmental efficiency of Chinese industries	(Wang; Wang; Wang, 2013)
53	Indústria petroquímica	(Viana, 2021)
54	Consolidação do setor petroquímico brasileiro avaliando a Braskem	(Hallot, 2019)
55	A modified slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis	(Tone; Toloo; Izadikhah, 2020)
56	Incorporating both undesirable outputs and uncontrollable variables into DEA: The performance of Chinese coal-fired power plants	(Yang; Pollitt, 2009)
57	A note on the evolution of directional distance function and its development in energy and environmental studies 1997–2013	(Zhang; Choi, 2014a)
58	Efficiency assessment using a multidirectional DDF approach	(Lozano; Soltani, 2020)
59	Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach	(Chung; Färe; Grosskopf, 1997)
60	Estimating the efficiency of American petroleum refineries under varying assumptions of the disposability of bad outputs	(Mekaroonreung; Johnson, 2015b)
61	Scale directional distance function and its application to the measurement of eco-efficiency in the manufacturing sector	(Ramli; Munisamy; Arabi, 2013b)
62	CO2 emissions reduction of Chinese light manufacturing industries: A novel RAM-based global Malmquist–Luenberger productivity index	(Emrouznejad; Yang, 2016b)
63	Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) Using R	(Hair Et Al., 2021)
64	Data Analysis: Types, Process, Methods, Techniques and Tools	(Islam, 2020)

Apêndice 3 - Eficiência da unidade Química P1

DMU	Eff DDF INPUT
P1_01_2018	1,000
P1_02_2018	1,000
P1_03_2018	0,905
P1_04_2018	0,787
P1_05_2018	1,000
P1_06_2018	1,000
P1_07_2018	1,000
P1_08_2018	0,975
P1_09_2018	0,967
P1_10_2018	1,000
P1_11_2018	0,934
P1_12_2018	0,859
P1_01_2019	1,000
P1_02_2019	1,000
P1_03_2019	0,982
P1_04_2019	0,981
P1_05_2019	0,985
P1_06_2019	1,000
P1_07_2019	0,941
P1_08_2019	0,934
P1_09_2019	0,885
P1_10_2019	0,940
P1_11_2019	0,885
P1_12_2019	0,849
P1_01_2020	0,854
P1_02_2020	1,000
P1_03_2020	1,000
P1_04_2020	1,000
P1_05_2020	0,954
P1_06_2020	1,000
P1_07_2020	0,908
P1_08_2020	1,000
P1_09_2020	0,919
P1_10_2020	0,965
P1_11_2020	0,943
P1_12_2020	0,935
P1_01_2021	1,000
P1_02_2021	0,906
P1_03_2021	0,719
P1_04_2021	1,000
P1_05_2021	0,978
P1_06_2021	1,000

DMU	Eff DDF INPUT
P1_07_2021	0,977
P1_08_2021	0,957
P1_09_2021	0,904
P1_10_2021	0,983
P1_11_2021	0,921
P1_12_2021	0,931
P1_01_2022	0,915
P1_02_2022	0,901
P1_03_2022	0,907
P1_04_2022	0,813
P1_05_2022	1,000
P1_06_2022	0,853
P1_07_2022	0,883
P1_08_2022	0,908
P1_09_2022	0,907
P1_10_2022	0,955
P1_11_2022	0,917
P1_12_2022	0,854
Média Global	0,9396
Desvio Padrão	0,06119101
Desvio Padrão	0,061707401
Mediana	0,9485

Apêndice 4 - Eficiência das plantas de polietileno P2-P3-P4

DMU	Eff DDF INPUT
P2_01_2018	0,556784939
P2_02_2018	0,605186422
P2_03_2018	0,537560067
P2_04_2018	0,357883524
P2_05_2018	0,497070667
P2_06_2018	0,513387837
P2_07_2018	0,563068475
P2_08_2018	0,63374138
P2_09_2018	0,266182698
P2_10_2018	0,587193513
P2_11_2018	0,566486181
P2_12_2018	0,475089013
P2_01_2019	0,498526103
P2_02_2019	0,665411543
P2_03_2019	0,564037223
P2_04_2019	0,016081237
P2_05_2019	0,479306918
P2_06_2019	0,671063853
P2_07_2019	0,382882917
P2_08_2019	0,167323582
P2_09_2019	0,683046713
P2_10_2019	0,316253149
P2_11_2019	0,487053326
P2_12_2019	0,478428516
P2_01_2020	0,587137791
P2_02_2020	0,022971063
P2_03_2020	0,017367178
P2_04_2020	0,676195818
P2_05_2020	0,562341587
P2_06_2020	0,711203813
P2_07_2020	0,50426028
P2_08_2020	0,529331151
P2_09_2020	0,56774182
P2_10_2020	0,486066662
P2_11_2020	0,514969494
P2_12_2020	0,153911857
P2_01_2021	0,708544998
P2_02_2021	1
P2_03_2021	1
P2_04_2021	1

DMU	Eff DDF INPUT
P2_05_2021	0,729006398
P2_06_2021	0,177593116
P2_07_2021	0,562492761
P2_08_2021	0,629690751
P2_09_2021	0,48392191
P2_10_2021	0,498001851
P2_11_2021	0,241084899
P2_12_2021	0,678366461
P2_01_2022	1
P2_02_2022	0,468125956
P2_03_2022	0,394702296
P2_04_2022	0,39219288
P2_05_2022	0,523683872
P2_06_2022	0,382207514
P2_07_2022	0,442069521
P2_08_2022	1
P2_09_2022	0,3308268
P2_10_2022	0,584919196
P2_11_2022	0,437852902
P2_12_2022	0,512459332
Média Global	0,5180
Desvio Padrão	0,2205
Desvio Padrão	0,2224
Mediana	0,5142

DMU	Eff DDF INPUT
P3_01_2018	0,397010055
P3_02_2018	0,859483098
P3_03_2018	0,438293431
P3_04_2018	0,261750085
P3_05_2018	0,378010327
P3_06_2018	0,324970797
P3_07_2018	0,414255841
P3_08_2018	0,355660939
P3_09_2018	0,370098118
P3_10_2018	0,375805398
P3_11_2018	0,586244901
P3_12_2018	0,497948143
P3_01_2019	0,3355552
P3_02_2019	0,263266008
P3_03_2019	0,316470408
P3_04_2019	0,43548159

DMU	Eff DDF INPUT
P3_05_2019	0,398670623
P3_06_2019	0,349587667
P3_07_2019	0,38184908
P3_08_2019	0,364193298
P3_09_2019	0,335387368
P3_10_2019	0,351927139
P3_11_2019	0,360776442
P3_12_2019	0,352342828
P3_01_2020	0,29432346
P3_02_2020	0,320918
P3_03_2020	1
P3_04_2020	0,324123798
P3_05_2020	0,30753248
P3_06_2020	0,388865555
P3_07_2020	0,351366082
P3_08_2020	0,305127505
P3_09_2020	0,324025182
P3_10_2020	0,31017871
P3_11_2020	0,363556393
P3_12_2020	0,431829178
P3_01_2021	0,497460008
P3_02_2021	0,174929151
P3_03_2021	0,20245168
P3_04_2021	0,264705533
P3_05_2021	0,177755369
P3_06_2021	0,251461762
P3_07_2021	0,216298732
P3_08_2021	0,17294114
P3_09_2021	0,230917275
P3_10_2021	0,181859345
P3_11_2021	0,216570434
P3_12_2021	0,193920471
P3_01_2022	0,538360943
P3_02_2022	0,14989334
P3_03_2022	0,167625979
P3_04_2022	0,207182081
P3_05_2022	0,216790479
P3_06_2022	0,324121941
P3_07_2022	0,183396595
P3_08_2022	0,218672598
P3_09_2022	0,200455518
P3_10_2022	0,239740225
P3_11_2022	0,233110813

DMU	Eff DDF INPUT
P3_12_2022	1
Média Global	0,3448
Desvio Padrão	0,1703
Desvio Padrão	0,1717
Mediana	0,3241

DMU	Eff DDF INPUT
P4_01_2018	1
P4_02_2018	1
P4_03_2018	0,67164574
P4_04_2018	0,644745017
P4_05_2018	0,713218374
P4_06_2018	0,916302727
P4_07_2018	0,77723767
P4_08_2018	0,719608994
P4_09_2018	1
P4_10_2018	0,772719686
P4_11_2018	1
P4_12_2018	0,511509594
P4_01_2019	0,383713491
P4_02_2019	0,606115169
P4_03_2019	0,469076995
P4_04_2019	0,332584355
P4_05_2019	0,359744725
P4_06_2019	0,470789205
P4_07_2019	0,324742822
P4_08_2019	0,560635392
P4_09_2019	0,470255089
P4_10_2019	0,349797952
P4_11_2019	0,37207491
P4_12_2019	0,562935657
P4_01_2020	0,566633083
P4_02_2020	0,519478801
P4_03_2020	0,663684721
P4_04_2020	0,717438026
P4_05_2020	0,788458569
P4_06_2020	0,605645137
P4_07_2020	1
P4_08_2020	0,379211226
P4_09_2020	0,791888298
P4_10_2020	0,48429296

P4_11_2020	0,526515213
P4_12_2020	0,544002416
P4_01_2021	0,523253057
P4_02_2021	0,581124477
P4_03_2021	0,478885914
P4_04_2021	0,468688873
P4_05_2021	0,457024065
P4_06_2021	0,667363417
P4_07_2021	0,368963879
P4_08_2021	0,355345298
P4_09_2021	0,761287456
P4_10_2021	0,363519561
P4_11_2021	0,479222568
P4_12_2021	0,513686189
P4_01_2022	0,558970717
P4_02_2022	0,498212216
P4_03_2022	0,459544657
P4_04_2022	0,227280968
P4_05_2022	0,33298674
P4_06_2022	0,474773009
P4_07_2022	0,058697509
P4_08_2022	1
P4_09_2022	0,493744567
P4_10_2022	0,498653369
P4_11_2022	0,510019851
P4_12_2022	0,401202146
Média Global	0,5685
Desvio Padrão	0,2079
Desvio Padrão	0,2096
Mediana	0,5166

Apêndice 5 - Eficiência da unidade de polipropileno – P5-P6

DMU	Eff DDF INPUT
P5_01_2018	0,945652206
P5_02_2018	0,97837205
P5_03_2018	1
P5_04_2018	1
P5_05_2018	0,991079251
P5_06_2018	1
P5_07_2018	1
P5_08_2018	1
P5_09_2018	1
P5_10_2018	1
P5_11_2018	1
P5_12_2018	0,985756521
P5_01_2019	0,978025015
P5_02_2019	1
P5_03_2019	1
P5_04_2019	0,936563705
P5_05_2019	1
P5_06_2019	0,98297797
P5_07_2019	1
P5_08_2019	0,967242926
P5_09_2019	0,930172855
P5_10_2019	1
P5_11_2019	0,960855755
P5_12_2019	0,868439493
P5_01_2020	0,85308789
P5_02_2020	0,898156063
P5_03_2020	0,970679757
P5_04_2020	0,989666819
P5_05_2020	0,957248683
P5_06_2020	0,896153475
P5_07_2020	1
P5_08_2020	0,976554397
P5_09_2020	1
P5_10_2020	1
P5_11_2020	1
P5_12_2020	1
P5_01_2021	0,984920725
P5_02_2021	0,897921376
P5_03_2021	0,713810144

P5_04_2021	1
P5_05_2021	0,986514839
P5_06_2021	0,933145951
P5_07_2021	0,942522673
P5_08_2021	0,981893534
P5_09_2021	0,898693335
P5_10_2021	0,952438944
P5_11_2021	0,994210449
P5_12_2021	1
P5_01_2022	1
P5_02_2022	0,83722228
P5_03_2022	0,804902506
P5_04_2022	0,960277026
P5_05_2022	0,597112505
P5_06_2022	0,75990405
P5_07_2022	1
P5_08_2022	0,838106328
P5_09_2022	0,719844459
P5_10_2022	0,852171875
P5_11_2022	0,728564534
P5_12_2022	0,663386727
Média Global	0,9352
Desvio Padrão	0,0949
Desvio Padrão	0,0957
Mediana	0,9801

DMU	Eff DDF INPUT
P6_01_2018	0,965015454
P6_02_2018	1
P6_03_2018	1
P6_04_2018	0,794016979
P6_05_2018	0,933280531
P6_06_2018	0,982430612
P6_07_2018	1
P6_08_2018	1
P6_09_2018	0,968683098
P6_10_2018	0,913726721
P6_11_2018	0,95971631
P6_12_2018	1
P6_01_2019	0,955951935
P6_02_2019	0,99403808
P6_03_2019	0,933888123

P6_04_2019	0,962704561
P6_05_2019	0,909834
P6_06_2019	0,994212692
P6_07_2019	0,990636696
P6_08_2019	1
P6_09_2019	0,977286045
P6_10_2019	0,794592018
P6_11_2019	0,919296132
P6_12_2019	0,87096731
P6_01_2020	0,913937969
P6_02_2020	0,907003448
P6_03_2020	1
P6_04_2020	1
P6_05_2020	0,931401158
P6_06_2020	0,917560168
P6_07_2020	0,959279432
P6_08_2020	1
P6_09_2020	0,941117959
P6_10_2020	0,871089811
P6_11_2020	0,962209468
P6_12_2020	0,824135218
P6_01_2021	1
P6_02_2021	0,856629684
P6_03_2021	0,94198591
P6_04_2021	1
P6_05_2021	0,983821917
P6_06_2021	1
P6_07_2021	0,734109346
P6_08_2021	1
P6_09_2021	0,904705415
P6_10_2021	1
P6_11_2021	0,962832348
P6_12_2021	1
P6_01_2022	1
P6_02_2022	0,814429809
P6_03_2022	0,769479043
P6_04_2022	0,90478891
P6_05_2022	1
P6_06_2022	0,819556091
P6_07_2022	0,798951129
P6_08_2022	1
P6_09_2022	0,663648952

P6_10_2022	0,770784021
P6_11_2022	0,835967235
P6_12_2022	0,880241984
Média Global	0,9282
Desvio Padrão	0,0811
Desvio Padrão	0,0817
Mediana	0,9595