

**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**

**YURI DIAS HAMDAN**

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS PRODUTIVOS  
UTILIZANDO O BENCHMARKING INTERNO E A DEA WINDOW**

**São Leopoldo  
2025**

YURI DIAS HAMDAN

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS PRODUTIVOS  
UTILIZANDO O BENCHMARKING INTERNO E A DEA WINDOW

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

Orientador: Prof. Dr. Fabio Antônio Sartori Piran

São Leopoldo

2025

H211a Hamdan, Yuri Dias.  
Análise exploratória da eficiência de sistemas produtivos utilizando o Benchmarking interno e a DEA Window / Yuri Dias Hamdan. – 2025.  
105 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2025.  
“Orientador: Prof. Dr. Fabio Antônio Sartori Piran.”

1. Análise envoltória de dados. 2. Benchmarking interno. 3. DEA Window. 4. Eficiência ao longo do tempo. 5. Indústria metalmeccânica. I. Título.

CDU 658.5

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

YURI DIAS HAMDAN

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS PRODUTIVOS  
UTILIZANDO O BENCHMARKING INTERNO E A DEA WINDOW**

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

Aprovado em 17 de março de 2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Rodrigo Frank de Souza Gomes

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Isabel Wolf Motta Morandi

---

Prof. Dr. Leandro Gauss

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir esta dissertação, desejo expressar minha profunda gratidão a todos que, de diversas formas, contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Professor Fabio Piran, que além de ser um baita professor e orientador se transformou em um grande amigo que sei que levarei para a vida.

À minha esposa, Priscila, meu sincero agradecimento pelo amor, paciência e apoio incondicional. Sua compreensão e incentivo constante foram pilares fundamentais nos momentos de desafio e incerteza, permitindo-me seguir adiante com determinação e foco. Aos meus pais, Marcos e Naici e minha irmã, Eduarda, manifesto toda a minha gratidão pelo carinho, apoio e confiança depositada em mim. Cada palavra de incentivo e cada gesto de apoio contribuíram para que eu pudesse superar os obstáculos e celebrar cada conquista ao longo desta jornada.

Aos professores que marcaram minha trajetória acadêmica, agradeço por compartilharem seu conhecimento, inspirarem e incentivarem a busca pelo saber. Por fim, agradeço aos meus colegas do PPGEPS, cuja colaboração, troca de experiências e amizade enriqueceram este percurso.

A todos vocês, o meu muito obrigado!

## RESUMO

A eficiência é um indicador chave para avaliar o desempenho das unidades produtivas de uma organização. A análise da eficiência permite aos gestores avaliarem como as empresas estão operando, em comparação com as metas de produtividade estipuladas em distintos períodos de tempo. Este estudo tem como objetivo, analisar a eficiência ao longo do tempo por meio do benchmarking interno e da *DEA Window* do processo produtivo de uma empresa no segmento metalmeccânico. O *DEA Window* é uma abordagem de painel não paramétrico, sendo adequada para medir o nível de eficiência de várias unidades de tomada de decisão (DMUs) com relação ao seu próprio desempenho ao longo do tempo. Na pesquisa é realizado um estudo de caso, buscando obter os scores de eficiência das DMUS, assim como comparar os scores de eficiência e as metas e ganhos dos modelos DEA e *DEA Window* com janelas de três e seis períodos. Os principais resultados mostram que o modelo DEA convencional obteve uma eficiência média de 75,93%, enquanto as abordagens com janelas de três e seis períodos apresentaram eficiências médias de 98,64% e 97,11%, respectivamente. Além disso, na análise comparativa de metas e ganhos, o modelo DEA convencional indicou ganhos que chegaram a atingir até dez vezes o valor de determinados inputs, se comparado com os modelos *DEA Window*, evidenciando problemas de discriminação dos modelos *Window*. As principais contribuições deste trabalho indicam que, quando se dispõe de uma série histórica maior, a abordagem de janelas associada ao benchmarking interno pode constituir uma alternativa para avaliar a eficiência ao longo do tempo. Além disso, o modelo *DEA Window* permite uma análise dinâmica da eficiência, pois a utilização de janelas móveis possibilita acompanhar a evolução da eficiência ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Indústria Metalmeccânica; Eficiência ao Longo do Tempo; Análise Envoltória de Dados; *DEA Window*; Benchmarking Interno;

## ABSTRACT

Efficiency is a key indicator for assessing the performance of an organization's production units. Analyzing efficiency allows managers to assess how companies are operating in comparison with the productivity targets set for different periods of time. The aim of this study is to analyze efficiency over time by means of internal benchmarking and the DEA Window of the production process of a company in the metal-mechanics segment. The DEA Window is a non-parametric panel approach that is suitable for measuring the level of efficiency of various decision-making units (DMUs) in relation to their own performance over time. A case study is carried out, seeking to obtain the efficiency scores of the DMUs, as well as comparing the efficiency scores and the targets and gains of the DEA and DEA Window models with windows of three and six periods. The main results show that the conventional DEA model obtained an average efficiency of 75.93%, while the three- and six-period window approaches had average efficiencies of 98.64% and 97.11%, respectively. Furthermore, in the comparative analysis of targets and gains, the conventional DEA model indicated gains of up to ten times the value of certain inputs, when compared to the DEA Window models, highlighting the Window models' discrimination problems. The main contributions of this work indicate that, when a longer time series is available, the window approach associated with internal benchmarking can be an alternative for evaluating efficiency over time. In addition, the DEA Window model allows for a dynamic analysis of efficiency, since the use of moving windows makes it possible to follow the evolution of efficiency over time.

Translated with [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (free version)

**Keywords:** Metalworking Industry; Efficiency Over Time; Data Envelopment Analysis; DEA Window; Internal Benchmarking; Technical Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo do processo de <i>benchmarking</i> .....	28
Figura 2 – Janela de análise da DMU em avaliação .....	34
Figura 3 – Condução do estudo de caso.....	49
Figura 4 – Método de trabalho .....	51
Figura 5 – Fluxo de busca e elegibilidade da pesquisa 1 .....	53
Figura 6 – Fluxo de busca e elegibilidade da pesquisa 2.....	55
Figura 7 – Modelos DEA utilizados na pesquisa .....	65
Figura 8 – Procedimento para análise dos dados .....	67

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos relacionados com a utilização da DEA <i>Window</i> ou <i>benchmarking</i> interno .....	36
Quadro 2 – Classificação da pesquisa .....	48
Quadro 3 – <i>Strings</i> da Revisão Sistemática da Literatura 1 .....	52
Quadro 4 – <i>Strings</i> da Revisão Sistemática da Literatura 2 .....	54
Quadro 5 – Estudos incluídos na pesquisa .....	56
Quadro 6 – Especialistas selecionados.....	59
Quadro 7 – Lista das principais variáveis identificadas na literatura .....	62
Quadro 8 – <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> selecionados .....	63
Quadro 9 – Média dos volumes observados para os <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> selecionados	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência técnica por DMU .....	70
Tabela 2 – Eficiência média anual.....	71
Tabela 3 – DEA <i>Window</i> com janelas de três períodos .....	74
Tabela 4 – Estabilidade da eficiência do modelo de três períodos.....	75
Tabela 5 – DEA <i>Window</i> com janelas de seis períodos .....	79
Tabela 6 – Estabilidade da eficiência do modelo de seis períodos .....	80
Tabela 7 – Matriz do teste de Mann-Whitney .....	84
Tabela 8 – Resultado do teste de hipótese .....	85

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Eficiência média trimestral .....	72
Gráfico 2 – Eficiência média trimestral para janelas de três períodos.....	77
Gráfico 3 – Eficiência média semestral para janelas de seis períodos.....	82
Gráfico 4 – Comparação das eficiências .....	83
Gráfico 5 – Análise comparativa das metas e ganhos da MOD (horas) .....	86
Gráfico 6 – Análise comparativa das metas e ganhos da Subcontratação (R\$).....	86
Gráfico 7 – Análise comparativa das metas e ganhos do GGF (R\$).....	87
Gráfico 8 – Análise comparativa das metas e ganhos da MP (Kg) .....	87
Gráfico 9 – Análise comparativa das metas e ganhos da Energia (Kwh) .....	88
Gráfico 10 – Análise comparativa das metas e ganhos do Gás (R\$) .....	88

## LISTA DE SIGLAS

DEA	Data Envelopment Analysis (Análise Envoltória de Dados)
DMU	Decision Making Unit (Unidades de Tomada de Decisão)
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Eficácia Global do Equipamento)
CRS	Constant Returns to Scale (Retorno Constante de Escala)
VRS	Variable Returns to Scale (Retorno Variável de Escala)
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
MIM	Metal Injection Molding (Moldagem por Injeção de Metal)
MOD	Mão de Obra Direta
GGF	Gastos Gerais de Fabricação
MP	Matéria-Prima
CPP	Custo Produto Produzido
IGP-M	Índice Geral de Preços – Mercado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA.....	18
1.2 OBJETIVOS .....	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	21
1.2.2 Objetivos Específicos .....	21
1.3 JUSTIFICATIVA .....	21
1.4 DELIMITAÇÕES.....	23
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>26</b>
2.1 BENCHMARK INTERNO .....	26
2.2 DEA WINDOW .....	29
2.3 ESTUDOS SOBRE A EFICIÊNCIA TÉCNICA NA MANUFATURA COM A UTILIZAÇÃO DA DEA WINDOW E DO BENCHMARKING INTERNO .....	35
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>47</b>
3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	47
3.2 MÉTODO DE TRABALHO .....	50
3.3 PROJETO DO MODELO DEA .....	58
3.3.1 Definição do processo a ser analisado.....	59
3.3.2 Definição das unidades de tomada de decisão (DMUs).....	60
3.3.3 Definição das janelas e período de análise .....	61
3.3.4 Análise da literatura para a definição dos inputs e outputs e validação com os especialistas.....	61
3.3.5 Definição dos modelos DEA e DEA Window (CRS / VRS) e orientação dos modelos.....	64
3.3.6 Validação do modelo final com os especialistas .....	64

3.4 COLETA DE DADOS .....	66
3.5 ANÁLISE DOS DADOS.....	67
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
4.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DEA .....	69
4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DEA WINDOW COM JANELAS DE TRÊS PERÍODOS.....	73
4.3 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DEA WINDOW COM JANELAS DE SEIS PERÍODOS .....	78
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS EFICIÊNCIAS .....	82
4.5 ANÁLISE COMPARATIVA DE METAS E GANHOS .....	85
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>90</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE I – PROTOCOLO DE BUSCA RSL.....</b>	<b>105</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho organizacional é um fator relevante na tomada de decisões estratégicas para o futuro das empresas (Bazargan et al., 2023). As empresas que não medem seu desempenho, normalmente não conseguem avaliar se seus objetivos e metas foram alcançadas (Al-Refaie, 2022; Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016) ou se, por exemplo, sua produtividade está crescendo, estável ou até mesmo reduzindo. A competição entre empresas sugere a necessidade de aumentar a produtividade e a eficiência das organizações (Barbosa et al., 2017; Piran et al., 2016). Assim, um passo importante para este incremento é a utilização de indicadores, que devem ser definidos de forma precisa. Muitos indicadores são utilizados por executivos de forma equivocada, gerando medidas com restrições à sua validade geral (De Souza et al., 2018a; Gandjour et al., 2002).

A produtividade e a eficiência são indicadores chave para avaliar o desempenho das unidades produtivas da empresa (Bazargan et al., 2023). Na prática, os engenheiros de produção devem avaliar regularmente a eficiência e a produtividade dos processos de fabricação para atingir as metas de negócios (Al-Refaie, 2022). Um aumento da eficiência pode levar a um aumento da competitividade da organização (Radukic; Veselinovic; Marjanivic, 2023). Além disso, a análise da eficiência permite aos gestores saberem como as empresas estão sendo operadas, em comparação com as metas de produtividade esperadas (Oliveira et al., 2023). Um dos objetivos da medição da eficiência é a identificação de *benchmarking*, para avaliar políticas, pontos fortes e fracos e melhores práticas (Von Gilsa et al., 2017).

O *benchmarking* pode ser utilizado para comparar a eficiência geral das operações (De Souza et al., 2018a). Assumindo que existe a oportunidade de melhoria no processo considerado ineficiente com relação ao seu *benchmark*, o *benchmarking* serve de base para avaliar e desenvolver estratégias para torná-lo mais eficiente (Von Gilsa et al., 2017). O processo de *benchmarking* pode ser tanto interno quanto externo (Spendolini, 1992; Von Gilsa et al., 2017).

Ao contrário do *benchmarking* externo que utiliza o desempenho de outras organizações como padrão para melhoria de desempenho, o *benchmarking* interno

possibilita a identificação, compreensão e adaptação das melhores práticas baseadas em sua própria organização. (O'Dell; Grayson, 1998; Southard; Parente, 2007; Von Gilsa et al., 2017). Assim, o *benchmarking* interno é um mecanismo importante a ser utilizado em empresas nas quais o *benchmarking* externo é difícil ou mesmo inviável (De Souza et al., 2018a; Southard; Parente, 2007). Esta avaliação interna permite uma visão real do desempenho do negócio em termos de eficiência, por exemplo, ao longo do tempo (De Souza et al., 2018a).

Muitas técnicas e abordagens matemáticas foram propostas nas últimas décadas para resolver o problema de avaliação da eficiência relativa (Radukic; Veselinovic; Marjanovic, 2023). Uma técnica eficaz para medir a eficiência relativa dos processos é a análise envoltória de dados (DEA), em que a fronteira de produção é construída a partir de um conjunto de unidades de tomada de decisão (DMUs) (Al-Refaie, 2022). Várias aplicações de DEA têm sido usadas principalmente para realizar *benchmarking* externo entre unidades organizacionais (Von Gilsa et al., 2017). A DEA contribui pela sua robustez, para a avaliação da eficiência produtiva (De Souza et al., 2018a).

Os gestores precisam avaliar como os níveis de eficiência mudam ao longo do tempo, a fim de evitar perdas de desempenho (Oliveira et al., 2023). Dentro deste contexto pode ser utilizada a técnica de análise de janelas DEA (DEA *Window*). Que diferente da DEA clássica, possibilita a avaliação da eficiência por meio de janelas móveis, assim a disposição dos resultados na análise de janelas, facilita a identificação de tendências no desempenho, além da estabilidade dos conjuntos de referência (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016). Esta técnica é uma abordagem de painel não paramétrico, sendo adequada para medir o nível de eficiência de várias DMUs com relação ao seu próprio desempenho ao longo do tempo, bem como o desempenho das DMUs relativamente mais produtivas dentro do conjunto de amostras (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016; O'Neal et al., 2020).

Compreendendo a sua importância, este estudo tem como tema a avaliação da eficiência ao longo do tempo em uma empresa produtora de bens, utilizando o procedimento do *benchmarking* Interno e a DEA *Window*. Com o foco no setor metalmeccânico, busca-se identificar oportunidades de melhoria nos processos produtivos e promover propostas de práticas mais eficientes.

## 1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA

A eficiência é considerada uma medida essencial do processo produtivo, pois permite avaliar o quanto os recursos disponíveis estão sendo convertidos em *outputs* de forma otimizada (De Souza et al., 2018b). A falta da análise da eficiência ao longo do tempo pode levar a uma série de problemas. Como por exemplo, a eficiência de uma empresa pode mudar devido a uma variedade de fatores, incluindo mudanças no mercado, na tecnologia ou na própria empresa. Sem uma análise de eficiência ao longo do tempo, a empresa pode não ser capaz de responder adequadamente a essas mudanças. O tempo de resposta às mudanças do mercado deve ser rápido, tornando as empresas ágeis e enxutas para desenvolver seus produtos e produzi-los com alta eficiência (Gosling; Naim, 2009; Telles et al., 2020).

Decisões estratégicas e operacionais são, em grande parte, influenciadas pela análise da eficiência organizacional. Quando essa análise não é realizada de maneira adequada, há o risco de se basear em informações incompletas ou imprecisas, o que pode comprometer os resultados. Além disso a falta de conhecimento sobre a eficiência torna impossível avaliar se a operação está aumentando, estável ou reduzindo, especialmente quando o *benchmark* externo não pode ser alcançado (De Souza et al., 2018a). Empresas que operam com baixa eficiência operacional, em geral competem com baixas margens de lucro. Nesse sentido, a utilização de técnicas robustas de avaliação do desempenho interno da organização é essencial (De Souza et al., 2018a; Southard; Parente, 2007).

A análise da eficiência ao longo do tempo é uma parte relevante da melhoria contínua. Sem ela, a empresa pode não ser capaz de identificar áreas de melhoria ou monitorar o progresso de iniciativas de melhoria. Além disso, aumentar a produtividade e a eficiência pode ser entendido como aplicar melhorias na utilização dos recursos para o desenvolvimento e produção de produtos, com o propósito de alcançar as melhores práticas de fabricação (Telles et al., 2020).

Em muitas empresas a eficiência é medida pela razão entre horas trabalhadas e horas disponíveis para trabalhar (De Souza et al., 2018a). Em outras empresas é utilizado o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) (Andersson; Bellgran, 2015). O

OEE compara o desempenho real com o desempenho esperado de um equipamento em três elementos, i) utilização, ii) qualidade e iii) performance (Jeong; Phillips, 2001; Muchiri; Pintelon, 2008).

A análise da razão das horas trabalhadas com as horas disponíveis para trabalhar e do OEE podem ser insuficientes para a tomada de decisões que podem proporcionar o aumento da eficiência (Andersson; Bellgran, 2015; De Souza et al., 2018a). Isso porque essas abordagens não consideraram um conjunto de outros recursos, como por exemplo, materiais, mão de obra indireta, gastos gerais de fabricação, entre outros (Oechsner et al., 2002). A eficiência deve ser considerada um conceito amplo, e não é recente a indicação da necessidade de avaliar a eficiência globalmente (Skinner, 1974).

Diversos estudos exploram a integração do *benchmarking* interno com a Análise Envoltória de Dados (DEA). Em uma revisão sistemática da literatura conduzida por Piran et al., (2023), foram identificados dezesseis artigos publicados entre 1978 e 2021 que abordam essa temática. A principal contribuição desse estudo é demonstrar que o *benchmarking* interno, especialmente quando realizado com dados longitudinais, pode aprimorar o desempenho organizacional, sendo uma alternativa viável ao *benchmarking* externo. No entanto, a literatura ainda carece de estudos que combinem a eficiência da DEA com o *benchmarking* interno em estudos práticos, posicionando-a como um indicador contínuo de desempenho. Tal abordagem pode ser um meio valioso para gestores que buscam compreender e monitorar a eficiência de suas operações ao longo do tempo.

Na abordagem clássica da DEA, cada DMU influencia o resultado geral da eficiência ao longo do tempo (Charnes; Cooper; Rhodes, 1978), o que significa que a inclusão ou exclusão de um período na análise leva ao recálculo de toda a eficiência do modelo, causando a alteração dos índices de eficiência de períodos anteriores. Essa característica limita a utilização da DEA clássica como um indicador contínuo de desempenho. Por outro lado, a DEA *Window* permite trabalhar com janelas temporais, possibilitando a avaliação da eficiência em formato de painel (Cullinane et al., 2004; Pulina; Detotto; Paba, 2010; Yang; Chang, 2009). Nesse modelo, postula-se que o gestor pode analisar a eficiência ao longo do tempo dentro de uma janela específica (por exemplo, três meses), intervir no sistema e simular a

eficiência na próxima janela curta, sem que os dados antigos influenciem os resultados futuros. Isso permite o acompanhamento contínuo da eficiência em janelas curtas e recorrentes, sem que haja alterações retroativas nos dados já analisados. No entanto, é necessário testar essas possibilidades empiricamente.

Grande parte das pesquisas abordam a DEA de forma transversal, avaliando determinado ponto no tempo. Existe então a necessidade de um maior volume de pesquisas com dados em painel, que permitam a avaliação da eficiência ao longo do tempo, recorrentemente (Mergoni; Emrouznejad; De Witte, 2024).

No contexto brasileiro, em que, no levantamento realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) no ano de 2018, o Brasil aparece em último lugar em um ranking de competitividade baseado na disponibilidade e no custo do capital para as empresas, comparando dezessete economias similares: Argentina, Austrália, Canadá, Chile, China, Colômbia, Espanha, Indonésia, Índia, Coreia do Sul, México, Peru, Polônia, Rússia, Tailândia, Turquia e África do Sul (Valor Investe, 2019). Além disso, o custo com mão de obra é historicamente baixo no país (Valor Econômico, 2021). Com o custo de capital mais caro do que a mão de obra, a falta de uma análise de eficiência abrangente pode levar a uma alocação ineficiente de recursos, com investimentos sendo feitos em áreas em que não proporcionam o máximo retorno.

Neste contexto, esta dissertação busca analisar a eficiência técnica do sistema produtivo de uma empresa do segmento metalmeccânico ao longo do tempo. Assim, a pergunta de pesquisa deste estudo é: como deve ser realizada uma análise da eficiência em um sistema produtivo considerando o *benchmarking* interno e o DEA, 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 objetivo geral do estudo é realizar uma análise exploratória da eficiência, ao longo do tempo, do processo produtivo de *Metal Injection Molding* (MIM) em uma empresa do segmento metalmecânico, por meio do *benchmarking* interno e da *DEA Window*.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para responder ao objetivo geral deste trabalho, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Caracterizar como as empresas produtoras de bens avaliam a eficiência ao longo do tempo por meio de uma revisão da literatura.
- 2) Efetuar uma análise comparativa das eficiências calculadas por meio da DEA convencional e da *DEA Window*.
- 3) Avaliar a adequabilidade da utilização da DEA como um indicador recorrente de desempenho de um sistema produtivo.
- 4) Avaliar as contribuições e limitações da utilização integrada do *benchmarking* interno e da *DEA Window*.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Para assegurar o rigor científico da justificativa desta pesquisa, foram realizadas duas revisões sistemáticas da literatura. A primeira teve como objetivo compreender como o segmento manufatureiro utiliza a técnica não paramétrica da DEA para a análise de eficiência em conjunto com o *benchmarking* interno. A segunda focou na identificação de estudos que aplicaram a abordagem de painel não paramétrico da *DEA Window* para avaliar a eficiência técnica no setor manufatureiro. O detalhamento das revisões sistemáticas está presente na seção 3.2. Os estudos sobre o *benchmarking* interno em conjunto com a avaliação longitudinal da eficiência de empresas produtoras de bens foram identificadas nos

mais diversos segmentos, como por exemplo, indústria metalmeccânica (Piran et al., 2016; Barbosa et al., 2017; De Souza et al., 2018a; De Souza et al., 2018b; Piran et al., 2020a; Piran et al., 2020b), indústria química (Von Gilsa et al., 2017), indústria aeroespacial (Telles et al., 2020) e indústria energética (Gong; Shao; Zhu, 2019). Ainda assim, não foram identificados estudos que abordem a aplicação do *benchmarking* interno em conjunto com a DEA em forma de indicador recorrente. Neste sentido é necessário a realização de pesquisas direcionadas a esse fim e esta é uma das contribuições deste trabalho.

O uso recorrente da DEA oferece várias vantagens. Primeiro, ela permite que as empresas monitorem sua eficiência em intervalos regulares, identificando rapidamente quaisquer desvios de desempenho e possibilitando intervenções oportunas (Piran et al., 2023). Segundo, em um ambiente de negócios dinâmico, onde a capacidade de resposta e adaptação é crucial, ter um indicador que reflita a eficiência de forma contínua pode ser um diferencial competitivo.

Além disso, a DEA, quando utilizada de forma recorrente, pode proporcionar informações sobre tendências de longo prazo, destacando melhorias sustentáveis ou sinalizando áreas de vulnerabilidade que requerem atenção. Ao capturar a evolução da eficiência ao longo do tempo, as empresas podem basear suas estratégias de melhoria contínua em dados concretos, alinhando-se melhor aos seus objetivos operacionais e financeiros.

Uma limitação na aplicação recorrente da DEA clássica refere-se ao efeito de alteração dos índices de eficiência de períodos anteriores. Como a técnica se baseia na comparação relativa entre unidades, a inserção de novos períodos na análise pode modificar os resultados obtidos em períodos anteriores. Essa característica pode gerar incertezas para os gestores, uma vez que alterações nos índices previamente calculados dificultam a interpretação da evolução do desempenho ao longo do tempo. Neste sentido, esta pesquisa busca contribuir de forma científica, ao aplicar o DEA *Window* em conjunto com o *benchmarking* interno de forma recorrente. Para avaliar a eficiência técnica de uma empresa manufatureira ao longo do tempo comparando-a consigo mesma. Ao utilizar a DEA *Window*, a organização é capaz de capturar as mudanças dinâmicas na eficiência técnica, proporcionando uma visão mais precisa e detalhada do desempenho produtivo (Al-Refaie; Wu;

Sawalhel, 2019), além de possibilitar a solução para a alteração dos índices de eficiência de períodos anteriores, acarretada pela eficiência relativa da DEA clássica. Pois, as janelas de eficiência são calculadas por períodos pré-definidos, de forma que, cada janela é independente e tem sua eficiência média calculada em cada um destes períodos (Cullinane et al., 2004).

Vários estudos têm aplicado a DEA *Window* para calcular a eficiência de empresas produtoras de bens, levando em consideração janelas de tempo, como por exemplo, um estudo coletou dados de cinco máquinas de sopro em uma indústria de plásticos durante um período de seis meses, com o objetivo de maximizar suas saídas (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016). Em outra pesquisa, os dados do sistema de produção foram utilizados para avaliar a eficiência de uma máquina de sopro ao longo de doze meses, resultando em sete janelas de eficiência (Al-Refaie, 2022). Além disso, um estudo sobre a eficiência técnica do processo de formação de bolhas, na produção de embalagens em uma indústria farmacêutica, analisou três linhas de produção durante um período de vinte e quatro meses (Al-Refaie; Wu; Sawalheh, 2019).

Algumas pesquisas empregam a DEA *Window* em combinação com outras abordagens. Por exemplo, em três estudos distintos, a análise de janelas DEA foi realizada em conjunto com o Índice de *Malmquist*. No Brasil, 12 refinarias de petróleo foram analisadas entre os anos de 2012 e 2020, resultando em sete janelas de análise para cada refinaria (Oliveira et al., 2023). Na China, a eficiência técnica de 45 siderúrgicas foi analisada ao longo de nove anos (Kim; He; Kwon, 2023). Na Jordânia, a eficiência energética do setor industrial foi analisada durante um período de quinze anos, de 1999 a 2013 (Al-Refaie; HAmmad; Li, 2016). Porém nenhuma das pesquisas identificadas, avaliou a hipótese de que a abordagem da DEA *Window* pode ser uma solução interessante para abordar a questão da alteração dos scores de eficiência do passado ocasionados pelo cálculo da eficiência relativa da DEA e ajudar a viabilizar o uso da DEA, recorrente e continuamente como um indicador de desempenho das empresas.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES

Este estudo se concentra na aplicação da DEA *Window*, para analisar a eficiência técnica de uma indústria metalmeccânica ao longo do tempo, comparando-a consigo mesma através do *benchmarking* interno. No entanto, existem algumas delimitações importantes a serem consideradas. Que serão abordadas nesta sessão da dissertação.

A análise foi restrita a uma indústria metalmeccânica, portanto, os resultados podem não ser generalizáveis para outros tipos de empresas produtoras de bens devido às diferenças nas operações, processos e ambientes de negócios. O estudo foi realizado ao longo de um período específico. Mudanças na eficiência técnica fora deste período não foram consideradas.

A eficiência técnica foi avaliada com base em métricas específicas. Outras formas de eficiência, como eficiência econômica ou eficiência ambiental, não foram consideradas neste estudo. Além disso, a análise depende dos dados disponibilizados pela empresa avaliada nesta pesquisa. A qualidade e a precisão dos dados podem afetar os resultados da análise.

O estudo utilizou a DEA *Window* para a análise da eficiência técnica ao longo do tempo e o *benchmarking* interno para comparar a empresa consigo mesma. Embora estas sejam abordagens robustas e amplamente aceitas, existem outras técnicas de análise que podem produzir resultados diferentes. A análise é realizada comparando a empresa consigo mesma ao longo do tempo. Portanto, não considera comparações com outras empresas manufatureiras ou *benchmarking* externo.

Essas delimitações são importantes para entender o contexto e as limitações do estudo. Apesar dessas delimitações, acredita-se que a análise proporcionará *insights* valiosos sobre a eficiência técnica de forma recorrente em uma empresa produtora de bens ao longo do tempo comparando-a consigo mesma.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura de trabalho desta dissertação está organizada da seguinte forma: O primeiro capítulo introduz o tema, apresenta a justificativa para a pesquisa, define os objetivos e as perguntas de pesquisa. O segundo capítulo revisa a literatura relevante, estabelecendo o contexto teórico para o estudo. O terceiro capítulo

descreve os procedimentos metodológicos utilizados, incluindo a DEA *Window* e o *benchmarking* interno. O quarto capítulo apresenta os resultados da análise, discutindo a eficiência técnica da indústria ao longo do tempo. O quinto capítulo discute os resultados apresentados no capítulo anterior. O sexto e último capítulo conclui a dissertação, resumindo as descobertas, discutindo suas implicações e sugerindo direções para pesquisas futuras. Cada capítulo contribui para o objetivo geral da dissertação, que é analisar a eficiência técnica de uma indústria de forma recorrente ao longo do tempo, comparando-a consigo mesma.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste estudo está estruturada em três partes. Nas duas primeiras, são apresentados e discutidos os conceitos fundamentais que servem de embasamento para a pesquisa. Na terceira parte, é realizada uma análise detalhada dos estudos existentes na literatura que abordam a aplicação da DEA *Window* e do *benchmarking* interno, com um foco específico em empresas produtoras de bens.

### 2.1 BENCHMARK INTERNO

Na busca por formas de melhorar seus processos e assim, permanecerem lucrativas, as empresas adotam o *benchmarking*, uma abordagem básica para o aprimoramento de processos (Southard; Parente, 2007). O *benchmarking* é o processo de identificação, compreensão e adaptação de melhores práticas que podem ser externos, quando são baseados em outras organizações ou internos, quando são baseados em sua própria. Seu objetivo é avaliar o estado atual da organização em um determinado processo, identificar lacunas e problemas e, em seguida, procurar as melhores práticas dentro ou fora da empresa (O'Dell; Grayson, 1998).

No *benchmarking* externo uma determinada empresa utiliza o desempenho de outras organizações como padrão para sua melhoria de desempenho (Von Gilsa et al., 2017), ele quebra paradigmas estabelecidos, facilita a tomada de decisões e fornece modelos de excelência (O'Dell; Grayson, 1998). Sempre que possível, o *benchmarking* externo deve ser preferido quando comparado com o *benchmarking* interno. Pois os melhores níveis de desempenho da empresa, quando comparados com ela mesma ao longo do tempo, podem ainda ficar aquém do desempenho de seus concorrentes (Piran et al., 2021).

Em contrapartida, o *benchmarking* externo, ignora a grande quantidade de conhecimento inexplorado e as melhores práticas que já residem nas organizações e que podem ser aproveitadas por meio do *benchmarking* interno (O'Dell; Grayson, 1998). Além disso, existem muitas situações em que as organizações são únicas e

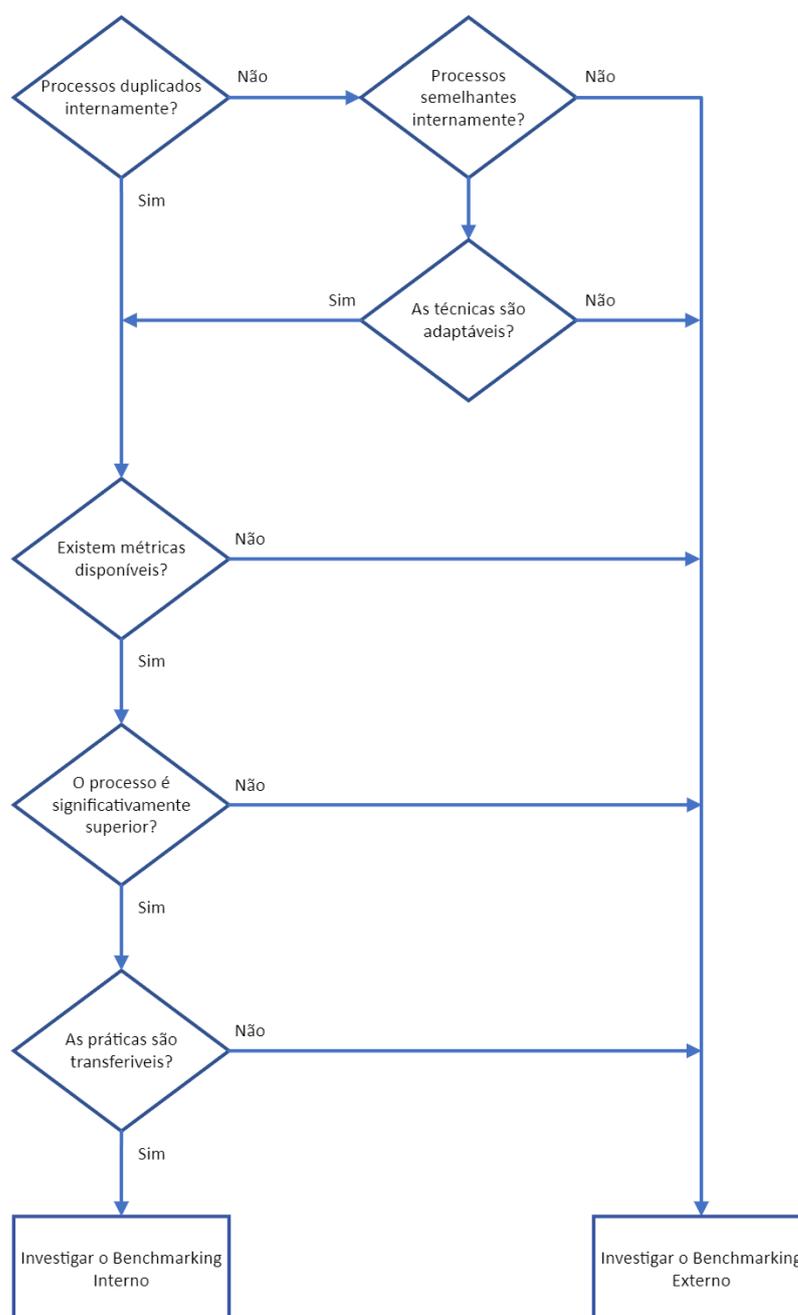
não podem ser comparadas (por exemplo, Nasa, Facebook, Google, Instagram, entre outras) (Piran et al., 2021). Outra desvantagem do *benchmarking* externo é que as empresas-alvo podem relutar em compartilhar informações por medo de perder sua vantagem competitiva (Southard; Parente, 2007).

Para estes casos, em que não é possível realizar comparações externas, em termos de eficiência, o *benchmarking* interno é recomendado, pois as informações internas são mais facilmente acessíveis (De Souza et al., 2018a). Outra vantagem do *benchmarking* interno é a possibilidade de transferência de práticas internas. Diferentes organizações normalmente possuem culturas corporativas divergentes, ou seja, o que funciona em uma organização pode não funcionar em outra em decorrência desta diferença cultural (Southard; Parente, 2007).

O *benchmarking* interno auxilia na identificação das melhores práticas, contribuindo para o aumento da eficiência de operações ineficientes sem a necessidade de comparações externas, sua utilização facilita a compreensão dos fatores com real contribuição para o aumento da eficiência operacional. (De Souza et al., 2018a). Assim é possível a comparação de uma empresa consigo mesma em diferentes períodos de tempo (Piran et al., 2021). Além disso o *benchmarking* interno ajuda na gestão do conhecimento, implementando o processo de identificação, captura e aproveitamento das melhores práticas, melhorando a competitividade organizacional. O compartilhamento e a transferência de suas informações, também são evidências de uma organização que aprende, pode analisar, refletir, aprender e mudar com base na experiência (O'Dell; Grayson, 1998).

A partir de uma vasta análise da literatura, Southard e Parente (Bazar desenvolveram um fluxograma para identificar quando a empresa deve optar pela utilização do *benchmarking* interno ou externo. Existem vários pontos de decisão que devem ser abordados ao responder à pergunta se o *benchmarking* interno ou externo deve ser usado. A Figura 1 sintetiza as perguntas que direcionam a empresa para a seleção da abordagem de *benchmarking* mais adequada ao seu objetivo. Levando em consideração processos, técnicas adaptáveis, métricas disponíveis, superioridade do processo e transferibilidade da prática.

Figura 1 – Fluxo do processo de *benchmarking*



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Southard e Parente (2007)

O estudo pioneiro a explorar o *benchmarking* interno por meio da DEA sob a ótica da análise longitudinal foi conduzido por Sueyoshi (1991). Este trabalho analisou, ao longo de um período de 31 anos, uma empresa de telecomunicações dos Estados Unidos utilizando a abordagem da DEA Econômica. Porém o

*benchmarking* interno ainda não é um tema amplamente discutido na DEA, sendo que a maioria dos estudos aplicados à manufatura têm sido realizados no Brasil, como exemplo Piran et al., (2016) que analisaram os efeitos da modularização de produtos na eficiência da engenharia de produtos e processos de produção de um fabricante de ônibus. Ainda assim, *benchmarking* interno considerando dados de séries temporais pode ajudar a superar as principais dificuldades das avaliações econômicas baseadas em DEA, como por exemplo, a falta do compartilhamento de informação entre empresas, ou a inexistência de empresas semelhantes no mercado (Piran et al., 2021).

## 2.2 DEA WINDOW

O modelo DEA convencional é uma abordagem de análise estática e transversal que avalia a eficiência relativa de uma DMU em um determinado período de tempo, não sendo capaz de mensurar a eficiência dinâmica ao longo do tempo (Kim; He; Kwon, 2023), ou seja, cada DMU é observada apenas uma vez, em uma análise de seção transversal de dados (Chung et al., 2008). Em diversos estudos, as observações das DMUs encontram-se disponíveis em múltiplos períodos temporais, sendo, portanto, relevante a condução de uma análise de dados em painel ou em séries temporais únicas, visando enfatizar as alterações na eficiência ao longo do tempo (Asmild et al., 2004; Chung et al., 2008). Em tal circunstância, a análise de janela DEA pode ser adotada para avaliar a eficiência ao longo do tempo (Kim; He; Kwon, 2023).

Obter a eficiência técnica para dados que variam no tempo e avaliar a mudança de eficiência ao longo do tempo era a preocupação de muitos pesquisadores (Muhammad; Rao; Farooq, 2018). Com o intuito de resolver essa limitação, Charnes, Clark, Cooper e Golany (1984), propuseram a análise de janela DEA, que permite a avaliação da eficiência de uma DMU não apenas em um determinado ponto no tempo, mas também ao longo de diferentes períodos, contendo amostras de séries temporais e transversais. O objetivo do estudo era, avaliar a eficiência das unidades de manutenção da força aérea dos Estados Unidos em um período de sete meses. Eles usaram cinco janelas, sendo que cada janela

abrangia um período de três meses. Esta técnica baseada na abordagem radial avalia a mudança na eficiência das DMUs ao longo do tempo (Lin et al., 2021; Muhammad; Rao; Farooq, 2018). A premissa subjacente da análise de janela proposta, é a de uma análise de média móvel e que a eficiência de cada DMU é representada na janela várias vezes, em vez de ser representada por uma única pontuação resumida (Chung et al., 2008).

A análise de janela DEA é uma abordagem de painel não paramétrica, sendo uma técnica apropriada para mensurar os níveis de eficiência de múltiplas unidades de tomada de decisão (DMUs) em relação ao seu próprio desempenho ao longo do tempo, bem como o desempenho das unidades de decisão relativamente mais produtivas dentro do conjunto amostral (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016; Halkos; Tzeremes, 2009).

Uma vez definida a janela, as observações dentro dessa janela são vistas de uma forma intertemporal, pelo que a análise é melhor designada por intertemporal local (Asmild et al., 2004). Ou seja, cada DMU não é comparada com todo o conjunto de dados, mas apenas com subconjuntos alternativos de dados de painel (Cullinane et al., 2004). A análise de janelas baseia-se no pressuposto de que o que era viável no passado permanece viável no futuro, e que o tratamento do tempo na análise de janelas é mais da natureza de uma média sobre os períodos de tempo cobertos pela janela (Cullinane et al., 2004). A representação dos resultados da análise de janela DEA permite uma melhor compreensão das tendências de desempenho, da estabilidade dos grupos de referência e de outros *insights* importantes (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016).

Um passo importante para a implementação da análise de janela DEA é a definição do modelo a ser seguido (Asmild et al., 2004). Esta técnica baseia-se nos modelos tradicionais CRS e VRS para estimar as pontuações de eficiência técnica (TE) e eficiência técnica pura (PTE) para cada DMU (Al-Refaie, 2022).

Assim, para ilustrar o funcionamento das janelas é utilizada uma explicação baseada no modelo clássico DEA CRS (fracionário) orientado a entrada. Para Piran (2015), o modelo CRS (orientado a *input*) pode ser ilustrado pelas seguintes equações (1), (2) e (3):

$$MAX_{eff0} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \forall j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$u_r \geq 0, \forall r = 1, 2, 3, \dots, s$$

$$v_i \geq 0, \forall i = 1, 2, 3, \dots, m$$

(3)

Onde:

$eff0$  = eficiência da DMU 0 em análise

$u_r$  = peso calculado para o *output*  $r$ ,  $r=1, \dots, s$

$v_i$  = peso calculado para o *input*  $i$ ,  $i=1, \dots, m$

$y_{r0}$  = quantidade do *output*  $r$  para DMU em análise

$x_{i0}$  = quantidade do *input*  $i$  para DMU em análise

$y_{rj}$  = quantidade do *output*  $r$  para DMU  $j$ ,  $n=1, \dots, s$

$x_{ij}$  = quantidade do *input*  $i$  para DMU  $j$ ,  $j=1, \dots, m$

$j$  = número DMU em análise

$s$  = número de *outputs*

$m$  = número de *inputs*

No modelo proposto por Asmild (2004), a equação fracionária acima, é transformada na seguinte equação linear, Para isso, é necessário que o denominador da função objetivo seja igual a uma constante, normalmente igual à unidade. Tal formulação é demonstrada nas Equações (4), (5) e (6), o qual as variáveis de decisão são os pesos  $u_j$  e  $v_i$ . (Piran, 2015; Kim; He; Kwon, 2023):

$$MAX_{eff0} = \sum_{j=1}^m u_j y_{j0} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \forall j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$$u_r \geq 0, \forall r = 1, 2, 3, \dots, s, v_i \geq 0, \forall i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

A análise de janela DEA, que permite uma análise dinâmica, utiliza o conceito de médias móveis para detectar tendências de eficiência nas DMUs ao longo do tempo (Park; Pham; Yeo, 2018; Yang; Chang, 2009). Ao calcular a eficiência de cada DMU em cada janela, todas as DMUs colocadas em diferentes períodos de uma janela são tratadas como diferentes (Kim; He; Kwon, 2023). Além disso, o valor de uma DMU utilizada na análise da *DEA Window* é comparado com o desempenho de outras DMUs no mesmo período temporal. Essa análise permite avaliar a eficiência de uma DMU em relação ao seu próprio desempenho em diferentes períodos de tempo (Park; Pham; Yeo, 2018).

No modelo proposto por Asmild (2004),  $J$  representa o número de DMUs ( $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ) que usam  $m$  *inputs* para produzir  $s$  *outputs*, observados em  $T$  períodos ( $t = 1, 2, 3, \dots, T$ ) (Kim; He; Kwon, 2023). Então o vetor de saída dimensional  $DMU_j^t$  ilustra uma observação  $J$  no período  $T$  com vetor de entrada dimensional  $X_j^t$  e vetor de saída dimensional  $Y_j^t$  (Peykani et al., 2021), representado por:

$$X_k^t = \begin{bmatrix} X_j^{1t} \\ X_j^{2t} \\ \vdots \\ X_j^{mt} \end{bmatrix} \quad (8)$$

e

$$Y_k^t = \begin{bmatrix} Y_j^{1t} \\ Y_j^{2t} \\ \vdots \\ Y_j^{st} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Na análise da DEA *Window*, em cada adição de nova janela, o primeiro período da janela anterior é excluído e um novo período é adicionado à análise simultaneamente. Assim a janela inicia no período  $k$  ( $1 \leq k \leq T$ ) com largura  $w$  ( $1 \leq w \leq Tk$ ). Dessa forma, as matrizes de entradas  $X_{kw}$  e saídas  $Y_{kw}$  para a janela (Peykani et al., 2021), são dadas a seguir:

$$X_{kw} = \begin{bmatrix} X_1^k & X_2^k & \dots & X_j^k \\ X_1^{k+1} & X_2^{k+1} & \dots & X_j^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{k+w} & X_2^{k+w} & \dots & X_j^{k+w} \end{bmatrix} \quad (10)$$

e

$$Y_{kw} = \begin{bmatrix} Y_1^k & Y_2^k & \dots & Y_j^k \\ Y_1^{k+1} & Y_2^{k+1} & \dots & Y_j^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_1^{k+w} & Y_2^{k+w} & \dots & Y_j^{k+w} \end{bmatrix} \quad (11)$$

A substituição dos *inputs* e *outputs* da  $DMU_j^t$  no modelo CCR (4) produzirá os resultados da análise de janela DEA (Al-Refaie; WU; Sawalheh, 2019). O número de janelas ( $q$ ), o número de DMUs diferentes por janela ( $d$ ) e o número total de DMUs diferentes ( $n$ ) são calculados por:

$$q = T - w + 1 \quad (12)$$

$$d = j \cdot w \quad (13)$$

e

$$n = j \cdot w \cdot q \quad (14)$$

Por exemplo, considere 10 DMUs ( $j = 10$ ), que são observadas em 7 períodos de tempo ( $T = 7$ ), e a largura da janela é definida como 3 períodos ( $w = 3$ ). Como

resultado, ( $q = 7 - 3 + 1 = 5$ ), ( $d = 10.3 = 30$ ) e ( $n = 10.3.5 = 150$ ) (Al-Refaie; Hammad; Li, 2016). De acordo com Asmild et al., (2004) a seleção da largura da janela deve ser a menor possível para reduzir comparações injustas ao longo do tempo, mas, ao mesmo tempo, deve ser grande o suficiente para gerar um tamanho de amostra suficiente. A maior parte dos estudos utiliza três (3) observações como a largura ideal da janela.

A análise de janela da DMU sob avaliação ( $DMU_j$ ) e todos os *scores* de eficiência  $E_{jkw}$  são mostrados na Figura 2. Observe que, além de calcular a eficiência de cada DMU por janela, três tipos de eficiência média são calculados: i) a média dos escores de eficiência da  $DMU_j$  para todas as janelas (média de linha  $E_{l*}$ ), ii) a média dos escores de eficiência da  $DMU_j$  para todos os períodos (média da coluna  $E_{*c}$ ) e iii) a média de todos os escores de eficiência da  $DMU_j$  (média total  $E_{**}$ ) (Peykani et al., 2021).

Figura 2 – Janela de análise da DMU em avaliação

		Períodos							$E_{l*}$	
		Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7		Média da linha
$DMU_j$	Janelas	Janela 1	$E_{1\ 1}$	$E_{1\ 2}$	$E_{1\ 3}$					$E_{1*}$
		Janela 2		$E_{2\ 2}$	$E_{2\ 3}$	$E_{2\ 4}$				$E_{2*}$
		Janela 3			$E_{3\ 3}$	$E_{3\ 4}$	$E_{3\ 5}$			$E_{3*}$
		Janela 4				$E_{4\ 4}$	$E_{4\ 5}$	$E_{4\ 6}$		$E_{4*}$
		Janela 5					$E_{5\ 5}$	$E_{5\ 6}$	$E_{5\ 7}$	$E_{5*}$
$E_{*c}$	Média da coluna	$E_{*1}$	$E_{*2}$	$E_{*3}$	$E_{*4}$	$E_{*5}$	$E_{*6}$	$E_{*7}$	$E_{**}$	

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Peykani et al., (2021)

A DEA *Window* é importante em duas situações: Na primeira, se o número de DMUs for pequeno, o uso da análise de janelas DEA pode aumentar o número de DMUs (Chung et al., 2008; Kim; He; Kwon, 2023) e, conseqüentemente, aumentar o poder de discriminação da técnica e tornar os resultados mais robustos (Alkhars; Alnasser; Alfaraj, 2022). Em segundo lugar, a análise de janelas DEA pode ajudar a acompanhar o desempenho de uma organização ao longo do tempo e, portanto, permite melhores julgamentos ao longo e dentro das janelas em comparação com a avaliação do desempenho durante apenas um período (Alkhars; Alnasser; Alfaraj, 2022; Lin et al., 2021), pois a análise de janela DEA mede a eficiência de cada DMU em uma seção transversal, além de medir a tendência da eficiência de todas as

DMUs ao longo da série temporal (Alkhars; Alnasser; Alfaraj, 2022). A *DEA Window* não apenas resolve as limitações do modelo DEA convencional que não compara diretamente a pontuação de eficiência de um período específico com outros períodos, como também, compara a tendência de mudança ou estabilidade do aumento ou diminuição da eficiência (Kim; He; Kwon, 2023).

### 2.3 ESTUDOS SOBRE A EFICIÊNCIA TÉCNICA NA MANUFATURA COM A UTILIZAÇÃO DA DEA WINDOW E DO BENCHMARKING INTERNO

Na literatura, poucos estudos apresentam a aplicação da *DEA Window* ou do *benchmarking* interno em empresas manufatureiras. Estas abordagens têm um maior volume de aplicações em segmentos de serviços e agricultura, como por exemplo o uso do *benchmarking* interno para analisar a eficiência de empresas de telecomunicação (Kang, 2010; Sueyoshi, 1991), seguros (Tone; Sahoo, 2005), governos (Roets; Christiaens, 2015), aviação (O'Neal et al., 2020) ou agrícolas (Piran et al., 2021). O Quadro 1 apresenta os estudos que serviram como base para esta pesquisa.

Quadro 1 – Estudos relacionados com a utilização da DEA *Window* ou *benchmarking* interno

<b>Autor(s)</b>	<b>Segmento/Período</b>	<b>Objetivo do estudo</b>	<b>DMU</b>	<b>Modelo</b>	<b>Inputs</b>	<b>Outputs</b>
Chung et al., (2008)	Ind. Semicondutores 7 anos	Estabelecer um modelo de análise de janela DEA para avaliar as combinações de famílias de produtos em uma fábrica de semicondutores.	Mix da família de produtos em períodos anuais, ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA <i>Window</i> orientado para entrada.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de ciclo da linha;</li> <li>• WIP na frente da estação de trabalho;</li> <li>• Nível de WIP;</li> <li>• Número de estações de trabalho;</li> <li>• Fator X.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de utilização da restrição;</li> <li>• Margem de contribuição.</li> </ul>
Al-Refaie; Najdawi; Sy, (2016)	Ind. de plásticos 6 meses	Medir a eficiência das máquinas de sopro em uma indústria de plásticos, através do DEA <i>Window</i> .	Máquinas de sopro em períodos quinzenais, ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA <i>Window</i> orientado para entrada.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidades de Defeitos;</li> <li>• Tempo Ocioso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de produção.</li> </ul>
Al-Refaie; Hammad; Li, (2016)	Industrial 15 anos	Avaliar a eficiência energética e o crescimento da produtividade no setor industrial da Jordania no período de 1999 a 2013.	Setor industrial da Jordania em períodos anuais, ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA <i>Window</i> orientado para entrada;</b></li> <li>• Índice de Malmquist.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de funcionários;</li> <li>• Número de estabelecimentos;</li> <li>• Consumo de energia;</li> <li>• Consumo intermediário;</li> <li>• Remuneração do funcionário;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valor agregado bruto</li> <li>• Emissão de CO2</li> </ul>

Piran et al., (2016)	Ind. Metalmeccânica 42 meses	Analisar os efeitos da modularização de produtos na eficiência da Engenharia de Produtos e Processos de Produção de um fabricante de ônibus.	Departamento em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• Impacto Causal;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prazo de entrega comercial;</li> <li>• Leadtime de engenharia (especificação da solicitação);</li> <li>• Leadtime de engenharia (configuração do produto);</li> <li>• Número de peças;</li> <li>• Número de itens;</li> <li>• Número de itens produzidos;</li> <li>• Número de pessoas empregadas no processo (Engenharia de produto);</li> <li>• Número de problemas técnicos relatados;</li> <li>• Número de produtos com reclamações de clientes</li> <li>• Número de itens com reclamações de clientes;</li> <li>• Alumínio;</li> <li>• Fibra;</li> <li>• Tapete para carro;</li> <li>• Tecidos;</li> <li>• Vidros;</li> <li>• Prazo de fabricação;</li> <li>• Prazo de montagem;</li> <li>• Número de peças compradas;</li> <li>• Número de peças produzidas;</li> <li>• Número de pessoas empregados no processo (Produção);</li> <li>• Número de problemas técnicos relatados;</li> <li>• Número de produtos com reclamações de clientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de projetos desenvolvidos;</li> <li>• Quantidade de produtos produzidos.</li> </ul>
----------------------	---------------------------------	--	---	---	--	---

Autor(s)	Segmento/Período	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Barbosa et al., (2017)	Ind. Metalmeccânica 42 meses	Avaliar as variáveis que influenciam os efeitos da modularização de produtos, no volume de produção e na eficiência de um fabricante de ônibus.	Departamento em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Rede Neural Artificial;</li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lead time comercial (negociação);</li> <li>• Lead time de engenharia (especificação do pedido);</li> <li>• Lead Time de engenharia (configuração do produto);</li> <li>• Números de peças;</li> <li>• Número de itens comprados;</li> <li>• Número de itens produzidos;</li> <li>• Pessoas empregadas no processo (engenharia de produto);</li> <li>• Número de problemas técnicos relatados;</li> <li>• Número de produtos com reclamações de clientes;</li> <li>• Número de itens com reclamações de clientes;</li> <li>• Alumínio;</li> <li>• Fibra;</li> <li>• Tapete para carro;</li> <li>• Tecido;</li> <li>• Óculos;</li> <li>• Prazo de fabricação;</li> <li>• Tempo de montagem;</li> <li>• Número de itens comprados;</li> <li>• Número de itens produzidos;</li> <li>• Pessoas empregadas no processo (produção);</li> <li>• Número de problemas técnicos relatados;</li> <li>• Número de produtos com reclamações de clientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de projetos desenvolvidos;</li> <li>• Número de produtos produzidos;</li> </ul>

Autor(s)	Segmento/Período	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Von Gilsa et al., (2017)	Ind. Química	Avaliar longitudinalmente a eficiência, considerando projetos de investimento e mudanças tecnológicas, em uma empresa petroquímica de segunda geração usando DEA.	Cada lote de produção ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• Teste t;</li> <li>• Teste de Kruskal-Wallis;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo;</li> <li>• Energia + vapor;</li> <li>• Etileno;</li> <li>• Propileno;</li> <li>• Hexano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Borracha.</li> </ul>
De Souza et al., (2018a)	Ind. Metalmeccânica 72 meses	Analisar o impacto da melhoria contínua e dos processos de aprendizagem na eficiência e no volume de produção, em uma empresa de fabricação de armas ao longo de 72 meses.	Departamento em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Regressão Linear;</li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de fabricação;</li> <li>• Estojo;</li> <li>• Chumbo;</li> <li>• Pólvora;</li> <li>• Ferramenta;</li> <li>• Espoleta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartucho carregado;</li> <li>• Cartucho vazio.</li> </ul>
De Souza et al., (2018b)	Ind. Metalmeccânica 72 meses	Avaliar a eficiência do sistema de produção em uma empresa de fabricação de armas ao longo de 72 meses.	Departamento em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seis principais insumos de produção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto produzido.</li> </ul>

<b>Autor(s)</b>	<b>Segmento/Período</b>	<b>Objetivo do estudo</b>	<b>DMU</b>	<b>Modelo</b>	<b>Inputs</b>	<b>Outputs</b>
Muhammad; Rao; Farooq, (2018)	Ind. de Cimento 11 anos	Avaliar a mudança na eficiência técnica ao longo do tempo, no período de 2005 a 2015, de várias empresas indianas de cimento.	Indústrias de cimento indianas em períodos anuais, ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Window com modelo baseado em folgas (SBM).</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encargos de energia, combustível e água;</li> <li>• Matérias-primas, estoques e peças de reposição;</li> <li>• Remuneração dos funcionários;</li> <li>• Despesas diversas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vendas líquidas.</li> </ul>
Al-Refaie; Wu; Sawalheh, (2019)	Ind. Farmacêutica 2 anos	Avaliar a eficiência das linhas de formação de bolhas entre janeiro de 2013 a dezembro de 2014.	Linhas de produção em períodos mensais, ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Window orientado para entrada.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de produção planejada em unidades;</li> <li>• Quantidade de defeitos em unidades;</li> <li>• Tempo ocioso em unidades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade real produzida em unidades.</li> </ul>
Gong; Shao; Zhu, (2019)	Ind. Energética	Desenvolver um modelo DEA multinível para analisar a eficiência de um conjunto de processos e equipamentos em uma planta de produção de etileno.	Empresa em períodos diários ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Network DEA;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Três tipos de insumos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dois tipos de produtos</li> </ul>
Telles et al., (2020)	Ind. Aeroespacial 144 meses	Analisar o impacto da implementação do Drum-Buffer-Rope (DBR) na eficiência da linha de produção em um fabricante aeroespacial durante 144 meses.	Departamento em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de produção;</li> <li>• Prazo de entrega;</li> <li>• Número de funcionários;</li> <li>• Número de reclamações;</li> <li>• Trabalho em processo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrega de pedidos no prazo;</li> <li>• Produto acabado;</li> <li>• Sucata.</li> </ul>

Autor(s)	Segmento/Período	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
Piran et al., (2020a)	Ind. Metalmeccânica 50 dias	Analisar a eficiência de um sistema de produção usando DEA e OEE de forma integrada (DEA/OEE).	Processo produtivo em períodos diários ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Teste de Hipóteses ANOVA;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de planos de corte;</li> <li>• Número de diferentes itens programados;</li> <li>• Número de ordens de produção;</li> <li>• Número de chapas;</li> <li>• Volume de matéria-prima;</li> <li>• kw consumido;</li> <li>• Tempo de mão de obra;</li> <li>• Tempo de manutenção preventiva;</li> <li>• Tempo de manutenção corretiva;</li> <li>• Horas de máquina;</li> <li>• Tempo de fornecimento de equipamentos;</li> <li>• Tempo total de corte;</li> <li>• Total de horas ociosas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de peças produzidas;</li> <li>• Volume de sucata</li> </ul>

Autor(s)	Segmento/Período	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Piran et al., (2020b)	Ind. Metalmeccânica 36 meses	Medir os efeitos da modularidade do produto na eficiência e na produtividade da área de engenharia de produto de um fabricante de ônibus durante 36 meses.	Departamento em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Clássico em dois estágios;</b></li> <li>• Teste U de Mann-Whitney;</li> <li>• <b>Benchmarking Interno.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prazo de entrega comercial (negociação com clientes);</li> <li>• Lead time de engenharia (especificação da solicitação);</li> <li>• Lead time de engenharia (configuração do produto);</li> <li>• Número de peças;</li> <li>• Número de itens comprados;</li> <li>• Número de itens produzidos;</li> <li>• Número de pessoa empregadas no processo (engenharia de produto);</li> <li>• Número de problemas técnicos relatados;</li> <li>• Número de produtos com reclamações de clientes;</li> <li>• Número de itens com reclamações de clientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de projetos desenvolvidos;</li> </ul>
Al-Refaie, (2022)	Ind. de Plásticos 12 meses	Avaliar a eficiência e a produtividade dos processos de fabricação com entradas e saídas difusas de uma máquina de sopro.	Uma máquina de sopro em períodos mensais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Window orientado para entrada;</b></li> <li>• Índice de Malmquist.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de produção planejada;</li> <li>• Quantidade de defeitos;</li> <li>• Tempo ocioso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de produção real.</li> </ul>
Kim; He; Kwon, (2023)	Ind. de ferro e aço 9 anos	Avaliar o desempenho de 45 indústrias de ferro e aço da China entre 2009 e 2017.	Empresas em períodos anuais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Window orientado para entrada;</b></li> <li>• Índice de Malmquist.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ativos fixos líquidos;</li> <li>• Número de empregados;</li> <li>• Consumo de energia;</li> <li>• Consumo de água.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valor agregado industrial;</li> <li>• Resíduos gasosos;</li> <li>• Águas residuais;</li> <li>• Resíduos sólidos.</li> </ul>

Autor(s)	Segmento/Período	Objetivo do estudo	DMU	Modelo	Inputs	Outputs
Oliveira et al., (2023)	Refinaria de petróleo 9 anos	Avaliar a eficiência e os fatores que explicam as diferenças entre as refinarias em vários períodos de tempo entre 2012 e 2020.	Refinarias de petróleo em períodos anuais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Window orientado para saída;</b></li> <li>• Índice de Malmquist;</li> <li>• Análise de cluster.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área (km<sup>2</sup>);</li> <li>• Capacidade de produção (barril/dia);</li> <li>• Número de pontos de entrada;</li> <li>• Unidades de produção;</li> <li>• Capacidade de armazenamento de óleo (m<sup>3</sup>);</li> <li>• Capacidade de armazenamento de derivados (m<sup>3</sup>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção (barril/dia)</li> </ul>
Radukic; Veselinovic; Marjanovic, (2023)	Refinaria de petróleo 8 anos	Avaliar a eficiência das empresas petrolíferas que operam na República da Sérvia, entre 2011 e 2018.	Refinarias de petróleo em períodos anuais ao longo do tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DEA Window orientado para saída;</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Total de ativos;</li> <li>• Número de funcionários;</li> <li>• Despesas operacionais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Receita;</li> <li>• Participação de mercado.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos trabalhos selecionados para o escopo de pesquisa

Dos artigos selecionados, 09 abordam o *benchmarking* interno em conjunto com o DEA clássico em dois estágios, para avaliar a eficiência técnica de unidades produtivas. O segmento de manufatura mais abordado é o metalmeccânico, com 06 estudos no total. Destas pesquisas, 04 foram realizadas em uma mesma empresa fabricante de ônibus. Na primeira o objetivo é analisar os efeitos da modularização de produtos na eficiência da engenharia de produtos e processos de produção da empresa. Foram utilizados 11 *inputs* e 01 *output* para a análise da engenharia de produtos, já para o processo de produção foram considerados 12 *inputs* e 01 *output* (Piran et al., 2016). A segunda pesquisa analisa as variáveis que influenciam os efeitos da modularização de produtos, utilizando 10 *inputs* e 01 *output* para engenharia de produtos e 12 *inputs* e 01 *output* para o processo produtivo (Barbosa et al., 2017). Outra pesquisa mede os efeitos da modularidade do produto na eficiência e na produtividade da área de engenharia de produto durante 36 meses, considerando 10 *inputs* e 01 *output* (Piran et al., 2020b). Por fim, a quarta pesquisa analisa a eficiência do sistema de produção usando DEA e OEE integradamente (Piran et al., 2020a).

Em uma fabricante de armas, foram conduzidas 02 pesquisas. Na primeira é analisado o impacto da melhoria contínua e dos processos de aprendizagem na eficiência e no volume de produção, considerando 06 *inputs* e 02 *outputs* (De Souza et al., 2018a). Já na segunda é avaliada a eficiência do processo de produção, considerando 06 *inputs* e 01 *output* (De Souza et al., 2018b).

Outros 03 estudos consideraram os segmentos: químico, energético e aeroespacial. Em uma pesquisa realizada em uma empresa petroquímica é avaliada longitudinalmente a eficiência, considerando, projetos de investimento e mudanças tecnológicas. Os autores identificaram que o uso da DEA se mostrou viável para analisar uma única empresa e identificar melhorias de eficiência, bem como os impactos do processo de aprendizagem e a implementação de projetos de melhoria (Von Gilsa et al., 2017). Outra pesquisa conduzida em uma planta de produção de etileno, visa desenvolver um modelo DEA multinível para analisar a eficiência de um conjunto de processos e equipamentos. No esquema proposto, um novo limite para o diagnóstico hierárquico da eficiência energética foi determinado com base em uma classificação de camada mais concisas com relação ao fluxo principal de energia da

produção de etileno (Gong; Shao; Zhu, 2019). Em um estudo realizado em um fabricante aeroespacial é analisado o impacto da implementação do Tambor-Pulmão-Corda (DBR) na eficiência da linha de produção. Após a implementação do DBR, a eficiência composta da linha de produção de computadores aumentou, em média, 19%, a linha de produção de monitores aumentou 16% e a de eletrônicos aumentou 4% (Telles et al., 2020).

Os outros 09 estudos abordam o DEA *Window* em empresas manufatureiras, destes, 02 são realizados em indústrias de plásticos. O primeiro buscou medir a eficiência das máquinas de sopro em uma empresa. Após a comparação de performance, constatou-se que existem diferenças significativas entre a eficiência dos turnos diurno e noturno para cada máquina (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016). O segundo estudo avalia a eficiência e a produtividade dos processos de fabricação com entradas e saídas difusas de uma máquina de sopro. Os resultados mostraram que a principal causa da ineficiência técnica é a ineficiência de escala. Por conseguinte, é necessário otimizar a dimensão das operações (Al-Refaie, 2022).

O segmento de refinarias de petróleo conta com 02 estudos. No primeiro é avaliada a eficiência e os fatores que explicam as diferenças entre as refinarias. A integração entre o DEA *Window*, o Índice de *Malmquist* e a análise de agrupamento é destacada como uma contribuição prática, pois separa períodos indesejados ou problemas específicos que ocorreram nos períodos identificados (Oliveira et al., 2023). O estudo seguinte avalia a eficiência das empresas petrolíferas que operam na República da Sérvia. Os resultados indicam uma melhoria da eficiência das empresas petrolíferas durante o período analisado, além disso, apresenta um problema de má alocação de recursos (Radukic; Veselinovic; Marjanovic, 2023).

Em uma fábrica de semicondutores chinesa, uma pesquisa buscou estabelecer um modelo de análise de janela DEA para avaliar as combinações de famílias de produtos. Como resultado o artigo apresenta o mix ideal, com uma eficiência média de 0,9994 ao longo de dois anos (Chung et al., 2008). Na Jordania outra pesquisa avalia a eficiência energética e o crescimento da produtividade no setor industrial do país no período de 1999 a 2013. Os resultados indicam uma diminuição do crescimento da produtividade entre 2009 e 2013, além de um efeito negativo da emissão de CO<sub>2</sub> sobre a eficiência (Al-Refaie; Hammad; Li, 2016).

Em certo estudo, é avaliada a mudança na eficiência técnica ao longo do tempo, de diversas indústrias de cimento indianas. Os resultados do estudo apresentam as janelas com queda e aumento da produtividade, além de identificar duas empresas que foram eficientes em todas as janelas (Muhammad; Rao; Farooq, 2018). Outro estudo realizado na China busca avaliar o desempenho energético e ambiental de 45 indústrias de ferro e aço. Como resultado, eficiência energética das empresas de grande porte foi maior do que a das empresas de médio e pequeno porte, ao passo que, na avaliação da eficiência ambiental, as empresas de pequeno porte foram muito superiores às empresas de grande e médio porte (Kim; He; Kwon, 2023). Por fim em uma indústria farmacêutica foi realizado um estudo para avaliar a eficiência das linhas do processo de formação de bolhas. Os resultados mostraram reduções significativas nas pontuações de ineficiência técnica, ineficiência técnica pura e ineficiência de escala no ano de 2014 (Al-Refaie; Wu; Sawalheh, 2019).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A seleção de um método de pesquisa apropriado é essencial para alcançar resultados e conclusões sólidos, precisos e confiáveis. Um projeto de pesquisa bem estruturado e organizado assegura rigor e confiabilidade, além de fornecer uma resposta abrangente à pergunta de pesquisa abordada (Cauchick-Miguel; Sousa-Zomer; Tortorella, 2023). Destaca-se a importância de conduzir pesquisas que combinem rigor teórico e metodológico com relevância prática para organizações e sociedade. Para assegurar a confiabilidade dos resultados em pesquisas científicas, é essencial seguir uma sequência de etapas sistemáticas e interligadas (Dresch; Lacerda; Antunes, 2015).

Devido à importância do método, este capítulo é dedicado a descrever os procedimentos e as fases empregadas no desenvolvimento da pesquisa. Assim, a seguir, apresenta-se o delineamento da pesquisa, através do qual buscou-se esclarecer um conjunto de decisões que validem o método de pesquisa e fundamentem os procedimentos adotados na investigação.

#### 3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Em pesquisas científicas, é necessário que haja consistência e congruência entre os componentes que a constituem. Isso significa que o referencial teórico, os objetivos, a metodologia e as conclusões devem estar alinhados (Augusto Cauchick Miguel, 2007). Portanto, o delineamento é uma parte crucial do processo de pesquisa, pois fornece um roteiro para a coleta, análise e interpretação dos dados.

Para estabelecer o método a ser utilizado na pesquisa, é crucial considerar o ponto inicial da investigação e ter um objetivo de pesquisa claramente definido. Para o trabalho em questão, o método indutivo foi selecionado como o método de pesquisa. O estudo visa construir conhecimento a partir da análise de dados, realizando comparações e correlacionando informações para alcançar os resultados desejados (Dresch; Lacerda; Antunes, 2015). A presente pesquisa foi classificada conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – 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 pelo autor com base em Cauchick, (2007)

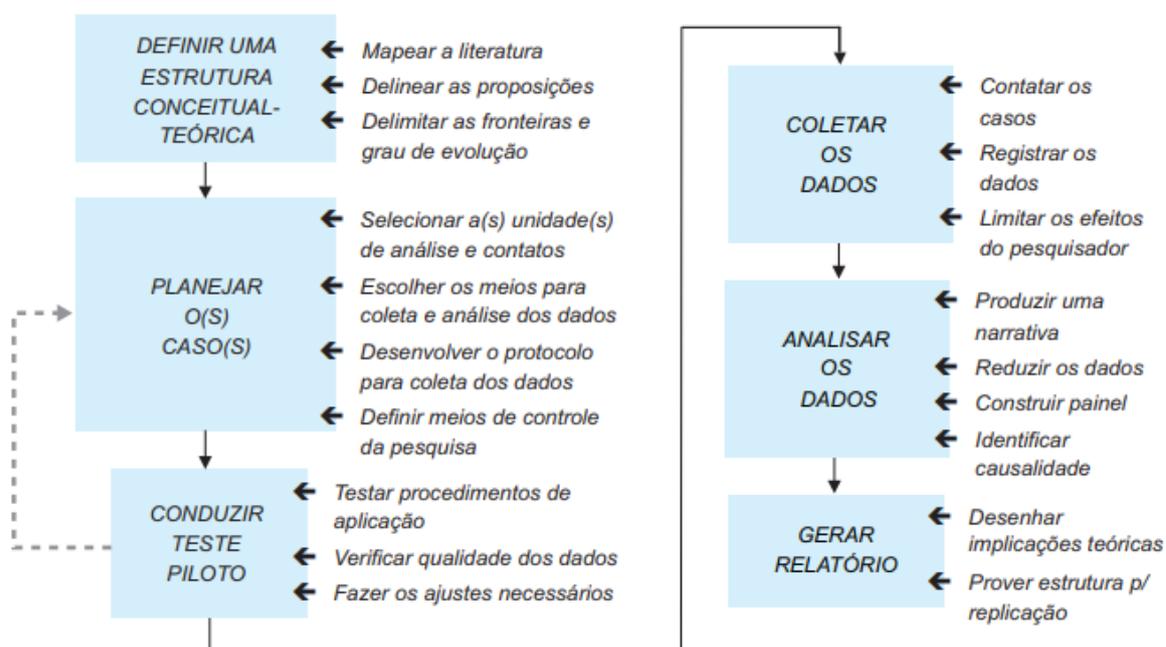
Conforme apresentado anteriormente, esta pesquisa é classificada como aplicada, uma vez que visa gerar conhecimento com aplicabilidade prática direta. Do ponto de vista da abordagem do problema, a pesquisa é categorizada como quantitativa, pois envolve a apresentação e análise de dados utilizando modelos matemáticos. No que diz respeito aos objetivos, a pesquisa é caracterizada como exploratória, envolvendo uma revisão bibliográfica e buscando elucidar o problema e formular hipóteses. Em termos de procedimentos é um estudo de caso porque se concentra em uma empresa específica do setor metalmeccânico, permitindo uma análise aprofundada e detalhada da eficiência técnica ao longo do tempo nesse contexto específico. Cada uma dessas classificações contribui para a robustez e relevância da pesquisa.

O estudo de caso é uma pesquisa empírica que explora um fenômeno específico, geralmente contemporâneo, dentro de seu contexto real, especialmente quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidas. Envolve uma análise detalhada de um ou mais objetos (casos), permitindo um conhecimento amplo e minucioso do assunto (Augusto Cauchick Miguel, 2007). Além disso, envolvem uma combinação de métodos de coleta de dados, incluindo entrevistas, questionários, observações, entre outros. As evidências coletadas, que fornecerão suporte para o pesquisador, podem ser tanto quantitativas quanto qualitativas ((Dresch; Lacerda; Antunes, 2015). Isso permite uma análise abrangente e multifacetada do caso em estudo, proporcionando *insights* valiosos que podem não ser obtidos através de um único método de coleta de dados. Portanto, os estudos de

caso oferecem uma abordagem robusta e flexível para a pesquisa científica ((Dresch; Lacerda; Antunes, 2015).

A definição de um método de pesquisa e a justificativa de sua escolha são fundamentais para assegurar que a investigação abordará efetivamente o problema de pesquisa. Além disso, a aplicação adequada do método de pesquisa promove o reconhecimento do estudo pela comunidade científica, demonstrando que a pesquisa é confiável e válida para o campo em questão. Portanto, a escolha e a implementação correta do método de pesquisa são componentes essenciais para a realização de uma pesquisa científica robusta e relevante (Dresch; Lacerda; Antunes, 2015). Na Figura 3 são detalhadas as etapas para condução da pesquisa de estudo de caso.

Figura 3 – Condução do estudo de caso



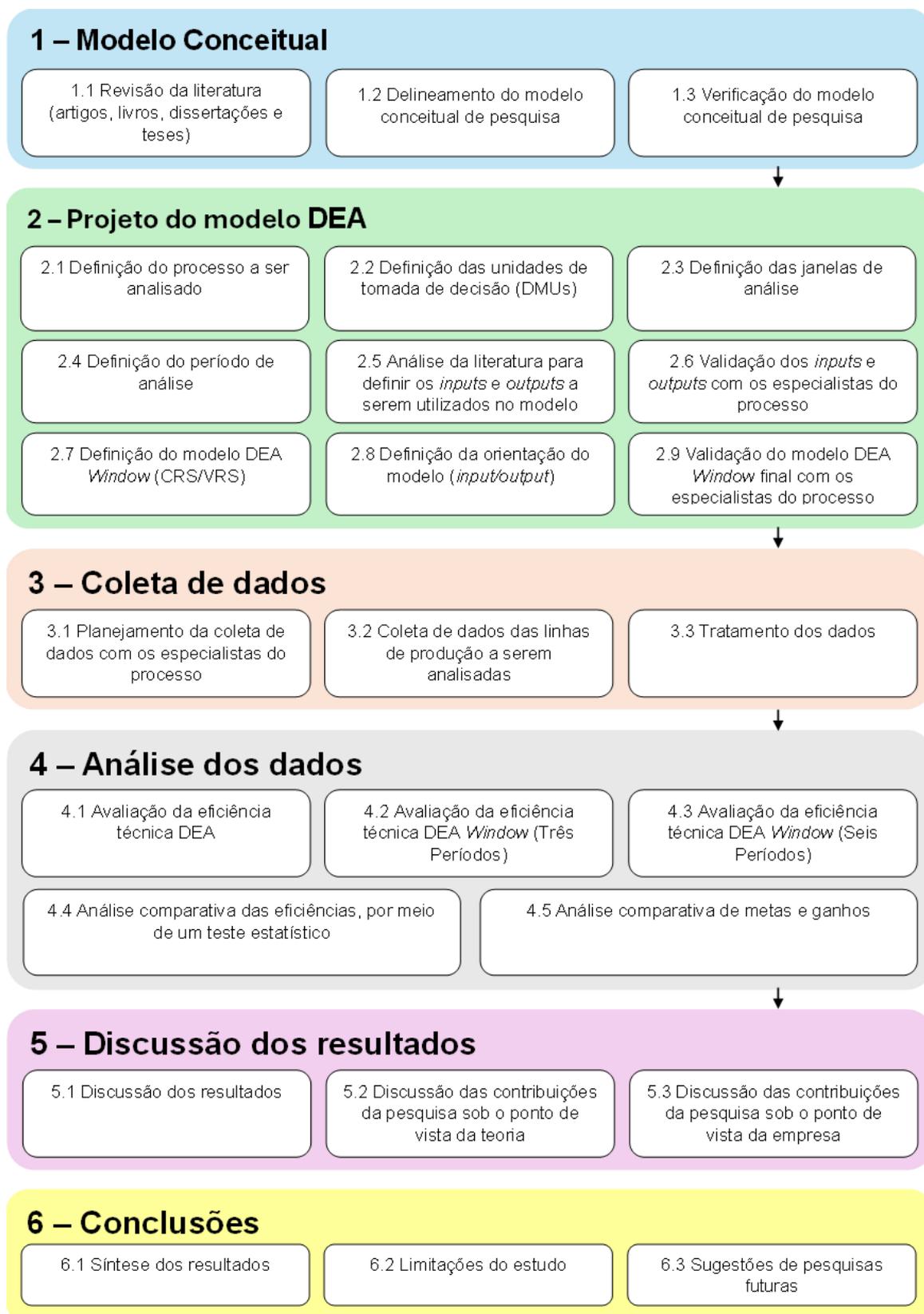
Fonte: Cauchick, (2007)

Na próxima seção, será detalhada a condução do método de trabalho desta pesquisa.

### 3.2 MÉTODO DE TRABALHO

As etapas do método de trabalho desta pesquisa foram delineadas conforme a pesquisa de Cauchick (2007), com adaptações realizadas para atender às necessidades e particularidades específicas do estudo, incluindo a adição de novas etapas que incorporam o uso do DEA *Window* através do *benchmarking* interno. O método está organizado em seis etapas: i) elaboração do modelo conceitual; ii) projeto do modelo DEA; iii) coleta de dados; iv) análise dos dados; v) discussão dos resultados; e vi) conclusões. A Figura 4 ilustra as etapas definidas para o método de trabalho desta dissertação.

Figura 4 – Método de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

Na primeira etapa do método de trabalho, foram realizadas duas revisões sistemáticas da literatura. A primeira revisão focou na identificação de estudos que aplicaram a abordagem de painel não paramétrico da DEA *Window* para avaliar a eficiência técnica no setor manufatureiro. Já a segunda revisão teve como objetivo compreender como o segmento manufatureiro utiliza a técnica não paramétrica da DEA para a análise de eficiência em conjunto com o *benchmarking* interno.

Na primeira RSL, foram utilizadas as bases de dados da EBSCO *Host*, SCOPUS e *Web of Science*. Para esta busca não foi estabelecido limite temporal e os termos de busca utilizados, direcionaram a localização de estudos concentrados em empresas produtoras de bens. O Quadro 3 sintetiza as bases de dados e as *strings* de busca utilizadas.

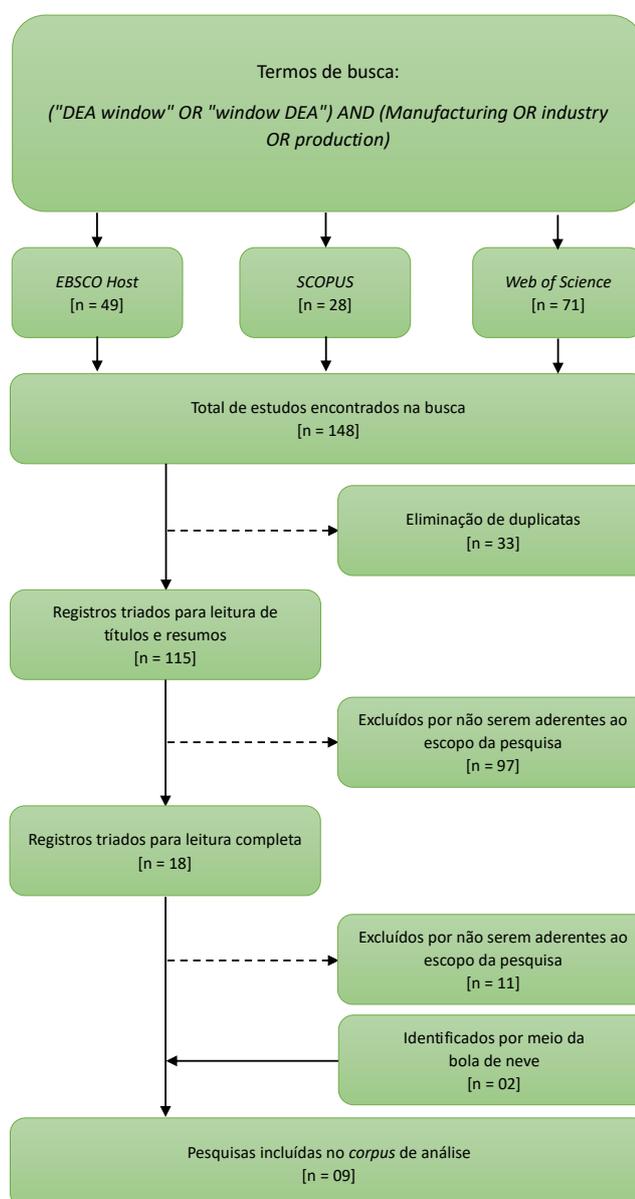
Quadro 3 – *Strings* da Revisão Sistemática da Literatura 1

<b>B A S E S</b>		
<b>EBSCO <i>Host</i></b>	<b>SCOPUS</b>	<b><i>Web of Science</i></b>
( <i>"DEA Window" OR "Window DEA"</i> ) AND ( <i>Manufacturing OR Industry OR Production</i> )		

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a elaboração do protocolo de pesquisa, disponível no apêndice I. Foi realizada a estratégia de busca, que considerou no critério de inclusão artigos, livros, dissertações e teses nos idiomas inglês e português. Na Figura 5 está presente o fluxo de buscas e elegibilidade, contendo a quantidade de estudos identificados, quantidade de estudos excluídos e a quantidade de documentos incluídos no escopo de pesquisa.

Figura 5 – Fluxo de busca e elegibilidade da pesquisa 1



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Morandi; Camargo, (2015).

Com a realização da busca foram identificados 148 estudos, totalizando as pesquisas realizadas nas três bases de dados. Destes, foram excluídos 33 estudos duplicados ou que estavam fora do critério de idiomas definido no protocolo de buscas, restando 115 estudos. Após a leitura de títulos e resumos, foram eliminados por não serem aderentes ao escopo de pesquisa 97 estudos, restando 18. Na etapa seguinte, foi realizada a leitura inspeccional dos 18 artigos restantes e uma nova

rodada de exclusão por falta de aderência ao escopo de pesquisa foi processada, eliminando 08 estudos. Nos 07 estudos restantes foi realizada a bola de neve que identificou mais 02 estudos aderentes a pesquisa, no final foram selecionados 09 estudos para a utilização no corpus de análise.

Na sequência foi realizada a segunda Revisão Sistemática da Literatura, com o intuito de identificar os estudos publicados até o momento, sobre a utilização do *benchmarking* interno. Nesta revisão foi utilizado como base o capítulo de livro *Internal Benchmarking for Efficiency Evaluations Using Data Envelopment Analysis: A Review of Applications and Directions for Future Research*, publicado por Piran et al, (2023), considerando os artigos registrados nas bases da SCOPUS e *Web of Science* entre 1978 e 2021. Para atualizar os estudos da revisão base, foram pesquisados os mesmos *strings* de busca nas bases de dados utilizadas pelos autores, com o período de 2022 a 2023. O Quadro 4 sintetiza as bases de dados e as strings de busca utilizadas.

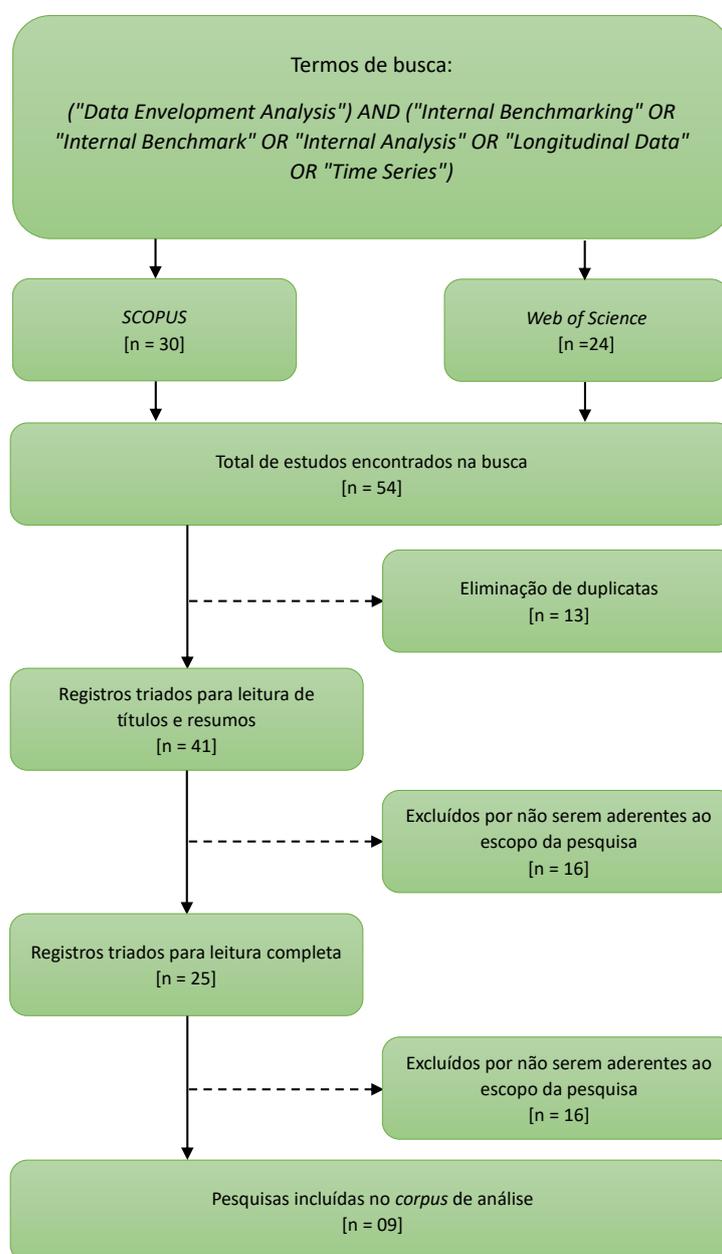
Quadro 4 – *Strings* da Revisão Sistemática da Literatura 2

<b>B A S E S</b>	
<b>SCOPUS</b>	<b><i>Web of Science</i></b>
<p><i>("Data Envelopment Analysis") AND ("Internal Benchmarking" OR "Internal Benchmark" OR "Internal Analysis" OR "Longitudinal Data" OR "Time Series")</i></p>	

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Piran et al, (2023).

Após a elaboração do protocolo de pesquisa utilizado, disponível no apêndice II. Foi realizada a estratégia de busca, que considerou no critério de inclusão artigos, livros, dissertações e teses nos idiomas inglês e português. Na Figura 6 está presente o fluxo de buscas e elegibilidade, contendo a quantidade de estudos identificados, quantidade de estudos excluídos e a quantidade de documentos incluídos no escopo de pesquisa.

Figura 6 – Fluxo de busca e elegibilidade da pesquisa 2



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Morandi; Camargo, (2015).

Com a realização da busca foram identificados 54 estudos, considerando as pesquisas realizadas nas duas bases de dados e a pesquisa de Piran et al, (2023). Deste total, foram excluídos 13 estudos duplicados ou que estavam fora do critério de idiomas definido no protocolo de buscas, restando 41 estudos. Após a leitura de títulos e resumos, foram eliminados por não serem aderentes ao escopo de pesquisa

16 estudos, restando 25. Na etapa seguinte, foi realizada a leitura inspeccional dos 25 artigos restantes e uma nova rodada de exclusão por falta de aderência ao escopo de pesquisa foi processada, eliminando 16 estudos, restando 09 que foram utilizados na pesquisa.

Os 18 Estudos selecionados nas duas Revisões Sistemáticas da Literatura foram incluídos no *corpus* de análise desta dissertação. As pesquisas foram classificadas conforme a abordagem identificada, para DEA *Window* foi utilizada a etiqueta DW e para *benchmarking* interno a etiqueta BI, não foram identificados estudos que aplicassem as duas abordagens em conjunto. O Quadro 5 sintetiza os estudos relacionados.

Quadro 5 – Estudos incluídos na pesquisa

<b>Título</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>
<i>A DEA window analysis on the product family mix selection for a semiconductor fabricator</i>	DW	Chung, Lee, Kang e Lai	2008
<i>Using DEA Window Analysis to Measure the Efficiencies of Blowing Machines in Plastics Industry</i>	DW	Al-Refaie, Najdawib e Sy	2016
<i>DEA window analysis and Malmquist index to assess energy efficiency and productivity in Jordanian industrial sector</i>	DW	Al-Refaie, Hammad e Li	2016
<i>Product modularization and effects on efficiency: an analysis of a bus manufacturer using data envelopment analysis (DEA)</i>	BI	Piran et al.,	2016
<i>Longitudinal evaluation of efficiency in a petrochemical company</i>	BI	Von Gilsa et al.,	2017
<i>Exploratory analysis of the variables prevailing on the effects of product modularization on production volume and efficiency</i>	BI	Barbosa et al.,	2017
<i>Do the improvement programs really matter? An analysis using data envelopment analysis</i>	BI	De Souza et al.,	2018
<i>Efficiency and internal benchmark on an armament company</i>	BI	De Souza et al.,	2018
<i>DEA Window Analysis with slack-based measure of Efficiency in Indian Cement Industry</i>	DW	Muhammad et al.,	2018

<b>Título</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>
<i>DEA window analysis for assessing efficiency of blistering process in a pharmaceutical industry</i>	DW	Al-Refaie, Wu e Sawalheh	2019
<i>Multi-level and multi-granularity energy efficiency diagnosis scheme for ethylene production process</i>	BI	Gong, Shao e Zhu	2019
<i>Drum-buffer-ropes in an engineering-to-order system: An analysis of an aerospace manufacturer using data envelopment analysis (DEA)</i>	BI	Telles et al.,	2020
<i>Effects of product modularity on productivity: an analysis using data envelopment analysis and Malmquist index</i>	BI	Piran et al.,	2020
<i>Overall Equipment Effectiveness: Required but not Enough—A Na Analysis Integrating Overall Equipment Effect and Data Envelopment Analysis</i>	BI	Piran et al.,	2020
<i>Window Analysis and MPI for Efficiency and Productivity Assessment Under Fuzzy Data: Window Analysis and MPI</i>	DW	Al-Refaie	2022
<i>Combining common-weights DEA window with the Malmquist index: A case of China's iron and steel industry</i>	DW	Kim, He e Kwon	2023
<i>Efficiency Analysis of Oil Refineries Using DEA Window Analysis, Cluster Analysis, and Malmquist Productivity Index</i>	DW	Oliveira et al.,	2023
<i>Technical efficiency analysis of oil companies in the Republic of Serbia</i>	DW	Radukić, Veselinović e Marjanović	2023

Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda etapa, com base no delineamento e definição do modelo conceitual da pesquisa, foi desenvolvido o projeto do modelo DEA. Nessa fase, foi definido o processo a ser analisado por meio do *benchmarking* interno, incluindo a identificação das unidades de tomada de decisão, a quantidade de janelas e o período a ser avaliado. A partir da análise da literatura, foram selecionados os *inputs* e *outputs* a serem utilizados no modelo, os quais foram validados com especialistas do processo. O detalhamento desta etapa está presente na seção 3.3.

Na terceira etapa, foi realizada a coleta dos dados para o estudo. O planejamento dessa coleta foi desenvolvido em colaboração com os especialistas do processo, sendo que os dados disponibilizados pela empresa foram organizados em planilhas eletrônicas e posteriormente tratados para remover inconsistências ou lacunas.

Na quarta etapa, foi realizada a avaliação a eficiência técnica para o modelo DEA, o modelo DEA *Window* com janelas de três períodos e o modelo DEA *Window* com janelas de seis períodos. Após a avaliação técnica individual dos modelos, foi realizada a análise comparativa entre as eficiências dos três modelos. A última análise realizada foi a análise comparativa das metas e ganhos para cada um dos modelos.

Na quinta etapa foram apresentadas as discussões dos resultados, considerando as contribuições do estudo para a teoria e para as empresas. Na última etapa foram apresentadas as sínteses dos resultados, as limitações do estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

### 3.3 PROJETO DO MODELO DEA

O estudo foi realizado em uma indústria do segmento metalmeccânico, situada no estado do Rio Grande do Sul. A empresa possuía o controle de diversas variáveis, o que possibilitou a obtenção dos dados necessários para a aplicação e o cálculo do modelo proposto. Inicialmente foram definidos os especialistas, que integrariam o grupo da pesquisa. Nessa etapa do modelo DEA, é recomendado a busca por apoio de especialistas e profissionais da empresa pesquisada (Piran, 2015; Senra et al., 2007). Para este estudo, foram escolhidos nove especialistas ligados a empresa, cuja experiência e conhecimento detalhado do processo a ser avaliado eram cruciais para a coleta e validação dos dados. Com a definição destes especialistas, foi elaborado um grupo multidisciplinar que abrangia as áreas de engenharia de processos, engenharia da qualidade, gestão da manufatura, controladoria, custos, Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) e infraestrutura. O quadro 6 ilustra os especialistas que participaram do grupo.

Quadro 6 – Especialistas selecionados

<b>Cargo</b>	<b>Tempo de experiência</b>
Diretor Industrial	2 anos
Gerente Industrial	8 anos
Gerente de Custos e Controladoria	23 anos
Gerente de Infraestrutura e Manutenção	2 anos
Coordenador de Custos e Controladoria	9 anos
Coordenador de Qualidade	10 anos
Supervisor de PPCP	11 anos
Analista de Manufatura	4 anos
Analista de Engenharia de Processos	5 anos

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa composição multidisciplinar do grupo permitiu uma abordagem mais robusta, na qual as decisões sobre os parâmetros do modelo DEA foram fundamentadas em uma combinação de conhecimento técnico-operacional e expertise analítica, principalmente na seleção de variáveis. A participação ativa dos especialistas não só contribuiu para a credibilidade do estudo. Mas também possibilitou ajustes finos no modelo DEA e DEA *Window*, assegurando que eles refletissem fielmente as realidades operacionais da empresa, sem comprometer a rigorosidade técnica da análise.

### 3.3.1 Definição do processo a ser analisado

A escolha do processo de *Metal Injection Molding (MIM)* para análise desta pesquisa foi fundamentada em dois aspectos principais. Primeiramente, a disponibilidade e a qualidade dos dados, aliados a uma série histórica robusta, viabilizam a aplicação da DEA e DEA *Window*, permitindo uma comparação precisa da eficiência do processo por meio do benchmarking interno. Em segundo lugar, o MIM é uma tecnologia avançada que integra técnicas de moldagem por injeção termoplástica e metalurgia do pó convencional, possibilitando a produção de pequenas peças metálicas complexas e precisas em altos volumes (Merhar, 1990).

Considerando que a empresa utiliza o MIM para a fabricação de componentes destinados à produção de armas, a análise de seu desempenho produtivo torna-se particularmente relevante. Essa escolha reflete não apenas as particularidades do

processo produtivo, mas também o interesse da empresa em avaliar e aprimorar continuamente sua eficiência operacional. A seleção do processo permitiu que a análise fosse direcionada a um problema real e relevante para a organização. A escolha por comparar o processo produtivo ao longo do tempo, é particularmente adequada para o *benchmarking* interno, pois maximiza a utilidade das comparações e facilita a identificação de práticas que podem ser transferidas para melhorar a eficiência do processo (Southard; Parente, 2007).

### **3.3.2 Definição das unidades de tomada de decisão (DMUs)**

Para a definição das DMUs, buscou-se uma fundamentação na literatura existente. A análise das pesquisas que aplicaram a DEA em conjunto com o *benchmarking* interno revelou que a maioria dos estudos considerou departamentos avaliados em períodos mensais ao longo do tempo como DMUs (Piran et al., 2016; Barbosa et al., 2017; De Souza et al., 2018a; De Souza et al., 2018b; Telles et al., 2020; Piran et al., 2020b). Alguns estudos adotaram DMUs diferentes, como a avaliação de linhas de produção em períodos mensais ao longo do tempo (Al-Refaie; Wu; Sawalheh, 2019), ou a análise da eficiência em intervalos diários, seja para toda a empresa (Gong; Shao; Zhu, 2019) ou para processos produtivos específicos (Piran et al., 2020a). Outros trabalhos focaram em elementos mais específicos, como a consideração de cada lote de produção ao longo do tempo, sendo esta última abordagem menos comum (Von Gilsa et al., 2017).

Diante dessas diferentes possibilidades, e considerando as características específicas do processo produtivo da empresa estudada, optou-se por definir o processo a ser analisado em períodos mensais ao longo do tempo como a DMU do modelo DEA *Window*. Essa decisão foi baseada na capacidade de capturar variações de eficiência em intervalos regulares, proporcionando uma visão detalhada e comparativa da eficiência ao longo do tempo. A escolha de períodos mensais também foi motivada devido à facilidade de obtenção de dados mensais. Além disso a definição das DMUs em períodos mensais permite não apenas a comparação interna entre os diferentes momentos do processo produtivo, mas também a identificação de padrões e tendências que possam orientar intervenções para a

melhoria contínua da eficiência. Assim, a DMU foi definida como o processo produtivo do MIM ao longo dos meses.

### **3.3.3 Definição das janelas e período de análise**

A definição do tamanho ideal da janela em estudos da DEA Window varia de acordo com o objeto e o objetivo do estudo (Muhammad; Rao; Farooq, 2018). Nos estudos identificados na literatura, a maior parte adotam janelas com o comprimento de três períodos, alinhando-se ao trabalho seminal de Charnes, Clark, Cooper e Golany (1984). Após a avaliação junto aos especialistas da empresa, foram definidos dois tamanhos de janelas, a primeira com três períodos e a segunda com seis períodos, assim as janelas estariam alinhadas ao modelo de gestão da empresa e a divulgação de resultados trimestrais da empresa que possui capital aberto.

Após a definição dos tamanhos das janelas, foi realizada uma segunda avaliação com os especialistas envolvidos no processo. Para esta avaliação foi definido o período de análise dos modelos, que considerou os meses de janeiro de 2020 a novembro de 2024. Esse período foi selecionado porque, de acordo com os especialistas, os dados referentes a esse intervalo estavam completos e devidamente registrados no sistema da empresa. A disponibilidade de dados confiáveis foi essencial para a aplicação do modelo DEA *Window*, que requer informações detalhadas para cada DMU ao longo do tempo.

### **3.3.4 Análise da literatura para a definição dos inputs e outputs e validação com os especialistas**

Para garantir que as variáveis escolhidas fossem adequadas e relevantes para o contexto da pesquisa, foi realizada inicialmente uma análise aprofundada nos estudos relacionados com a utilização do DEA *Window* ou *benchmarking* interno. selecionados na seção 2.3. Os estudos revisados revelam uma ampla variedade de *inputs* e *outputs* utilizados em aplicações anteriores da DEA, tanto em conjunto com o *benchmarking* interno quanto em modelos da DEA *Window*. Esses estudos forneceram uma base para a identificação inicial das variáveis potenciais a serem

consideradas no modelo desta pesquisa. No Quadro 7 são detalhadas as variáveis identificadas em cada pesquisa revisada.

Quadro 7 – Lista das principais variáveis identificadas na literatura

Variável	Tipo	Autores
Quantidade de Matéria prima utilizada	<i>Input</i>	Piran et al., (2016) Barbosa et al., (2017) Von Gilsa et al., (2017) De Souza et al., (2018a) De Souza et al., (2018b) Muhammad; Rao; Farooq, (2018) Piran et al., (2020a)
Quantidade de funcionários	<i>Input</i>	Al-Refaie; Hammad; Li, (2016) Piran et al., (2016) Barbosa et al., (2017) Telles et al., (2020) Piran et al., (2020b) Kim; He; Kwon, (2023) Radukic; Veselinovic; Marjanovic, (2023)
Consumo de energia	<i>Input</i>	Al-Refaie; Hammad; Li, (2016) Von Gilsa et al., (2017) Muhammad; Rao; Farooq, (2018) Piran et al., (2020a) Kim; He; Kwon, (2023)
Tempo de produção	<i>Input</i>	Von Gilsa et al., (2017) De Souza et al., (2018a) Telles et al., (2020) Piran et al., (2020a)
Tempo ocioso	<i>Input</i>	Al-Refaie; Najdawi; Sy, (2016) Al-Refaie; Wu; Sawalheh, (2019) Piran et al., (2020a) Al-Refaie, (2022)
Consumo de água	<i>Input</i>	Von Gilsa et al., (2017) Kim; He; Kwon, (2023)
Quantidade de produção	<i>Output</i>	Al-Refaie; Najdawi; Sy, (2016) Piran et al., (2016) Barbosa et al., (2017) Von Gilsa et al., (2017) De Souza et al., (2018a) De Souza et al., (2018b) Al-Refaie; Wu; Sawalheh, (2019) Telles et al., (2020) Piran et al., (2020a) Piran et al., (2020b) Al-Refaie, (2022) Oliveira et al., (2023)
Quantidade de peças defeituosas	<i>Output</i>	De Souza et al., (2018a) Telles et al., (2020) Piran et al., (2020a)

Fonte: Elaborado pelo autor

A diversidade de variáveis encontradas na literatura reflete as diferentes características e objetivos dos processos analisados, destacando a importância de uma seleção criteriosa das variáveis para cada aplicação específica. Este levantamento inicial permitiu uma compreensão clara das possíveis variáveis a serem incluídas no modelo, que foram posteriormente avaliadas e validadas com os especialistas do processo em questão. O Quadro 8 apresenta os *inputs* e *outputs* selecionados para o modelo, após a avaliação dos especialistas do processo.

Quadro 8 – *Inputs* e *outputs* selecionados

Variável	Nome	Descrição	Unidade
<i>Input1</i>	MOD	Mão de obra direta disponível em horas.	h
<i>Input2</i>	Subcontratação	Custos incorridos por contratar mão de obra externa para realizar atividades específicas que não são executadas diretamente.	R\$
<i>Input3</i>	GGF	Gastos gerais de fabricação	R\$
<i>Input4</i>	MP	Matéria prima consumida/ Lista Técnica	Kg
<i>Input5</i>	Energia elétrica	Energia elétrica consumida para o funcionamento da linha de produção.	Kwh
<i>Input6</i>	Gás	Custos incorridos pelo consumo de gás no processo produtivo.	R\$
<i>Output1</i>	Peças produzidas	Quantidade de peças produzidas na linha de produção.	unidades
<i>Output2</i>	CPP	Custo Produto Produzido (Volume x custo unitário).	R\$

Fonte: Elaborado pelo autor

A escolha dos *inputs* e *outputs* para o modelo final foi fundamentado em critérios como a relevância operacional das variáveis, a disponibilidade e qualidade dos dados, e a capacidade dessas variáveis refletirem com precisão a eficiência processo produtivo analisado. Inicialmente, a análise da literatura forneceu um conjunto amplo de possíveis variáveis, que foram então submetidas a uma triagem para identificar aquelas que mais se alinhavam com as particularidades do processo produtivo da empresa. Esse processo envolveu a colaboração com os especialistas do setor, cujos conhecimentos práticos e experiência operacional foram cruciais para validar as escolhas feitas.

Além disso, foi levado em consideração o impacto potencial de cada variável na eficiência geral do processo produtivo. Variáveis que poderiam distorcer os resultados ou que não eram plenamente controláveis dentro do contexto operacional da empresa foram excluídas ou ajustadas. O objetivo foi assegurar que os *inputs* e *outputs* selecionados não apenas representassem fielmente o desempenho das unidades de produção, mas também que fossem viáveis de serem monitorados e gerenciados ao longo do tempo.

### **3.3.5 Definição dos modelos DEA e DEA Window (CRS / VRS) e orientação dos modelos**

Neste estudo, a escolha do modelo DEA *Window* foi definido por duas principais considerações: a estrutura de retorno de escala e a orientação do modelo. Optou-se por utilizar o modelo DEA com retorno constante de escala (CRS), associado a uma abordagem orientada a *input*. A decisão de adotar a configuração CRS se fundamenta na suposição de homogeneidade, em termos de escala, entre as DMUs, uma vez que todas as DMUs pertencem à mesma organização e operam sob condições similares. Essa homogeneidade é um fator crucial, pois sugere que as DMUs podem ser comparadas diretamente entre si, sem a necessidade de ajustes para diferenças de escala. Além disso, o modelo CRS é indicado para avaliações em conjunto com o *benchmarking* interno (De Souza et al., 2018a). A orientação para *input* foi escolhida devido aos objetivos específicos da empresa. A organização está focada em otimizar o uso de seus recursos, buscando a redução de insumos enquanto mantém seus níveis de produtividade. A orientação a *input* deve ser utilizada, quando o objetivo busca minimizar a utilização dos recursos (variáveis de entrada) e manter os *outputs* (saídas) constantes (Piran, 2015).

### **3.3.6 Validação do modelo final com os especialistas**

Após o desenvolvimento do modelo final, foi realizada uma etapa de validação com os especialistas envolvidos no processo. Essa validação teve como objetivo principal assegurar que o modelo desenvolvido estivesse plenamente alinhado com

as características operacionais e necessidades da empresa, bem como verificar sua aplicabilidade prática e a adequação dos dados utilizados. Os especialistas, foram convidados a avaliar diversos aspectos do modelo. Primeiramente, foi analisada a compatibilidade do modelo com a realidade operacional do MIM, considerando as especificidades dos insumos e produtos da empresa. Outro ponto de destaque na validação foi a análise da aplicabilidade do modelo na prática cotidiana da empresa. Os especialistas avaliaram se o modelo poderia ser integrado de forma eficaz como indicador recorrente das linhas de produção. A Figura 7 apresenta o Modelo DEA utilizado na pesquisa.

Figura 7 – Modelos DEA utilizados na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

Na próxima seção, são discutidos os procedimentos de coleta de dados.

### 3.4 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi um processo cuidadosamente planejado e executado, garantindo que as informações necessárias para a aplicação do modelo DEA *Window* fossem obtidas de maneira precisa e eficiente. O planejamento da coleta de dados foi realizado em colaboração com os especialistas da empresa, que foram responsáveis pela identificação das fontes de dados e na validação do processo de extração das informações. Esses especialistas, com profundo conhecimento dos sistemas e processos internos, asseguraram que os dados necessários estivessem disponíveis e fossem extraídos corretamente.

Todos os dados foram extraídos diretamente dos sistemas de informação da empresa e exportados para planilhas eletrônicas, a coleta abrangeu os períodos de janeiro de 2020 até novembro de 2024. O Quadro 09 sintetiza os dados coletados, oferecendo uma visão geral das informações que foram utilizadas no modelo. Esta síntese inclui tanto os *inputs*, como pessoas, consumo de recursos e matéria-prima, quanto os *outputs*, como volume de produção e o custo por peça produzida.

Quadro 9 – Média dos volumes observados para os *Inputs* e *outputs* selecionados

Variável	Fórmula de cálculo	Média dos volumes observados
MOD	Soma da quantidade mensal de horas disponíveis de mão de obra direta.	60.402,57 horas
Subcontratação	Soma dos custos mensais de subcontratação de terceiros.	R\$ 1.267.626,48
GGF	Soma dos gastos gerais de fabricação.	R\$ 368.485,64
MP	Soma do consumo mensal de matéria prima em Kg.	13.899,57 Kg
Energia elétrica	Soma do consumo mensal de energia elétrica em Kwh.	20,14 Kwh/000
Gás	Soma dos custos mensais com consumo de gás.	R\$ 104.813,36
Produção	Soma da quantidade mensal de peças produzidas em unidades.	1.052.376 unidades
CPP	Volume de produção multiplicado pelo custo unitário.	R\$ 9.325.505

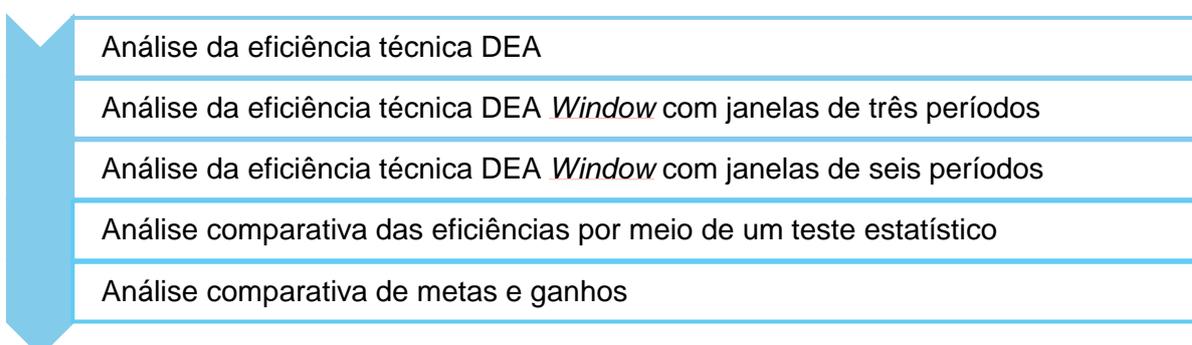
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente, os dados coletados foram inseridos em uma planilha eletrônica, onde passaram por um processo de tratamento, nesta etapa as variáveis que eram medidas em valores financeiros, (por exemplo, subcontratação, GGF, gás e CPP) foram corrigidas pelo Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) (FGV, 2024). Após o tratamento, os dados foram organizados por DMU com uma sequência numérica que iniciava com 01 e seguia-se até o último mês de análise, tomando o seguinte exemplo, janeiro de 2020 assumiu a DMU01, fevereiro de 2020 a DMU02, e assim por diante. Com esta separação foi possível a utilização precisa e ordenada dos dados no software *MaxDEA X*, onde foram realizadas três análises de eficiência. A primeira considerando o modelo DEA *Window* com janelas de três períodos, a segunda considerando o modelo DEA *Window* com janelas de seis períodos e a terceira considerando o modelo DEA.

A escolha do software *MaxDEA X* foi motivada por sua capacidade para calcular tanto o modelo *Window* quanto o modelo DEA convencional. A análise do modelo foi conduzida para avaliar a eficiência das DMUs ao longo tempo, utilizando os *inputs* e *outputs* previamente definidos na seção 3.3.4. Os resultados obtidos a partir da execução dos modelos foram extraídos do *software* e transferidos para novas planilhas eletrônicas. A Figura 8 apresenta as análises dos dados, presentes na seção de resultados.

Figura 8 – Procedimento para análise dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio da DEA foi analisada inicialmente a eficiência técnica ao longo do tempo do processo produtivo do MIM, a avaliação considerou três modelos. Para os modelos DEA *Window* foi realizada a análise da eficiência técnica média em cada uma das janelas de tempo, análise da estabilidade da eficiência do modelo, análise da eficiência média trimestral para o modelo de três períodos e da eficiência média semestral para o modelo de seis períodos.

Para avaliar comparativamente as eficiências da DEA, da DEA *Window* com janelas de três períodos e da DEA *Window* com janelas de seis períodos, foram realizados testes estatísticos através do Software *SPSS Statistics*. Inicialmente foi utilizado o teste de *Shapiro-Wilk* para avaliar a normalidade dos dados relacionado aos scores de eficiência de cada modelo, Os três modelos apresentaram *p-value* < 0,001, ou seja abaixo do nível de significância de 0,05. Como os dados não cumpriram o pressuposto de normalidade, foi realizado o teste não paramétrico de *Mann-Whitney* para avaliar a diferença das medianas entre os scores de eficiência. Por fim foi realizada a análise comparativa das metas e ganhos para os *inputs* de cada um dos três modelos. Nesta análise foi possível identificar a diferença entre o que é utilizado no processo produtivo e o que pode ser otimizado nas DMUs.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação dos modelos DEA e DEA *Window*, os quais foram desenvolvidos para avaliar a eficiência técnica do processo de *Metal Injection Molding* em uma empresa do setor metalmeccânico ao longo do tempo, conforme delineado nas etapas metodológicas apresentadas no capítulo anterior. Os resultados englobam a avaliação das eficiências técnicas para os três modelos, a análise comparativa das eficiências e a análise comparativa das metas e ganhos decorrentes da implementação dos modelos. Para a realização dessa avaliação, foram consideradas 59 DMUs para o modelo DEA convencional, 171 DMUs para o modelo DEA *Window* com janelas de três períodos e 324 DMUs para o modelo DEA *Window* com janelas de seis períodos, abrangendo o período de janeiro de 2020 a novembro de 2024. Esses dados proporcionam uma visão do desempenho do processo, possibilitando a identificação de tendências e oportunidades para a melhoria contínua da eficiência.

### 4.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DEA

Os resultados da eficiência técnica mensal de cada DMU, calculados utilizando o *software MaxDEA X*, encontram-se organizados cronologicamente na Tabela 1. Vale ressaltar que, conforme observado na tabela, valores de eficiência técnica próximos a 100% correspondem a um desempenho superior da DMU no período avaliado.

Tabela 1 – Eficiência técnica por DMU

DMU	Período	Eficiência Técnica	DMU	Período	Eficiência Técnica
DMU01	jan/20	68,45%	DMU31	jul/22	77,95%
DMU02	fev/20	58,30%	DMU32	ago/22	68,46%
DMU03	mar/20	57,47%	DMU33	set/22	65,24%
DMU04	abr/20	<b>55,27%</b>	DMU34	out/22	74,13%
DMU05	mai/20	<b>55,75%</b>	DMU35	nov/22	72,22%
DMU06	jun/20	59,02%	DMU36	dez/22	99,47%
DMU07	jul/20	57,23%	DMU37	jan/23	<b>100,00%</b>
DMU08	ago/20	58,89%	DMU38	fev/23	75,41%
DMU09	set/20	59,06%	DMU39	mar/23	73,31%
DMU10	out/20	<b>55,03%</b>	DMU40	abr/23	62,33%
DMU11	nov/20	68,74%	DMU41	mai/23	69,05%
DMU12	dez/20	92,16%	DMU42	jun/23	61,45%
DMU13	jan/21	98,28%	DMU43	jul/23	63,21%
DMU14	fev/21	59,91%	DMU44	ago/23	82,57%
DMU15	mar/21	62,47%	DMU45	set/23	73,21%
DMU16	abr/21	59,46%	DMU46	out/23	79,94%
DMU17	mai/21	<b>100,00%</b>	DMU47	nov/23	86,96%
DMU18	jun/21	58,28%	DMU48	dez/23	98,52%
DMU19	jul/21	71,61%	DMU49	jan/24	<b>100,00%</b>
DMU20	ago/21	59,15%	DMU50	fev/24	93,80%
DMU21	set/21	73,21%	DMU51	mar/24	84,14%
DMU22	out/21	67,15%	DMU52	abr/24	76,27%
DMU23	nov/21	90,06%	DMU53	mai/24	<b>100,00%</b>
DMU24	dez/21	<b>100,00%</b>	DMU54	jun/24	75,31%
DMU25	jan/22	70,63%	DMU55	jul/24	68,32%
DMU26	fev/22	79,92%	DMU56	ago/24	<b>100,00%</b>
DMU27	mar/22	<b>100,00%</b>	DMU57	set/24	81,06%
DMU28	abr/22	67,62%	DMU58	out/24	91,64%
DMU29	mai/22	89,30%	DMU59	nov/24	99,05%
DMU30	jun/22	74,22%	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos meses incluídos na análise, sete DMUs alcançaram a eficiência máxima (100% de eficiência), representando 11,86% do total. Observou-se as menores eficiências nos meses de outubro de 2020 (55,03%), abril de 2020 (55,27%) e maio de 2020 (55,75%), todas as DMUs de menor eficiência foram identificadas no ano de 2020. Para uma melhor compreensão da evolução da eficiência do setor ao longo do

período analisado e para viabilizar análises anuais subsequentes, foi calculada a eficiência anual do processo do MIM, conforme apresentado na Tabela 2.

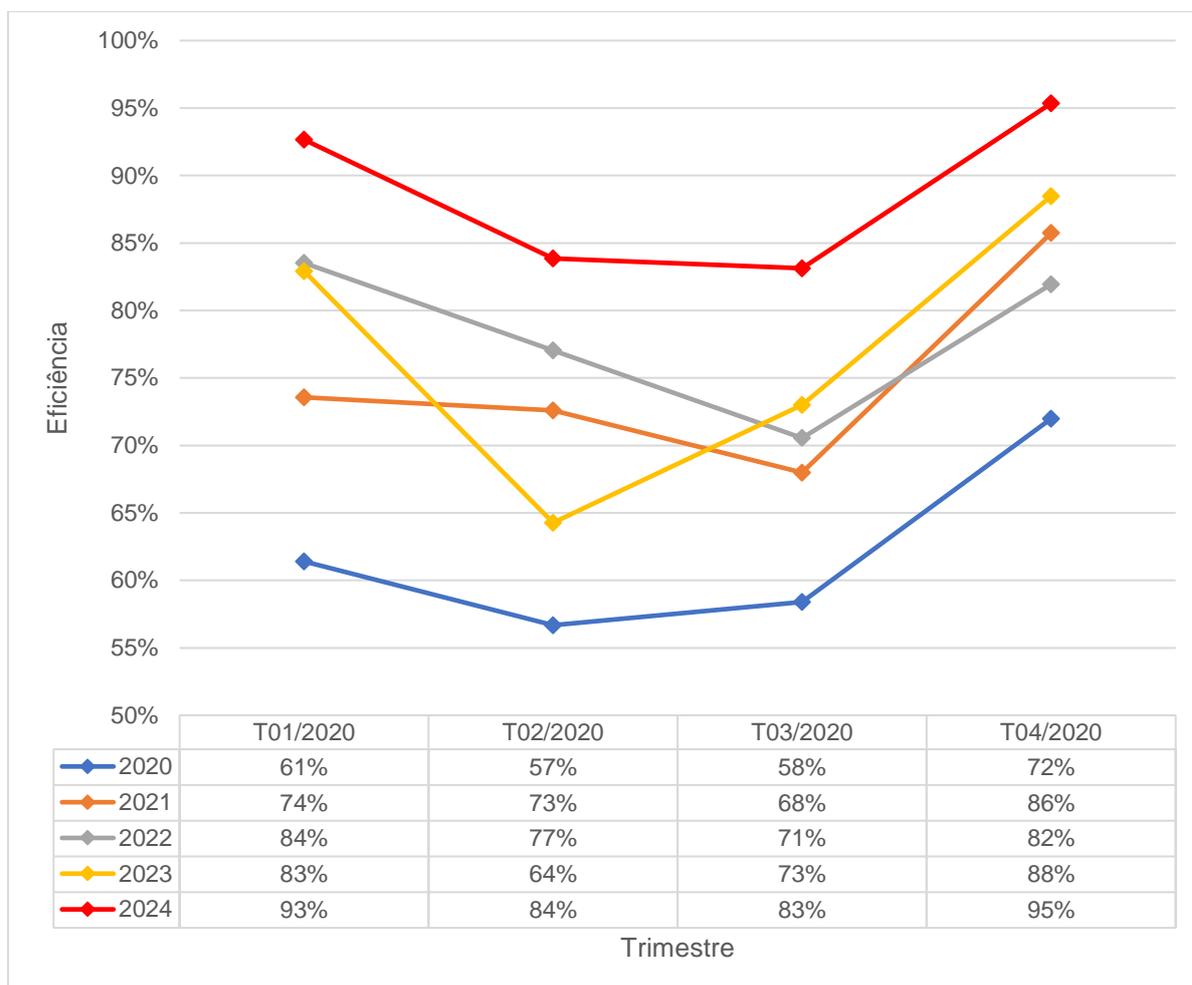
Tabela 2 – Eficiência média anual

<b>Ano</b>	<b>Média Anual</b>
2020	62,11%
2021	74,96%
2022	78,26%
2023	77,16%
2024	88,14%
<b>Média</b>	<b>76,12%</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>9,32%</b>
<b>Mediana</b>	<b>77,16%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da média anual apresentada, ajuda a identificar os fatores internos e externos que influenciaram a variação dos níveis de eficiência, como o aumento da eficiência observado entre 2020 e 2022, a redução em 2023 e a recuperação em 2024. A média geral dos anos analisados foi de 76,12%, com uma mediana de 77,16% e um desvio padrão de 9,32%. Para uma análise mais detalhada, as DMUs foram agrupadas por trimestre. O Gráfico 1 apresenta, de forma trimestral, os índices de eficiência do MIM.

Gráfico 1 – Eficiência média trimestral



Fonte: Elaborado pelo autor.

A eficiência trimestral calculada pela DEA apresenta uma certa regularidade nos dados, onde todos os dados de T02 apresentam uma redução de eficiência com relação a T01. Já T04 apresenta a maior eficiência do ano, exceto no ano de 2022, onde T01 apresentou maior eficiência. Além disso, todos os anos apresentaram maior eficiência nos primeiros e últimos trimestres, se comparados com os trimestres T02 e T03.

## 4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DEA WINDOW COM JANELAS DE TRÊS PERÍODOS

A análise da DEA *Window* com janelas de três períodos considera o processo produtivo do MIM para obter os scores de eficiência listados nas linhas que constituem a janela, enquanto as linhas destacadas em verde indicam a duração da janela e os períodos cobertos. Por exemplo, a janela 01 se estende do período 01 (jan/2020) ao período 03 (mar/2020) para uma janela de três períodos e que é exibida na primeira linha. A próxima linha começa no período 02 (fev/2020) e se estende até a o período 04 (abr/2020), o que representa outra janela, e assim por diante. Isso resulta em 57 janelas para o período de análise (janeiro de 2020 a novembro de 2024). Com relação ao número de DMUs, há 171 pontos de dados diferentes aos quais o modelo DEA é aplicado para obter as pontuações de eficiência técnica. Além disso, o modelo apresenta a eficiência para cada um dos períodos, a eficiência técnica média por janela, a eficiência técnica média por período e pôr fim a eficiência média do modelo. A Tabela 3 ilustra o modelo DEA *Window* com janelas de três períodos.



A DEA *Window* com janelas de três períodos apresentou uma maior eficiência se comparada com a DEA convencional. Das 57 janelas, 44 apresentaram 100% de eficiência técnica média, isso representa 77,19% de todas as janelas. As menores eficiências técnicas médias foram identificadas respectivamente nas janelas 16 (abr/2021 a jun/2021) com 74,80%, janela 15 (mar/2021 a mai/2021) com 77,84% e janela 17 (mai/2021 a jul/2021) com 81,61%. Se tomar como exemplo a janela 17, o mesmo nível de produção poderia ser produzido com 81,57% dos recursos, se esta linha estivesse operando na fronteira. Também é possível interpretar que 18,43% dos recursos gerais poderiam ser economizados com o aumento do desempenho desta janela para o nível mais alto.

Nas colunas do modelo, utilizadas na DEA *Window* para avaliar a estabilidade dos períodos analisados através do cálculo do coeficiente de variação dos dados (Al-Refaie; Najdawi; Sy, 2016). Alguns períodos apresentam um coeficiente maior do que 5%, indicando uma instabilidade de eficiência no modelo. Conforme apresentado na tabela 4, estabilidade da eficiência por período.

Tabela 4 – Estabilidade da eficiência do modelo de três períodos

Período	Mês	Eficiência Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
01	jan/20	1,0000	-	-
02	fev/20	1,0000	0,0000	0,00%
03	mar/20	1,0000	0,0000	0,00%
04	abr/20	0,9916	0,0146	1,47%
05	mai/20	1,0000	0,0000	0,00%
06	jun/20	1,0000	0,0000	0,00%
07	jul/20	1,0000	0,0000	0,00%
08	ago/20	1,0000	0,0000	0,00%
09	set/20	1,0000	0,0000	0,00%
10	out/20	1,0000	0,0000	0,00%
11	nov/20	1,0000	0,0000	0,00%
12	dez/20	1,0000	0,0000	0,00%
13	jan/21	1,0000	0,0000	0,00%
14	fev/21	1,0000	0,0000	0,00%
15	mar/21	0,9022	0,1694	<b>18,78%</b>
16	abr/21	0,7524	0,2144	<b>28,49%</b>
17	mai/21	1,0000	0,0000	0,00%

Período	Mês	Eficiência Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
18	jun/21	0,7436	0,2221	<b>29,87%</b>
19	jul/21	0,9444	0,0964	<b>10,20%</b>
20	ago/21	0,9880	0,0104	1,05%
21	set/21	1,0000	0,0000	0,00%
22	out/21	0,9591	0,0355	3,70%
23	nov/21	1,0000	0,0000	0,00%
24	dez/21	1,0000	0,0000	0,00%
25	jan/22	1,0000	0,0000	0,00%
26	fev/22	1,0000	0,0000	0,00%
27	mar/22	1,0000	0,0000	0,00%
28	abr/22	0,9529	0,0442	4,64%
29	mai/22	1,0000	0,0000	0,00%
30	jun/22	1,0000	0,0000	0,00%
31	jul/22	1,0000	0,0000	0,00%
32	ago/22	1,0000	0,0000	0,00%
33	set/22	1,0000	0,0000	0,00%
34	out/22	1,0000	0,0000	0,00%
35	nov/22	1,0000	0,0000	0,00%
36	dez/22	1,0000	0,0000	0,00%
37	jan/23	1,0000	0,0000	0,00%
38	fev/23	1,0000	0,0000	0,00%
39	mar/23	1,0000	0,0000	0,00%
40	abr/23	1,0000	0,0000	0,00%
41	mai/23	1,0000	0,0000	0,00%
42	jun/23	1,0000	0,0000	0,00%
43	jul/23	1,0000	0,0000	0,00%
44	ago/23	1,0000	0,0000	0,00%
45	set/23	1,0000	0,0000	0,00%
46	out/23	1,0000	0,0000	0,00%
47	nov/23	1,0000	0,0000	0,00%
48	dez/23	1,0000	0,0000	0,00%
49	jan/24	1,0000	0,0000	0,00%
50	fev/24	1,0000	0,0000	0,00%
51	mar/24	1,0000	0,0000	0,00%
52	abr/24	0,9628	0,0454	4,71%
53	mai/24	1,0000	0,0000	0,00%
54	jun/24	1,0000	0,0000	0,00%
55	jul/24	1,0000	0,0000	0,00%
56	ago/24	1,0000	0,0000	0,00%
57	set/24	1,0000	0,0000	0,00%
58	out/24	1,0000	0,0000	0,00%

Período	Mês	Eficiência Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
59	nov/24	1,00000	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da avaliação da eficiência média, do desvio padrão e do coeficiente de variação dos períodos é possível identificar sua estabilidade de eficiência, onde coeficientes de variação maior do que 5% indicam uma maior variabilidade da eficiência para aquele período. Quatro colunas apresentaram um coeficiente de variação alto, sendo elas os períodos 18 (jun/2021), 16 (abr/2021), 15 (mar/2021) e 19 (jul/2021), com um coeficiente de variação de respectivamente 29,87%, 28,49%, 18,78% e 10,20%. Buscando um melhor entendimento da eficiência ao longo do tempo, o modelo de janelas foi separado trimestralmente, contendo desde o primeiro trimestre de 2020 até o terceiro trimestre de 2024. O Gráfico 2 apresenta os dados relativos à análise da eficiência trimestral do DEA *Window* de três períodos.

Gráfico 2 – Eficiência média trimestral para janelas de três períodos



Fonte: Elaborado pelo autor

A eficiência trimestral calculada a partir da DEA *Window* com janelas de três períodos, apresenta somente um trimestre com eficiência abaixo de 95%, o segundo trimestre de 2024. Todos os outros são considerados altamente eficientes para o modelo proposto. A análise sugere que o melhor não apresentou boa capacidade de discriminação dos escores de eficiência.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DEA WINDOW COM JANELAS DE SEIS PERÍODOS

A análise da DEA *Window* com janelas de seis períodos considera o processo produtivo do MIM para obter os scores de eficiência listados nas linhas que constituem a janela, enquanto as linhas destacadas em verde indicam a duração da janela e os períodos cobertos. Por exemplo, a janela 01 se estende do período 01 (jan/2020) ao período 06 (jun/2020) para uma janela de seis períodos e que é exibida na primeira linha. A próxima linha começa no período 02 (fev/2020) e se estende até a o período 07 (jul/2020), o que representa outra janela, e assim por diante. Isso resulta em 54 janelas para o período de análise (janeiro de 2020 a novembro de 2024). Com relação ao número de DMUs, há 324 pontos de dados diferentes aos quais o modelo DEA é aplicado para obter as pontuações de eficiência técnica. Assim como o modelo DEA *Window* de três períodos, este apresenta a eficiência para cada um dos períodos, a eficiência técnica média por janela, a eficiência técnica média por período e pôr fim a eficiência média do modelo. A Tabela 5 ilustra o modelo DEA *Window* com janelas de seis períodos.



Este modelo apresentou, em termos gerais melhor desempenho da eficiência se comparada com a DEA convencional e um menor desempenho da eficiência se comparado com a DEA *Window* com janelas de três períodos. Das 54 janelas, 18 apresentaram 100% de eficiência técnica média, isso representa 1/3 de todas as janelas. As menores eficiências técnicas médias foram identificadas respectivamente nas janelas 16 (abr/2021 a set/2021) com 76,40%, janela 14 (fev/2021 a jul/2021) com 74,80% e janela 15 (mar/2021 a ago/2021) com 73,87%. Já a avaliação de estabilidade da eficiência por período é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Estabilidade da eficiência do modelo de seis períodos

Período	Mês	Eficiência Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
01	jan/20	1,0000	-	-
02	fev/20	1,0000	0,0000	0,00%
03	mar/20	0,9852	0,0113	1,14%
04	abr/20	0,9526	0,0032	0,34%
05	mai/20	1,0000	0,0000	0,00%
06	jun/20	1,0000	0,0000	0,00%
07	jul/20	1,0000	0,0000	0,00%
08	ago/20	1,0000	0,0000	0,00%
09	set/20	1,0000	0,0000	0,00%
10	out/20	0,9966	0,0053	0,53%
11	nov/20	1,0000	0,0000	0,00%
12	dez/20	1,0000	0,0000	0,00%
13	jan/21	1,0000	0,0000	0,00%
14	fev/21	0,8522	0,1619	<b>18,99%</b>
15	mar/21	0,8044	0,1515	<b>18,84%</b>
16	abr/21	0,6863	0,1538	<b>22,41%</b>
17	mai/21	1,0000	0,0000	0,00%
18	jun/21	0,6791	0,1572	<b>23,15%</b>
19	jul/21	0,8887	0,0862	<b>9,70%</b>
20	ago/21	0,8137	0,1808	<b>22,22%</b>
21	set/21	0,9426	0,0657	<b>6,97%</b>
22	out/21	0,9074	0,0690	<b>7,60%</b>
23	nov/21	1,0000	0,0000	0,00%
24	dez/21	1,0000	0,0000	0,00%
25	jan/22	1,0000	0,0000	0,00%
26	fev/22	1,0000	0,0000	0,00%
27	mar/22	1,0000	0,0000	0,00%
28	abr/22	0,9203	0,0423	4,60%

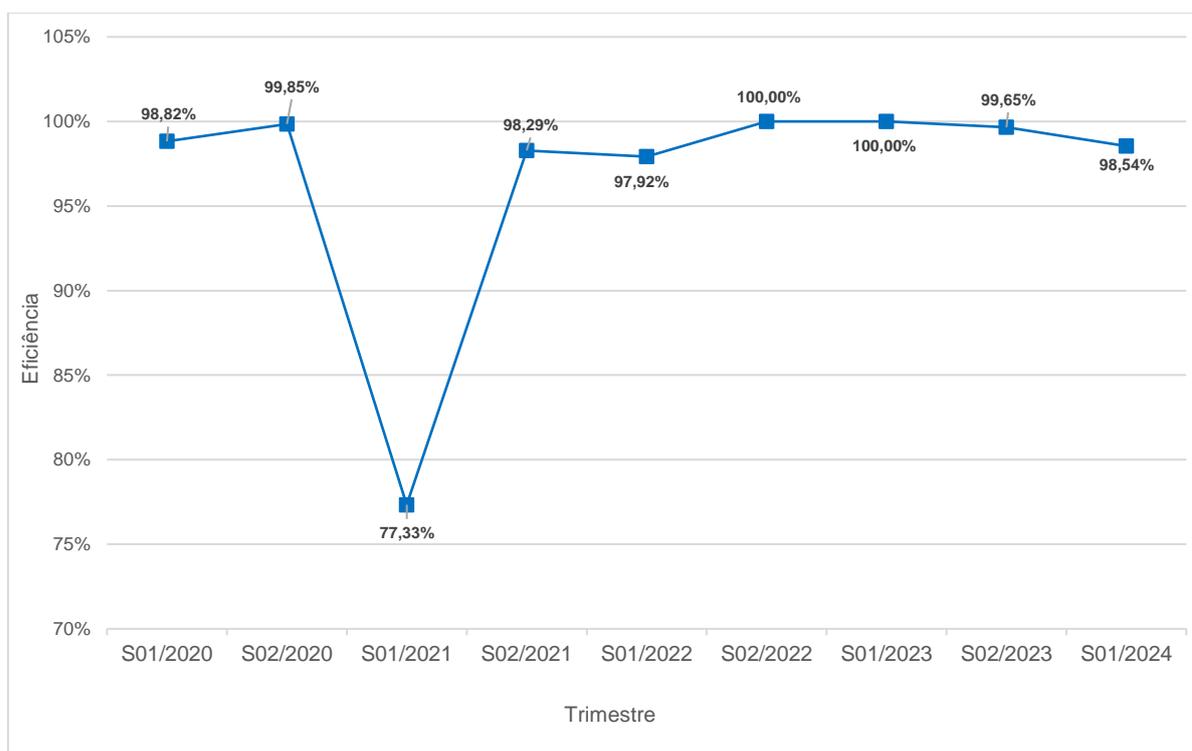
<b>Período</b>	<b>Mês</b>	<b>Eficiência Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação</b>
29	mai/22	0,9872	0,0141	1,43%
30	jun/22	0,9949	0,0124	1,25%
31	jul/22	0,9992	0,0020	0,20%
32	ago/22	1,0000	0,0000	0,00%
33	set/22	1,0000	0,0000	0,00%
34	out/22	1,0000	0,0000	0,00%
35	nov/22	1,0000	0,0000	0,00%
36	dez/22	1,0000	0,0000	0,00%
37	jan/23	1,0000	0,0000	0,00%
38	fev/23	1,0000	0,0000	0,00%
39	mar/23	1,0000	0,0000	0,00%
40	abr/23	0,9778	0,0344	3,52%
41	mai/23	1,0000	0,0000	0,00%
42	jun/23	1,0000	0,0000	0,00%
43	jul/23	0,9877	0,0109	1,10%
44	ago/23	1,0000	0,0000	0,00%
45	set/23	1,0000	0,0000	0,00%
46	out/23	1,0000	0,0000	0,00%
47	nov/23	1,0000	0,0000	0,00%
48	dez/23	1,0000	0,0000	0,00%
49	jan/24	1,0000	0,0000	0,00%
50	fev/24	1,0000	0,0000	0,00%
51	mar/24	1,0000	0,0000	0,00%
52	abr/24	0,9302	0,0297	3,19%
53	mai/24	1,0000	0,0000	0,00%
54	jun/24	1,0000	0,0000	0,00%
55	jul/24	1,0000	0,0000	0,00%
56	ago/24	1,0000	0,0000	0,00%
57	set/24	0,9870	0,0150	1,52%
58	out/24	1,0000	0,0000	0,00%
59	nov/24	1,0000	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o modelo de seis períodos, oito colunas apresentaram um coeficiente de variação alto, sendo eles os períodos 18 (jun/2021), 16 (abr/2021), 20 (ago/2021), 14 (fev/2021), 15 (mar/2021) 19 (jul/2021), 22 (out/2021) e 21 (set/2021) com um coeficiente de variação de respectivamente 23,15%, 22,41%, 22,22%, 18,99%, 18,84%, 9,70%, 7,60% e 6,97%. Após a análise dos coeficientes de variação, buscando compreender o comportamento semestral do modelo. Os dados foram

agrupados contendo desde o primeiro semestre de 2020 até o primeiro semestre de 2024. O Gráfico 3 apresenta os dados relativos à análise da eficiência semestral da DEA *Window* com janelas de seis períodos.

Gráfico 3 – Eficiência média semestral para janelas de seis períodos



Fonte: Elaborado pelo autor

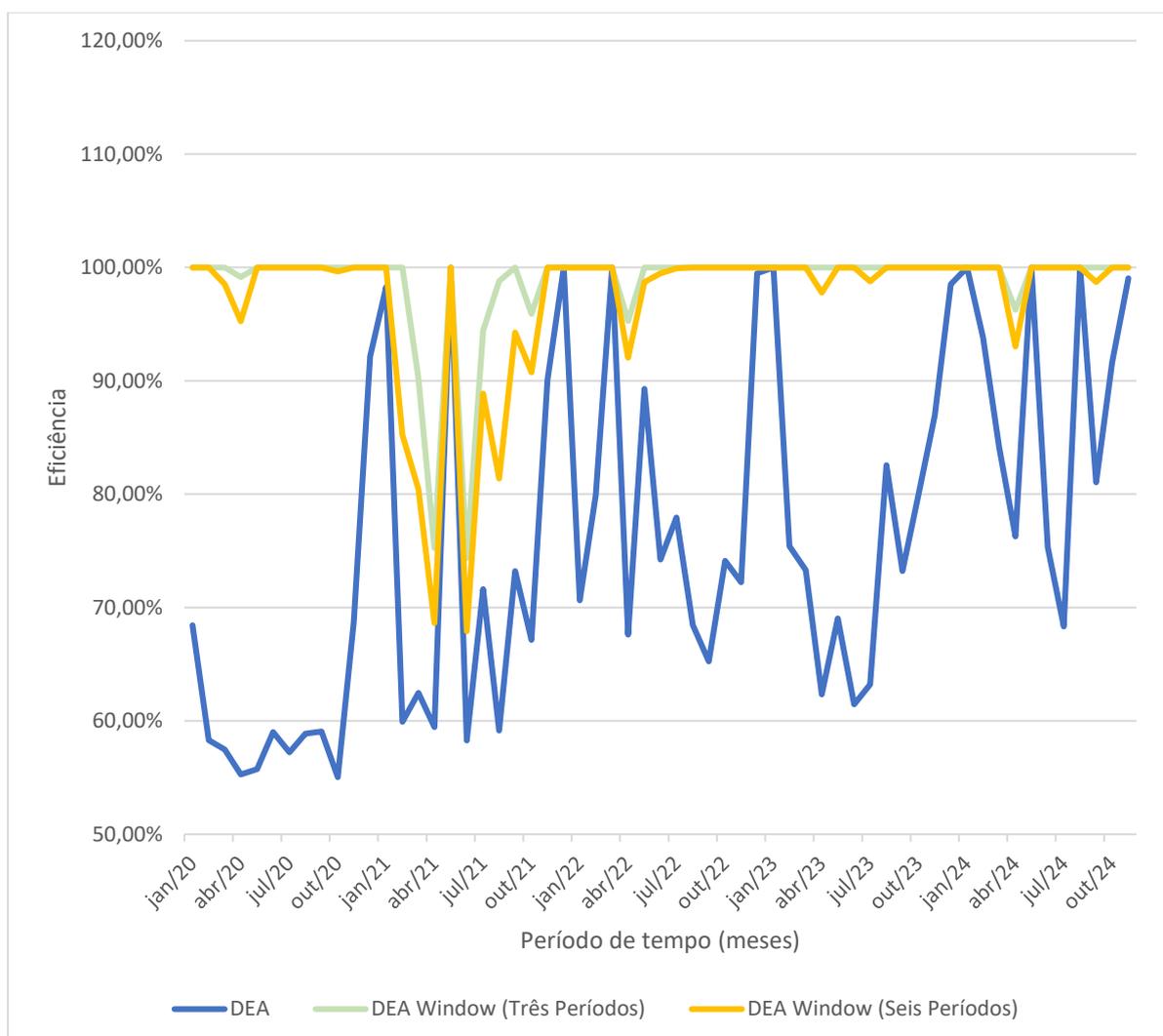
Assim como na avaliação da DEA *Window* com janelas de três períodos, novamente a avaliação agrupada apresenta somente um intervalo com eficiência abaixo de 95%, o primeiro semestre de 2021. Todos os outros são considerados altamente eficientes para o modelo proposto.

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS EFICIÊNCIAS

A compreensão do impacto da eficiência técnica na produtividade é essencial para uma melhor tomada de decisão para os gestores. Embora outros fatores, não capturadas nesta avaliação, também possam afetar a eficiência, procurou-se identificar as diferenças dos níveis de eficiência do sistema produtivo através da

comparação entre a DEA, a DEA *Window* com janelas de três períodos e a DEA *Window* com janelas de seis períodos. O Gráfico 4 apresenta a comparação entre os três modelos.

Gráfico 4 – Comparação das eficiências



Fonte: Elaborado pelo autor

Os modelos DEA, DEA *Window* com janelas de três períodos e DEA *Window* com janelas de seis períodos apresentaram respectivamente as seguintes médias dos scores de eficiência técnica, 75,93%, 98,64% e 97,11%. A estabilidade da eficiência dos modelos DEA *Window* representam uma limitação na utilização da técnica em conjunto com o benchmarking interno. Para investigar possíveis indícios dos efeitos da utilização de cada modelo na eficiência técnica, foram formuladas seis

hipóteses específicas, as quais foram posteriormente testadas utilizando o teste de Mann-Whitney, sendo elas:

**H0a:** Não existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA e a DEA *Window* com janelas de três períodos.

**H1a:** Existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA e a DEA *Window* com janelas de três períodos.

**H0b:** Não existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA e a DEA *Window* com janelas de seis períodos.

**H1b:** Existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA e a DEA *Window* com janelas de seis períodos.

**H0c:** Não existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA *Window* com janelas de três períodos e a DEA *Window* com janelas de seis períodos.

**H1c:** Existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA *Window* com janelas de três períodos e a DEA *Window* com janelas de seis períodos.

Nas hipóteses H0 e H1 as terminações a, b e c referem-se respectivamente aos modelos DEA, DEA *Window* com janelas de três períodos e DEA *Window* com janelas de seis períodos. 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 (Fay; Proschan, 2010). A Tabela 7 apresenta a matriz de resultados do teste Mann-Whitney e o modelo abordado.

Tabela 7 – Matriz do teste de Mann-Whitney

	DEA	DEA W. (Três Períodos)	DEA W. (Seis Períodos)
DEA	-	-	-
DEA W. (Três Períodos)	<0,001	-	-
DEA W. (Seis Períodos)	<0,001	0,1694	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 8 apresenta uma comparação das medianas e o resultado do teste de hipóteses.

Tabela 8 – Resultado do teste de hipótese

Descrição	Análise Comparativa 1	Análise Comparativa 2	Análise Comparativa 3
DEA	0,7321	0,7321	-
DEA W. (Três Períodos)	1	-	1
DEA W. (Seis Períodos)	-	1	1
Diferença das medianas	0,2679	0,2679	0
WM (p-value)	<0,001	<0,001	0,1694
Teste de hipótese	Rejeita H0a <b>Não Rejeita H1a</b>	Rejeita H0b <b>Não Rejeita H1b</b>	<b>Não Rejeita H0c</b> Rejeita H1c

Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença entre as medianas da DEA *Window* com janelas e três períodos e a da DEA *Window* com janelas de seis períodos (Análise Comparativa 3) é 0, ou seja, as medianas são iguais. Neste contexto, a conclusão é de que a hipótese nula (H0c) não pode ser rejeitada. Assim, não existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas utilizando a DEA *Window* com janelas de três períodos e a DEA *Window* com janelas de seis períodos.

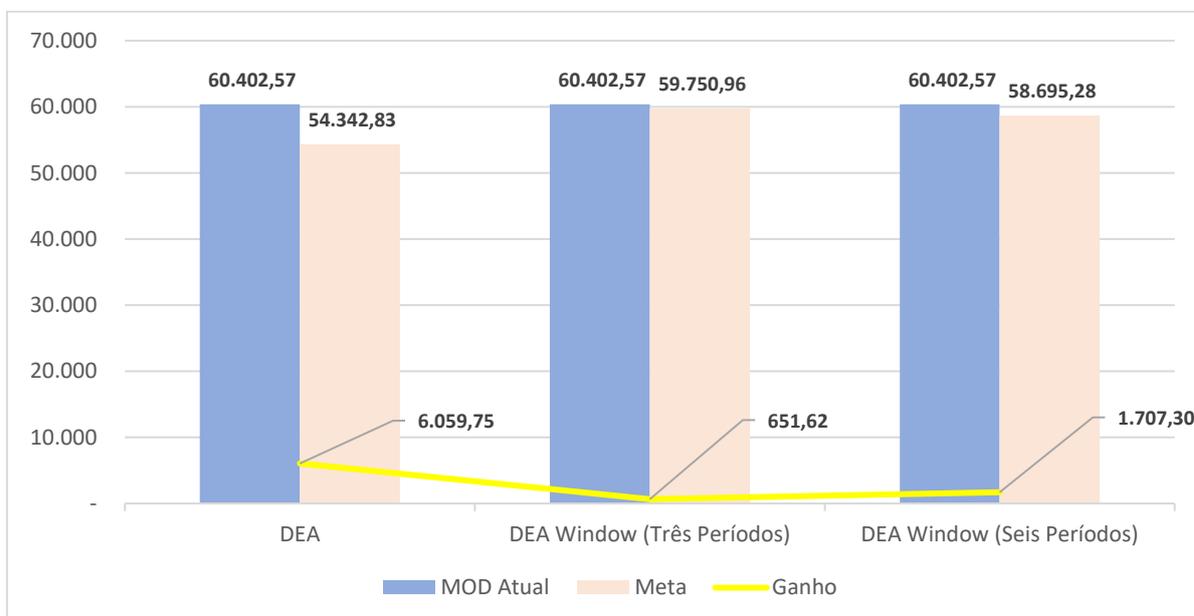
Para as análises comparativas 1 e 2, a diferença entre os dois modelos é de 26,79%, indicando que as hipóteses nulas (H1a) e (H1b) não podem ser rejeitadas. Neste contexto, existem evidências da diferença entre as eficiências técnicas, para as duas análises comparativas. Em resumo a análise mostra que existe diferença entre as medianas de eficiência clássica DEA e a eficiência obtida por meio das janelas. No entanto, não existe diferença das medianas das janelas com distintos períodos (3 e 6).

#### 4.5 ANÁLISE COMPARATIVA DE METAS E GANHOS

A análise das metas e ganhos permite identificar os valores que cada variável do modelo deve buscar, para que a DMU ineficiente alcance sua eficiência máxima (Piran; Lacerda; Camargo, 2018). Com estes parâmetros é possível entender qual a quantidade de insumos ou recursos que precisam ser reduzidos ou ampliados, buscando o aumento da eficiência. Como nesta pesquisa o modelo foi orientado a *input*, as metas representam os valores de referência para que cada *input* contribua para o alcance da eficiência máxima do modelo, enquanto os ganhos representam a diferença entre os valores reais dos *inputs* e suas respectivas metas. Os gráficos

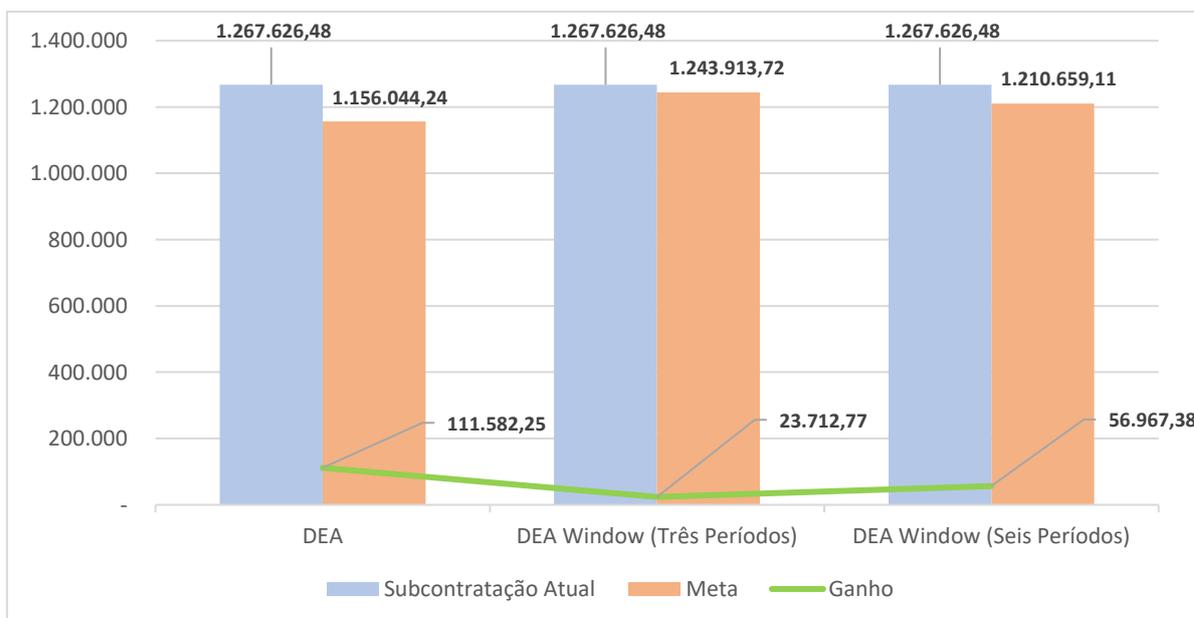
apresentam os valores médios atuais, as metas e os ganhos dos *inputs* para cada um dos três modelos avaliados.

Gráfico 5 – Análise comparativa das metas e ganhos da MOD (horas)



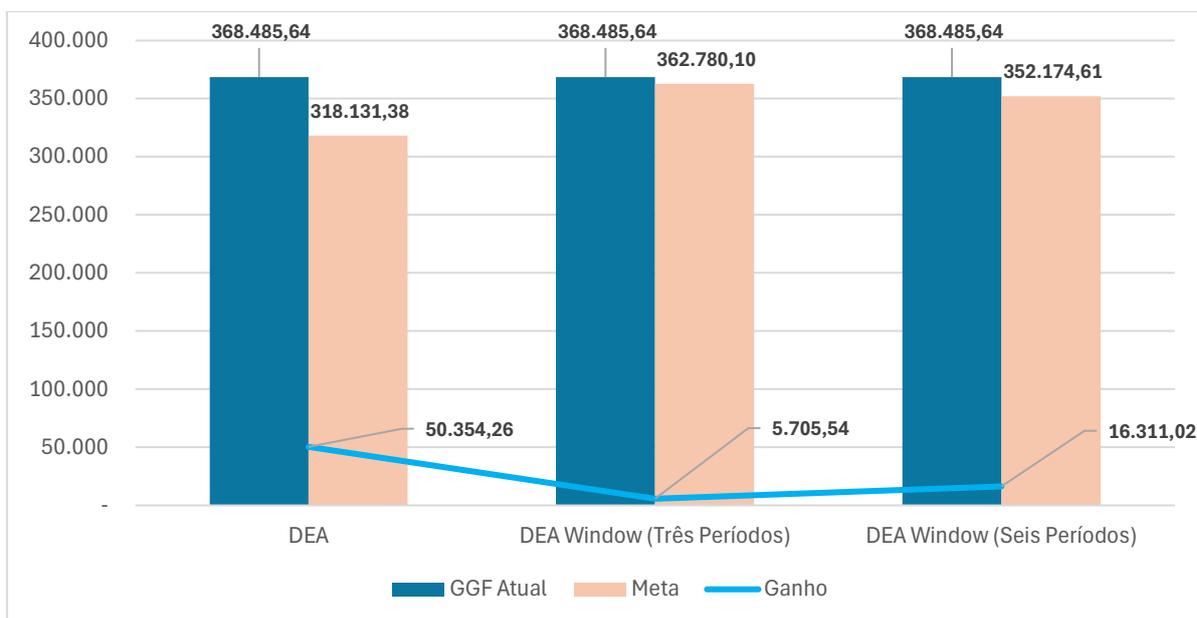
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 – Análise comparativa das metas e ganhos da Subcontratação (R\$)



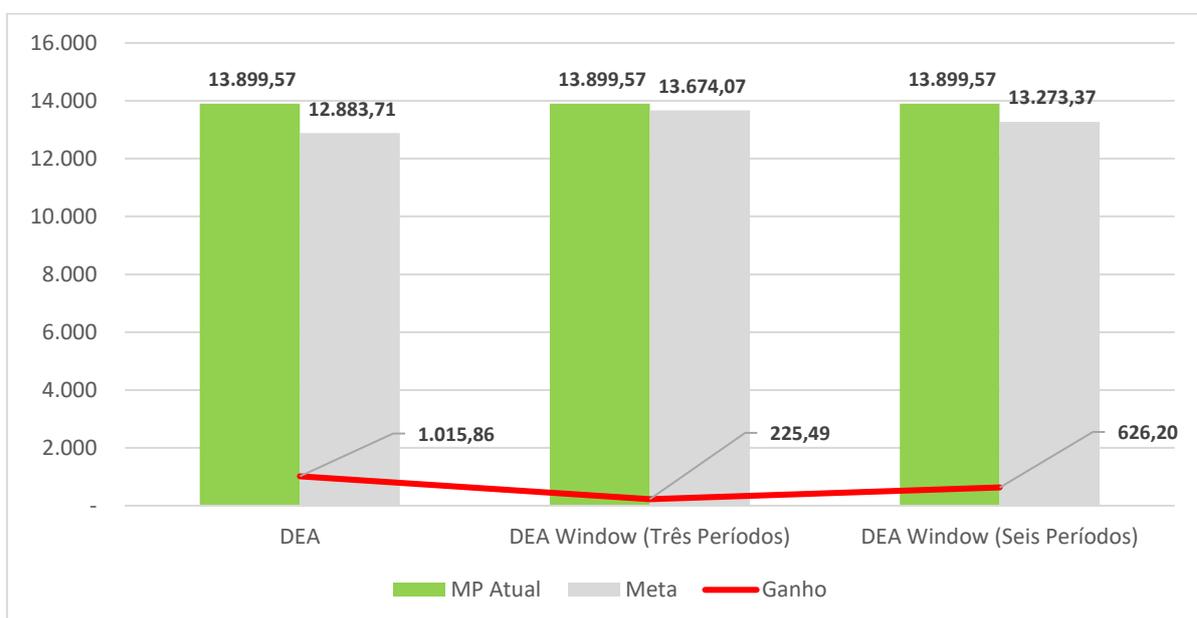
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 – Análise comparativa das metas e ganhos do GGF (R\$)



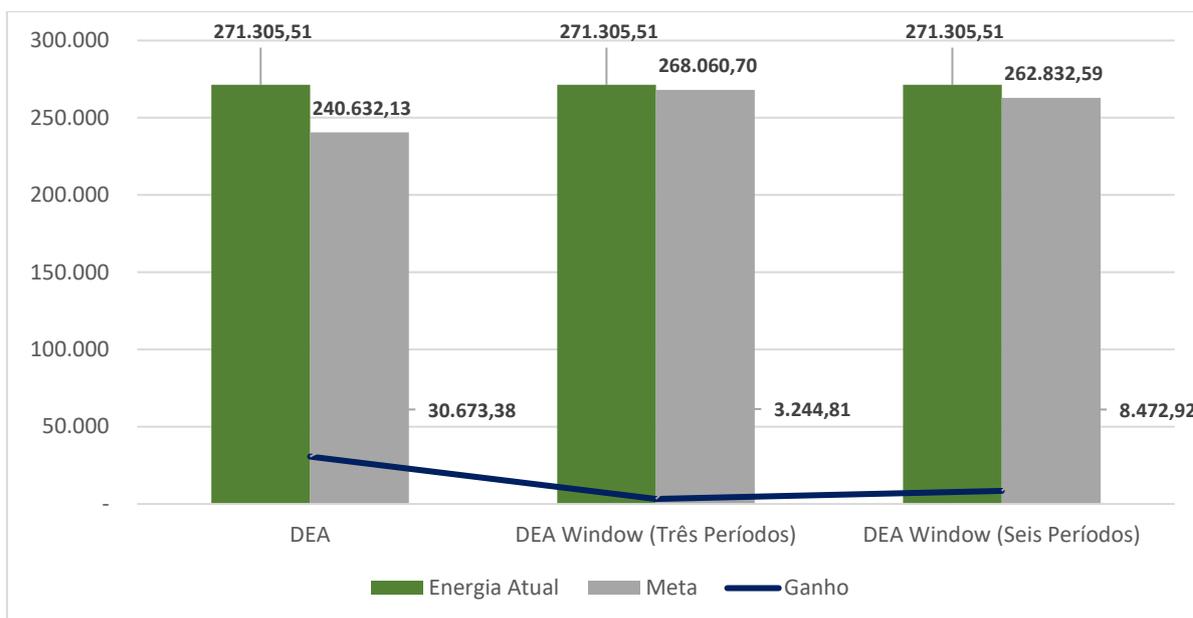
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Análise comparativa das metas e ganhos da MP (Kg)



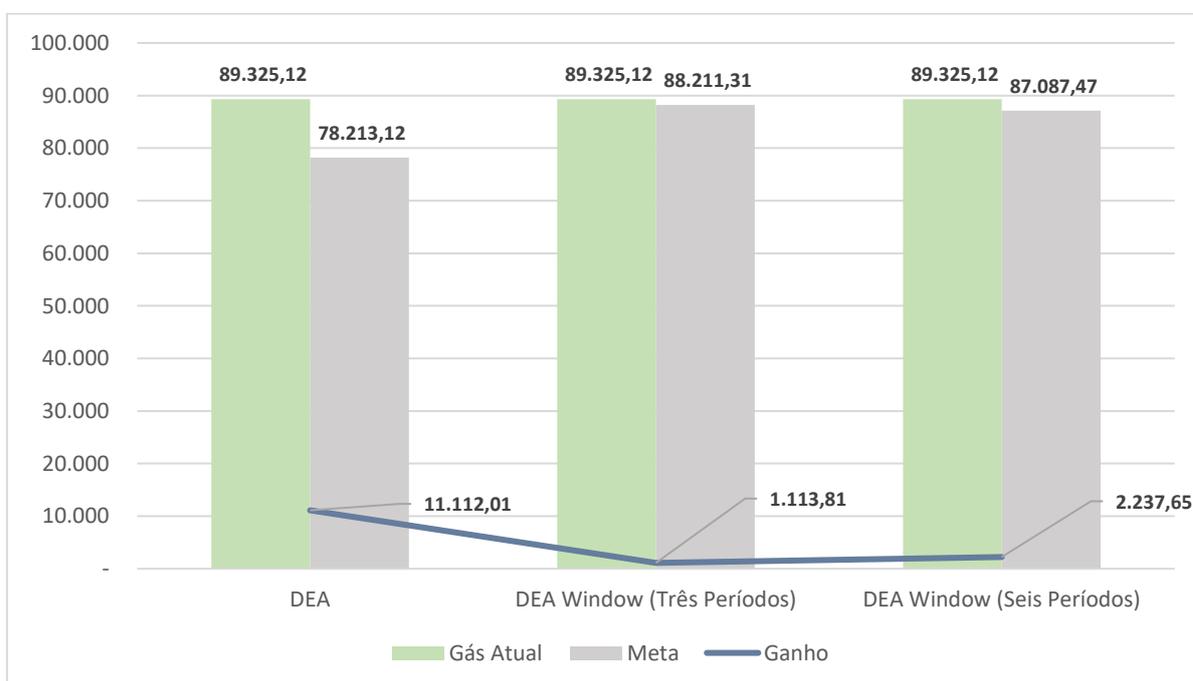
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 9 – Análise comparativa das metas e ganhos da Energia (Kwh)



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 10 – Análise comparativa das metas e ganhos do Gás (R\$)



Fonte: Elaborado pelo autor

A DEA *Window* com janelas de três períodos apresentou a maior eficiência técnica entre os três modelos, o que se confirma pelo menor alvo para todos os seis

*inputs* avaliados. Já a DEA convencional apresentou ganhos quase dez vezes maiores do que a DEA *Window* com janelas de três períodos em alguns *inputs*, como por exemplo a MOD, e o Gás. O que reforça a ideia de distorção da eficiência da DEA *Window* quando utilizada em conjunto com o benchmarking interno.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta pesquisa contribui para o avanço dos estudos sobre a avaliação da eficiência ao longo do tempo, com a aplicação da DEA *Window* em conjunto com o *benchmarking* interno. Buscando avaliar a eficiência da área de *Metal Injection Molding* de uma empresa metalmecânica. Para Mergoni, Emrouznejad e De Witte (2024), grande parte das pesquisas abordam a DEA de forma transversal, avaliando determinado ponto no tempo. Existe então a necessidade de um maior volume de pesquisas com dados em painel, que permitam a avaliação da eficiência ao longo do tempo.

Outra contribuição desta pesquisa é a comparação entre os *scores* de eficiência técnica da DEA *Window* com modelos de múltiplas janelas. Pois não existe na literatura um consenso sobre o tamanho ideal para as janelas da DEA *Window*. Muhammad, Rao e Farooq (2018), afirmam que a definição do tamanho ideal da janela em estudos da DEA *Window* varia de acordo com o objeto e o objetivo do estudo. Nesta pesquisa foi identificado que quanto maior o tamanho da janela menor é a estabilidade do *score* de eficiência para os períodos, ou seja, a utilização de janelas longas pode prejudicar a aplicação do modelo como um indicador recorrente. Tomamos como exemplo a Tabela 5, DEA *Window* com janelas de seis períodos, neste modelo o período 18 (jun/2021) apresentou uma eficiência de 61% na janela 13, porém na janela 18 o mesmo período subiu sua eficiência para 100%, ou seja, o período atingiu a eficiência máxima do modelo. Essa variabilidade dificulta a utilização do modelo como um indicador recorrente. Já no modelo DEA *Window* com janelas de três períodos é possível identificar que a estabilidade dos períodos é maior se comparado com o modelo de seis períodos.

Até o presente momento da publicação desta pesquisa, não foram identificados estudos que discutissem a utilização da DEA *Window* em conjunto com o *benchmarking* interno, para avaliar a eficiência de sistemas produtivos em formato de painel. Para De Souza *et al.* (2018a) o *benchmarking* interno permite uma visão real e abrangente do desempenho do negócio em termos de eficiência, por exemplo, ao longo do tempo, quando utilizado em conjunto com a DEA. Diferente do que foi apresentado por De Souza, este estudo identificou que o mesmo não ocorre quando

o *benchmarking* interno é aplicado em conjunto com a *DEA Window*. Neste caso, o modelo tende a apresentar problemas de discriminação.

A literatura existente, em sua maioria, realizaram a aplicação da *DEA Window* em conjunto com o *benchmarking* externo. Alkhars, Alnasser e Alfaraj (2022), afirmam que a *DEA Window* melhora a discriminação dos dados, se comparada com a *DEA* convencional. Para Chung et al. (2008), Kim, He e Kwon (2023), isso ocorre pois, normalmente na *DEA* convencional onde é utilizado o *benchmarking* externo, a DMU é a própria empresa. Já na *DEA Window* esta mesma DMU é dividida em unidades de tempo, aumentando o número de DMUs para o modelo e conseqüentemente melhorando o problema de discriminação para modelos com baixo volume de DMUs.

Esta pesquisa identificou que no *benchmarking* interno este processo de considerar a empresa ao longo do tempo como DMU já é aplicado, conseqüentemente piorando a discriminação do modelo. Ou seja, sempre que for comparado o *benchmarking* interno com a lógica da *DEA Window*, a discriminação do modelo será piorada. Para que a *DEA Window* aumente sua discriminação quando em conjunto com o *benchmarking* interno, ela requer uma série histórica de dados maior. Assim, desde que se tenha uma série histórica maior, a lógica de janelas quando em conjunto com o *benchmarking* interno, pode ser uma alternativa para a avaliação da eficiência ao longo do tempo. Já com séries históricas menores, existe uma tendência de problemas de discriminação, contrariando a lógica da aplicação da *DEA Window* quando em conjunto com o *benchmarking* externo.

A integração da *DEA Window* com o *benchmarking* interno apresenta importantes contribuições para as empresas na avaliação da eficiência. Em primeiro lugar, o modelo *DEA Window* permite uma análise dinâmica e realista, uma vez que a utilização de janelas móveis possibilita acompanhar a evolução da eficiência ao longo do tempo. Essa abordagem facilita a identificação de tendências, ciclos sazonais e variações na eficiência que uma análise estática poderia ocultar, fornecendo informações contínuas e atualizadas que servem de base para a tomada de decisões.

Adicionalmente, a aplicação da *DEA Window* viabiliza a identificação periódica dos *inputs* críticos no modelo, como, por exemplo, um consumo elevado de matéria-

prima em determinado mês. Dessa forma, os gestores dispõem de uma visão mais detalhada e realista do desempenho do processo produtivo ao longo do tempo, superando as limitações da DEA convencional, que não permite a detecção recorrente dessas variações devido ao problema de alteração dos índices de eficiência de períodos anteriores. Por sua vez, o *benchmarking* interno possibilita a comparação da empresa consigo mesma, permitindo a identificação e replicação das melhores práticas, o que contribui para a padronização e o aprimoramento contínuo dos processos produtivos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teve como objetivo geral analisar, de maneira exploratória, a eficiência, recorrentemente, ao longo do tempo do processo produtivo do *Metal Injection Molding* (MIM). Para alcançar este propósito foi realizado um estudo de caso, em uma empresa do segmento metalmecânico, com a aplicação da DEA *Window* em conjunto com o *benchmarking* interno. A aplicação da DEA *Window* possibilitou a avaliação da eficiência técnica em formato de painel, de forma recorrente.

Para alcançar o objetivo geral deste estudo, foram delineados objetivos específicos. O primeiro objetivo específico consistiu em caracterizar como as empresas produtoras de bens avaliam a eficiência ao longo do tempo por meio de uma revisão da literatura. Para atingir esse objetivo, foram conduzidas duas revisões sistemáticas. A primeira concentrou-se em identificar artigos que aplicassem a DEA em conjunto com o *benchmarking* interno, enquanto a segunda buscou estudos que utilizassem a DEA *Window* para a avaliação de sistemas produtivos. Nesta etapa, foram selecionados dezoito artigos, no entanto, não foram identificados estudos que abordassem a utilização conjunta da DEA *Window* com o *benchmarking* interno.

O segundo objetivo buscou realizar uma análise comparativa das eficiências calculadas por meio da DEA convencional e da DEA *Window*. Para tanto, foram comparadas as eficiências técnicas de três modelos: dois modelos DEA *Window* (com janelas de três e seis períodos) e o modelo DEA convencional. Nesta etapa, foram aplicados testes estatísticos para identificar diferenças entre os scores de eficiência. Inicialmente, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos dados. Como os dados não cumpriram o pressuposto de normalidade, empregou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney para comparar as medianas dos scores. Adicionalmente, procedeu-se à comparação das metas e dos ganhos de cada modelo.

O terceiro objetivo consistiu em avaliar as contribuições e limitações da integração entre o *benchmarking* interno e a DEA *Window*. Durante a etapa de análise comparativa, observou-se que a aplicação conjunta dessas metodologias apresenta problemas de discriminação, de modo que o processo analisado tende a

exibir uma eficiência muito próxima do valor máximo estipulado pelo modelo. O último objetivo específico buscou investigar a adequabilidade da DEA *Window* como um indicador recorrente de desempenho em sistemas produtivos. Nesta fase, constatou-se a viabilidade da utilização da técnica como indicador depende de séries históricas de dados maiores, uma vez que os problemas de discriminação da eficiência persistem quando a técnica é aplicada em conjunto com o benchmarking interno em séries de dados menores.

Embora este estudo apresente contribuições relevantes para a aplicação conjunta da DEA *Window* e do *benchmarking* interno na avaliação da eficiência técnica, algumas limitações merecem ser destacadas. Primeiramente, a inexistência de pesquisas anteriores que abordem essa combinação impediu a realização de comparações diretas com outros estudos, restringindo a contextualização dos resultados obtidos. Em segundo lugar, a análise foi realizada com base em uma série histórica limitada, e a inclusão de dados de um período mais extenso poderia proporcionar uma avaliação diferente das tendências de eficiência ao longo do tempo. Ademais, apesar de o modelo DEA *Window* ter sido desenvolvido com o respaldo de especialistas da empresa e da área de estudo, sua adequação ainda pode ser objeto de questionamentos, indicando a necessidade de validações futuras em contextos variados. Outra limitação identificada foi a impossibilidade de discutir em tempo hábil e de forma mais aprofundada o motivo que levou os modelos de janelas a apresentarem problemas de discriminação dos dados.

Essas limitações apontam para importantes direções para pesquisas subsequentes que possam aprimorar e consolidar a aplicação desta metodologia na análise da eficiência. Para trabalhos futuros, sugere-se uma continuação desta pesquisa, buscando entender os motivos pelos quais o modelo DEA *Window* apresentou problemas de discriminação quando utilizado em conjunto com o *benchmarking* interno.

## REFERÊNCIAS

ALKHARS, Mohammed A.; ALNASSER, Ahmad H.; ALFARAJ, Taqi. **A Survey of DEA Window Analysis Applications. Processes**MDPI, , 2022. DOI: 10.3390/pr10091836.

ALLEN, R.; ATHANASSOPOULOS, A.; DYSON, R. G.; THANASSOULIS, E. Weights restrictions and value judgements in Data Envelopment Analysis: Evolution, development and future directions. **Annals of Operations Research**, [S. l.], v. 73, p. 13–34, 1997. DOI: 10.1023/A:1018968909638.

AL-REFAIE, Abbas. Window Analysis and MPI for Efficiency and Productivity Assessment Under Fuzzy Data: Window Analysis and MPI. **International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2022. DOI: 10.4018/IJMMME.299058.

AL-REFAIE, Abbas; HAMMAD, Mohammad; LI, Ming Hsien. DEA window analysis and Malmquist index to assess energy efficiency and productivity in Jordanian industrial sector. **Energy Efficiency**, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 1299–1313, 2016. DOI: 10.1007/s12053-016-9424-0.

AL-REFAIE, Abbas; NAJDAWI, Ruba; SY, Erin. **Using DEA Window Analysis to Measure the Efficiencies of Blowing Machines in Plastics Industry**Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. [s.l: s.n.].

AL-REFAIE, Abbas; WU, Chien Wei; SAWALHEH, Moaath. DEA window analysis for assessing efficiency of blistering process in a pharmaceutical industry. **Neural Computing and Applications**, [S. l.], v. 31, n. 8, p. 3703–3717, 2019. DOI: 10.1007/s00521-017-3303-2.

ANDERSSON, C.; BELLGRAN, M. On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining

OEE and productivity. **Journal of Manufacturing Systems**, [S. l.], v. 35, p. 144–154, 2015. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.12.003.

ASMILD, Mette; PARADI, Joseph C.; AGGARWALL, Vanita; SCHAFFNIT, Claire. Combining DEA Window Analysis with the Malmquist Index Approach in a Study of the Canadian Banking Industry. **Journal of Productivity Analysis**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 67–89, 2004. DOI: 10.1023/B:PROD.0000012453.91326.ec.

AUGUSTO CAUCHICK MIGUEL, Paulo. **Case research in production engineering: structure and recommendations for its conduction Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. [s.l: s.n.].

BARBOSA, Luziane Machado; LACERDA, Daniel Pacheco; PIRAN, Fabio Antonio Sartori; DRESCH, Aline. Exploratory analysis of the variables prevailing on the effects of product modularization on production volume and efficiency. **International Journal of Production Economics**, [S. l.], v. 193, p. 677–690, 2017. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.08.028.

BAZARGAN, Amir; NAJAFI, Seyyed Esmail; LOTFI, Farhad Hosseinzadeh; FALLAH, Mohammad; EDALATPANAH, Seyyed Ahmad. PRESENTING A PRODUCTIVITY ANALYSIS MODEL FOR IRAN OIL INDUSTRIES USING MALMQUIST NETWORK ANALYSIS. **Decision Making: Applications in Management and Engineering**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 251–292, 2023. DOI: 10.31181/dmame622023705.

CAUCHICK-MIGUEL, Paulo Augusto; SOUSA-ZOMER, Thayla Tavares; TORTORELLA, Guilherme. Methodological concerns in case-based research in industrial engineering: revisiting the challenges towards further recommendations. **Production**, [S. l.], v. 33, 2023. DOI: 10.1590/0103-6513.20220095.

CHARNES, A.; CLARK, C. T.; COOPER, W. W.; GOLANY, B. A developmental study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U.S. air forces. **Annals of Operations Research**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 95–112, 1984. DOI: 10.1007/BF01874734.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 429–444, 1978. DOI: 10.1016/0377-2217(78)90138-8.

CHUNG, Shu Hsing; LEE, Amy Hsin I.; KANG, He Yau; LAI, Chih Wei. A DEA window analysis on the product family mix selection for a semiconductor fabricator. **Expert Systems with Applications**, [S. l.], v. 35, n. 1–2, p. 379–388, 2008. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.07.011.

CULLINANE, Kevin; SONG, Dong-Wook; JI, Ping; WANG, Teng-Fei. An Application of DEA Windows Analysis to Container Port Production Efficiency. **Review of Network Economics**, [S. l.], v. 3, n. 2, 2004. DOI: 10.2202/1446-9022.1050.

DE SOUZA, Iberé Guarani; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs; DRESCH, Aline; PIRAN, Fabio Antonio Sartori. Efficiency and internal benchmark on an armament company. **Benchmarking**, [S. l.], v. 25, n. 7, p. 2018–2039, 2018. a. DOI: 10.1108/BIJ-08-2016-0128.

DE SOUZA, Iberê Guarani; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs; DRESCH, Aline; PIRAN, Fabio Sartori. Do the improvement programs really matter? An analysis using data envelopment analysis. **BRQ Business Research Quarterly**, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 225–237, 2018. b. DOI: 10.1016/j.brq.2018.08.002.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES, José Antonio Valle Júnior. **Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia**. 1. ed. [s.l.] : Bookman, 2015. v. 1

FAY, Michael P.; PROSCHAN, Michael A. Wilcoxon-Mann-Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. **Statistics Surveys**, [S. l.], v. 4, n. none, 2010. DOI: 10.1214/09-SS051.

FGV. **IGP-M: Resultados 2024**. 2024. Disponível em:  
<https://portal.fgv.br/noticias/igp-m-resultados-2024>

GANDJOUR, Afschin; KLEINSCHMIT, Frauke; LITTMANN, Valerij; LAUTERBACH, Karl Wilhelm. **Quality Management in Health Care**. [s.l: s.n.].

GONG, Shixin; SHAO, Cheng; ZHU, Li. Multi-level and multi-granularity energy efficiency diagnosis scheme for ethylene production process. **Energy**, [S. l.], v. 170, p. 1151–1169, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.203.

GOSLING, Jonathan; NAIM, Mohamed M. Engineer-to-order supply chain management: A literature review and research agenda. **International Journal of Production Economics**, [S. l.], v. 122, n. 2, p. 741–754, 2009. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.07.002.

HALKOS, George Emm.; TZEREMES, Nickolaos G. Exploring the existence of Kuznets curve in countries' environmental efficiency using DEA window analysis. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 68, n. 7, p. 2168–2176, 2009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.02.018.

JEONG, Ki-Young; PHILLIPS, Don T. Operational efficiency and effectiveness measurement. **International Journal of Operations & Production**

**Management**, [S. I.], v. 21, n. 11, p. 1404–1416, 2001. DOI: 10.1108/EUM0000000006223.

KANG, Chao Chung. Liberalization policy, production and cost efficiency in Taiwan's telecommunications industry. **Telematics and Informatics**, [S. I.], v. 27, n. 1, p. 79–89, 2010. DOI: 10.1016/j.tele.2009.05.004.

KIM, Nam Hyok; HE, Feng; KWON, O. Chol. Combining common-weights DEA window with the Malmquist index: A case of China's iron and steel industry. **Socio-Economic Planning Sciences**, [S. I.], v. 87, 2023. DOI: 10.1016/j.seps.2023.101596.

LIN, Shoufu; LIN, Ruoyun; SUN, Ji; WANG, Fei; WU, Weixiang. Dynamically evaluating technological innovation efficiency of high-tech industry in China: Provincial, regional and industrial perspective. **Socio-Economic Planning Sciences**, [S. I.], v. 74, p. 100939, 2021. DOI: 10.1016/j.seps.2020.100939.

MERGONI, Anna; EMROUZNEJAD, Ali; DE WITTE, Kristof. Fifty years of Data Envelopment Analysis. **European Journal of Operational Research**, [S. I.], 2024. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.12.049.

MERHAR, J. Overview of metal injection moulding. **Metal Powder Report**, v. 45, n. 5, p. 339–342, 1990.

MUCHIRI, P.; PINTELON, L. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. **International Journal of Production Research**, [S. I.], v. 46, n. 13, p. 3517–3535, 2008. DOI: 10.1080/00207540601142645.

MUHAMMAD, Arif; RAO, Tirupathi; FAROOQ, Qaiser. DEA Window analysis with slack-based measure of efficiency in Indian cement industry. **Statistics**,

**Optimization and Information Computing**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 291–301, 2018. DOI: 10.19139/soic.v6i2.360.

O'DELL, Carla; GRAYSON, C. Jackson. If Only We Knew What We Know: Identification and Transfer of Internal Best Practices. **California Management Review**, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 154–174, 1998. DOI: 10.2307/41165948.

OECHSNER, Richard; PFEFFER, Markus; PFITZNER, Lothar; BINDER, Harald; MÜLLER, Eckhard; VONDERSTRASS, Thomas. From overall equipment efficiency (OEE) to overall Fab effectiveness (OFE). **Materials Science in Semiconductor Processing**, [S. l.], v. 5, n. 4–5, p. 333–339, 2002. DOI: 10.1016/S1369-8001(03)00011-8.

OLIVEIRA, Maiquiel Schmidt De; LIZOT, Mauro; SIQUEIRA, Hugo; AFONSO, Paulo; TROJAN, Flavio. Efficiency Analysis of Oil Refineries Using DEA Window Analysis, Cluster Analysis, and Malmquist Productivity Index. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 15, n. 18, 2023. DOI: 10.3390/su151813611.

O'NEAL, Thomas; MIN, Hokey; CHEROBINI, Daniel; JOO, Seong Jong. Benchmarking aircraft maintenance performances using data envelopment analysis. **International Journal of Quality and Reliability Management**, [S. l.], v. 38, n. 6, p. 1328–1341, 2020. DOI: 10.1108/IJQRM-05-2020-0157.

PARK, Sung Hoon; PHAM, Thi Yen; YEO, Gi Tae. The Impact of Ferry Disasters on Operational Efficiency of the South Korean Coastal Ferry Industry: A DEA-Window Analysis. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, [S. l.], v. 34, n. 3, p. 248–255, 2018. DOI: 10.1016/j.ajsl.2018.09.009.

PEYKANI, Pejman; FARZIPOOR SAEN, Reza; SEYED ESMAEILI, Fatemeh Sadat; GHEIDAR-KHELJANI, Jafar. Window data envelopment analysis approach:

A review and bibliometric analysis. **Expert Systems**, [S. l.], v. 38, n. 7, 2021. DOI: 10.1111/exsy.12721.

PIRAN, Fabio Antonio Sartori. **MODULARIZAÇÃO DE PRODUTO E OS EFEITOS SOBRE A EFICIÊNCIA TÉCNICA: UMA AVALIAÇÃO EM UMA FABRICANTE DE ÔNIBUS**. 2015. Dissertação - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

PIRAN, Fabio Antonio Sartori; DE PARIS, Alaércio; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs; SERRANO, Rosiane; CASSEL, Ricardo Augusto. Overall Equipment Effectiveness: Required but not Enough—An Analysis Integrating Overall Equipment Effect and Data Envelopment Analysis. **Global Journal of Flexible Systems Management**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 191–206, 2020. a. DOI: 10.1007/s40171-020-00238-6.

PIRAN, Fabio Antonio Sartori; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs; DRESCH, Aline. Effects of product modularity on productivity: an analysis using data envelopment analysis and Malmquist index. **Research in Engineering Design**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 143–156, 2020. b. DOI: 10.1007/s00163-019-00327-3.

PIRAN, Fabio Antonio Sartori; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs; VIERO, Carlos Frederico; DRESCH, Aline; CAUCHICK-MIGUEL, Paulo Augusto. Product modularization and effects on efficiency: An analysis of a bus manufacturer using data envelopment analysis (DEA). **International Journal of Production Economics**, [S. l.], v. 182, p. 1–13, 2016. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.08.008.

PIRAN, Fabio Sartori; CAMANHO, Ana S.; SILVA, Maria Conceição; LACERDA, Daniel Pacheco. Internal Benchmarking for Efficiency Evaluations Using Data Envelopment Analysis: A Review of Applications and Directions for Future Research. *Em*: [s.l: s.n.]. p. 143–162. DOI: 10.1007/978-3-031-29583-6\_9.

PIRAN, Fabio Sartori; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMANHO, Ana S.; SILVA, Maria C. A. Internal benchmarking to assess the cost efficiency of a broiler production system combining data envelopment analysis and throughput accounting. **International Journal of Production Economics**, [S. l.], v. 238, 2021. DOI: 10.1016/j.ijpe.2021.108173.

PIRAN, Fabio Sartori; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs. **Análise e gestão da eficiência: Aplicação em sistemas produtivos de bens e de serviços**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

PULINA, Manuela; DETOTTO, Claudio; PABA, Antonello. An investigation into the relationship between size and efficiency of the Italian hospitality sector: A window DEA approach. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 204, n. 3, p. 613–620, 2010. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.11.006.

RADUKIĆ, Snežana; VESELINOVIĆ, Milan; MARJANOVIĆ, Ivana. Technical efficiency analysis of oil companies in the Republic of Serbia. **Economic Research-Ekonomska Istrazivanja**, [S. l.], v. 36, n. 1, 2023. DOI: 10.1080/1331677X.2023.2180051.

ROETS, Bart; CHRISTIAENS, Johan. Evaluation of railway traffic control efficiency and its determinants. **EJTIR Issue**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 396–418, 2015.

SENRA, Luis Felipe Aragão de Castro; NANJI, Luiz Cesar; MELLO, João Carlos Correia Baptista Soares De; MEZA, Lidia Angulo. Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 191–207, 2007. DOI: 10.1590/S0101-74382007000200001.

SKINNER, Wickham. The Focused Factory. **Harvard business review**, [S. l.], p. 114–121, 1974.

SOUTHARD, Peter B.; PARENTE, Diane H. A model for internal benchmarking: When and how? **Benchmarking: An International Journal**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 161–171, 2007. DOI: 10.1108/14635770710740369.

SPENDOLINI, Michael J. **The Benchmarking Book**. 1. ed. NY: Amacom Books, 1992.

SUEYOSHI, Toshiyuki. Estimation of Stochastic Frontier Cost Function Using Data Envelopment Analysis: An Application to the AT&T Divestiture. **The Journal of the Operational Research Society**, [S. l.], v. 42, n. 6, p. 463, 1991. DOI: 10.2307/2583454.

TELLES, Eduardo Santos; LACERDA, Daniel Pacheco; MORANDI, Maria Isabel Wolf Motta; PIRAN, Fabio Antonio Sartori. Drum-buffer-rope in an engineering-to-order system: An analysis of an aerospace manufacturer using data envelopment analysis (DEA). **International Journal of Production Economics**, [S. l.], v. 222, 2020. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.09.021.

TONE, Kaoru; SAHOO, Biresh K. Evaluating cost efficiency and returns to scale in the Life Insurance Corporation of India using data envelopment analysis. **Socio-Economic Planning Sciences**, [S. l.], v. 39, n. 4, p. 261–285, 2005. DOI: 10.1016/j.seps.2004.06.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012105000108>.

VALOR ECONÔMICO. **Mão de obra industrial é uma das mais baratas entre 34 países**. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/coluna/mao-de-obra-industrial-e-uma-das-mais-baratas-entre-34-paises.ghtml>

VALOR INVESTE. **Brasil fica em último lugar em ranking de custo de capital para empresas**. 2019. Disponível em: <https://valorinveste.globo.com/produtos/servicos->

financeiros/noticia/2019/07/08/brasil-fica-em-ultimo-lugar-em-ranking-de-custo-de-capital-para-empresas.ghtml

VON GILSA, Charles; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luis Felipe Riehs; SOUZA, Iberê Guarani; CASSEL, Ricardo Augusto. Longitudinal evaluation of efficiency in a petrochemical company. **Benchmarking**, [S. l.], v. 24, n. 7, p. 1786–1813, 2017. DOI: 10.1108/BIJ-03-2016-0044.

YANG, Hsu-Hao; CHANG, Cheng-Yu. Using DEA window analysis to measure efficiencies of Taiwan's integrated telecommunication firms. **Telecommunications Policy**, [S. l.], v. 33, n. 1–2, p. 98–108, 2009. DOI: 10.1016/j.telpol.2008.11.001.

## APÊNDICE I – PROTOCOLO DE BUSCA RSL

ELEMENTO	ESCOLHA
<b>Estrutura conceitual</b>	Como deve ser realizada uma análise da eficiência em um sistema produtivo considerando o benchmarking interno e o DEA, ao longo do tempo?
<b>Contexto</b>	Aplicações do <i>benchmarking</i> interno ou da <i>DEA Window</i> em empresas produtoras de bens.
<b>Horizonte</b>	Aberto
<b>Idiomas</b>	Inglês, português
<b>Objetivo da revisão</b>	Identificar possíveis estudos que vão elucidar o direcionamento da pesquisa.
<b>Estratégia de revisão</b>	(X) configurativa                      ( ) agregativa
<b>Critérios de busca</b>	<p><b>Critérios de inclusão:</b> Apresentar resultados quantitativos, qualitativos; Fazer referência aos conceitos selecionados;</p> <p><b>Critérios de exclusão:</b> Estudos pagos; Estudos não relacionados com empresas produtoras de bens; Estudos que não se apresentem nos idiomas selecionados; Estudos fora do escopo da pesquisa.</p>
<b>Termos de busca</b>	<p><i>("benchmarking internal" OR "internal benchmarking") OR ("dea window" OR "window DEA") AND (manufacturing OR industry OR production)</i></p> <p><i>("Data Envelopment Analysis") AND ("Internal Benchmarking" OR "Internal Benchmark" OR "Internal Analysis" OR "Longitudinal Data" OR "Time Series")</i></p>
<b>Fontes de busca</b>	SCOPUS <i>Web of Science</i> EBSCO Host
<b>Índices de busca</b>	Título, Resumo, Palavras-chave