

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

MAIQUEL SANDOCAN RADMANN

**EFICIÊNCIA DE INVESTIMENTOS EM BENS DE CAPITAL: UMA AVALIAÇÃO
COM INDICADORES COMPOSTOS POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE
DADOS**

São Leopoldo
2025

MAIQUEL SANDOCAN RADMANN

**EFICIÊNCIA DE INVESTIMENTOS EM BENS DE CAPITAL: UMA AVALIAÇÃO
COM INDICADORES COMPOSTOS POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE
DADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2025, 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

R129e	<p>Radmann, Maiquel Sandocan. Eficiência de investimentos em bens de capital : uma avaliação com indicadores compostos por meio da análise envoltória de dados / por Maiquel Sandocan Radmann. – 2025. 110 f. : il. ; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo, RS, 2025. “Orientador: Dr. Fabio Antônio Sartori Piran”.</p> <p>1. Investimentos. 2. Bens de capital. 3. Análise envoltória de dados (DEA). 4. Indicador composto. 5. Unidades de tomada de decisão (DMU). I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 658.5:339.188.4</p>
-------	---

Catalogação na Publicação (CIP):
 Bibliotecário Alessandro Dietrich - CRB 10/2338

MAIQUEL SANDOCAN RADMANN

**EFICIÊNCIA DE INVESTIMENTOS EM BENS DE CAPITAL: UMA AVALIAÇÃO
COM INDICADORES COMPOSTOS POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE
DADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2025, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovado em: 30/09/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Duduchi Feitosa
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS

Prof.^a Dra. Maria Isabel Wolf Motta Morandi
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus. Creio, firmemente, que és o autor e consumador da vida e de tudo que há. A Ti, toda honra, glória e gratidão.

À minha querida esposa, Adriana Michels Radmann, dedico um agradecimento especial, carregado de afeto. Agradeço a dedicação, companheirismo e, acima de tudo, amor. Seu cuidado diário e presença constante são luz nos dias mais exigentes.

À família, agradeço o apoio incondicional, o incentivo, a paciência ao longo da caminhada e a compreensão pelas ausências. O suporte de vocês foi fundamental.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Fabio Antônio Sartori Piran, toda a minha admiração e reconhecimento. Muito obrigado pela orientação precisa, escuta atenta, zelo e rigor metodológico, busca pela excelência acadêmica e a contribuição efetiva para a prática e resolução de desafios organizacionais. Por toda sua abnegação e tempo despendido, meu mais sincero respeito. Sua confiança e incentivo foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e entrega deste trabalho.

À Professora Dra. Débora Oliveira da Silva, que participou do início de minha trajetória no mestrado, não tenho somente gratidão. Quero parabenizá-la pela brilhante condução ao celebrar a parceria entre UNISINOS e empresas de Panambi/RS. Este ato viabilizou a extensão do curso para nossa cidade. Oportunizou e facilitou o acesso a ensino e formação de alta qualidade.

Aos especialistas que participaram desta pesquisa, minha reverência. Agradeço pelos conhecimentos compartilhados, pelas relevantes contribuições e pelos conselhos. Grato, porque jamais mediram esforços para auxiliar a buscar e identificar a melhor forma de conduzir essa pesquisa.

Agradeço à empresa Tromink Industrial Ltda. Em especial, ao corpo diretivo e sócios. Além da oportunidade de trabalho, me propiciam um ambiente de mútua confiança. Grato por ser selecionado bolsista. O desafio de transformar conhecimento acadêmico em resultados aplicáveis à realidade organizacional é uma enriquecedora etapa. Os demais desafios, com comprometimento e dedicação, quero contribuir para o desenvolvimento, prosperidade e sustentabilidade da organização.

Esta dissertação é fruto de processo de construção e desenvolvimento. Carrega em si, não apenas, resultados de uma pesquisa, mas apresenta, também, marcas de uma trajetória construída com esforço, fé e apoio de muitas pessoas.

RESUMO

A realização de investimentos em bens de capital é uma decisão estratégica que pode contribuir, determinantemente, para o desempenho de uma organização. É um processo complexo que envolve a avaliação de múltiplas alternativas e possui elevado grau de incertezas. Decisões qualificadas aumentam a probabilidade de retornos positivos no futuro, através da escolha da alternativa mais viável. O objetivo geral deste estudo é avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com indicadores compostos (ICs) por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA). Como principais resultados, o estudo aborda questões teóricas e gerenciais. No plano teórico, a integração de DEA no modelo da Função de Distância Direcional (DDF) e ICs, articula metas e *benchmarks* internos, oferecendo um caminho para mensuração e comparação. No plano gerencial, o uso combinado de *score*, *Beta*, *lambda* e folgas, entrega critérios práticos de priorização, intervenção e monitoramento. Em termos de decisão, o procedimento aumenta a assertividade na alocação de capital ao transformar múltiplas medidas em um roteiro operacionalmente claro. Delineia o caminho do diagnóstico à implementação, contribuindo para escolhas mais assertivas com base em análises fundamentadas e alinhadas à criação de valor no portfólio de investimentos. Além de abranger aspectos técnicos e teóricos, se alia com indicadores financeiros amplamente utilizados, que, neste estudo, formam o conjunto de indicadores individuais aplicados para gerar o indicador agregado, o IC, que permite a comparação direta entre os projetos de investimento sob análise. A investigação não explora apenas as vantagens da DEA, mas, também, identifica e discute suas limitações, proporcionando uma visão equilibrada e crítica sobre a aplicabilidade dessa técnica na prática empresarial. Espera-se, desta forma, que este estudo contribua para o entendimento mais profundo dos métodos de avaliação de eficiência em investimentos de bens de capital, oferecendo subsídios tanto para pesquisadores quanto para gestores que buscam otimizar o uso de recursos nas organizações.

Palavras-chave: Investimentos, Bens de Capital, Análise Envoltória de Dados, DEA, Indicador Composto.

ABSTRACT

Making investments in capital goods is a strategic decision that can make a decisive contribution to an organization's performance. It is a complex process that involves the evaluation of multiple alternatives and has a high degree of uncertainty. Qualified decisions increase the likelihood of positive returns in the future by choosing the most viable alternative. The general objective of this study is to evaluate the efficiency of investments in capital goods with composite indicators (CIs) through Data Envelopment Analysis (DEA). As main results, the study addresses theoretical and managerial issues. On a theoretical level, the integration of DEA into the Directional Distance Function (DDF) model and CIs articulates internal goals and benchmarks, offering a means for measurement and comparison. On a managerial level, the combined use of scores, beta, lambda, and slack provides practical criteria for prioritization, intervention, and monitoring. In terms of decision-making, the procedure increases assertiveness in capital allocation by transforming multiple measures into an operationally clear roadmap. It outlines the path from diagnosis to implementation, contributing to more assertive choices based on well-founded analyses aligned with value creation in the investment portfolio. In addition to covering technical and theoretical aspects, it is combined with widely used financial indicators, which, in this study, form the set of individual indicators applied to generate the aggregate indicator, the CI, which allows direct comparison between the investment projects under analysis. The research not only explores the advantages of DEA, but also identifies and discusses its limitations, providing a balanced and critical view of the applicability of this technique in business practice. It is hoped, therefore, that this study will contribute to a deeper understanding of efficiency assessment methods for capital goods investments, offering support to both researchers and managers seeking to optimize the use of resources in organizations.

Keywords: Investments, Capital Goods, Data Envelopment Analysis, DEA, Composite Indicator.

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)	105
Anexo 2: Lista de documentos selecionados na RSL	108

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Definição de produtividade	35
Equação 2: Eficiência X Produtividade.....	36
Equações 3 e 4: Modelo DDF	40
Equação 4: IC com modelo direcional BoD	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de resultados da RSL	27
Figura 2: Fronteira de Produção e Eficiência	38
Figura 3: Etapas para condução de uma pesquisa científica	50
Figura 4: Modelagem - visão sistemática da solução de problemas	53
Figura 5: Procedimento para avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA.....	55
Figura 6: Modelo DEA DDF com BoD aplicado para avaliar investimentos em bens de capital através de ICs	65
Figura 7: Procedimentos para análise de dados	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Proximidade de cada DMU em relação ao <i>benchmark</i>	78
Gráfico 2: Proximidade ao <i>benchmark</i> em ordem decrescente.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo da Revisão Sistemática da Literatura.....	26
Quadro 2: Estudos relacionados ao tema - Resumo da análise de conteúdo.....	45
Quadro 3: Estudos relacionados ao tema - Entradas e Saídas aplicadas.....	46
Quadro 4: Estudos relacionados ao tema - Resumo da abordagem.....	48
Quadro 5: Resumo das etapas desta pesquisa científica	53
Quadro 6: Painel de Especialistas.....	62
Quadro 7: Matriz de <i>benchmark</i>	80
Quadro 8: Síntese das principais contribuições do estudo.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: IPCA – Índice de Correção.....	64
Tabela 2: Indicadores individuais para avaliação dos investimentos	69
Tabela 3: Resultados do DEA: <i>Score</i> , <i>Rank</i> e <i>Beta</i> das DMUs.....	72
Tabela 4: Folgas para cada indicador individual por DMU	75

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLO

BoD	<i>Benefit-of-the-Doubt</i> (Benefício da Dúvida)
CP	Contribuição Prática
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i> (Retorno Constante de Escala)
CT	Contribuição Teórica
DDF	<i>Directional Distance Function</i> (Função de Distância Direcional)
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> (Análise Envoltória de Dados)
DMU	<i>Decision Making Unit</i> (Unidades de Tomada de Decisão)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Indicador Composto
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IR	Índice de Rentabilidade
MC	Margem de Contribuição
PB	<i>Payback</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
VPL	Valor Presente Líquido
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i> (Retorno Variável de Escala)
TIR	Taxa Interna de Retorno
λ	<i>Lambda</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	20
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo Geral	25
1.2.2	Objetivos Específicos.....	25
1.3	JUSTIFICATIVA	25
1.4	DELIMITAÇÕES.....	30
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	33
2.1.1	Produtividade e mudança de produtividade.....	34
2.1.2	Eficiência	35
2.1.3	Fronteira de Produção e/ou Eficiência.....	37
2.2	MODELOS DEA E DDF.....	38
2.3	ICS COM ABORDAGEM BOD EM MODELOS DEA E DDF	41
2.4	ESTUDOS RELACIONADOS	44
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	49
3.1	DELINEAMENTO DA PESQUISA	49
3.2	MÉTODO DE TRABALHO.....	53
3.2.1	Conceitualização.....	56
3.2.2	Modelagem	57
3.2.3	Solução do Problema	58
3.2.4	Implementação	60
3.3	SELEÇÃO DE DMUS E INDICADORES, COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	61
3.4	CONFIGURAÇÃO DO MODELO.....	64
3.5	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS.....	66
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1	INDICADORES INDIVIDUAIS UTILIZADOS NA ANÁLISE DOS DADOS.....	68
4.2	APLICAÇÃO DE DEA E RANKING DE PRIORIZAÇÃO DOS PROJETOS....	71

4.3	ANÁLISE ALVOS E FOLGAS PARA OS INDICADORES INDIVIDUAIS.....	73
4.4	ANÁLISE DOS <i>BENCHMARKS</i>	78
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	83
5.1	SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS E PRÁTICAS DA PESQUISA.....	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS.....	98
	ANEXOS	105

1 INTRODUÇÃO

Garantir a competitividade empresarial no longo prazo e enfrentar os desafios globais são atribuições do desenvolvimento estratégico organizacional (Parfentieva *et al.*, 2021). Através do planejamento estratégico, a organização estabelece o processo contínuo de tomada de decisão pelo alinhamento rigoroso de recursos, revisões regulares de responsabilização e o engajamento genuíno de toda a equipe para o fomento da inovação, alinhados à visão organizacional e às prioridades estratégicas (Luman; Galpin; Krill, 2023). Parte relevante da elaboração do planejamento estratégico organizacional é a definição das estratégias de investimento que a empresa adotará (Zhang *et al.*, 2016). Por se tratar de evento particularmente dinâmico e desafiador, o processo decisório demanda abordagens analíticas avançadas para a delimitação e escolha da melhor alternativa entre as diversas opções de investimento. A decisão de investimento em ativos é atividade da alta administração e compõe as estratégias e políticas da empresa (Seth *et al.*, 2020).

A alocação estratégica de recursos e capital pode melhorar a eficiência operacional, expandir a presença no mercado e impulsionar a inovação das empresas (Nguyen *et al.*, 2023). A política de investimento é elemento fundamental da gestão estratégica e deve estipular o desenvolvimento sustentável empresarial a fim de evitar a realização de investimentos ineficientes (Parfentieva *et al.*, 2021). Maximizar os resultados positivos é o propósito comum a todas as decisões de investimentos realizadas (Goncharuk, 2011). A realização de investimentos em bens de capital é uma decisão estratégica que pode contribuir, determinantemente, para o desempenho de uma organização (Seth *et al.*, 2020).

Através da análise de variáveis econômicas, as empresas podem decidir sobre o uso e destinação de seus ativos e recursos, optando pelo realinhamento ou manutenção de investimentos (Nguyen *et al.*, 2023). As opções de investimento selecionadas precisam ser cuidadosamente ponderadas, a fim de identificar a alocação mais eficiente de recursos, especialmente quando se trata de bens de capital. Diante da diversidade de opções, a escolha entre as alternativas de investimento disponíveis torna-se um exercício relevante e elementar, influenciando

diretamente nos resultados organizacionais, refletindo, inclusive, na competitividade das empresas. Pontos fortes e fracos, assim como riscos associados, são aspectos que compõem toda e qualquer estratégia, cabendo à alta administração avaliar qual estratégia adotar para atingir as diretrizes organizacionais (Parfentieva *et al.*, 2021). Compreender a relação entre as decisões de investimento e os resultados do desempenho organizacional é vital (Nguyen *et al.*, 2023). As decisões de investimento, afirmam Nguyen *et al.* (2023), são fator crítico pois moldam a direção e o rumo da companhia, influenciando, inclusive, o nível de desempenho e o sucesso das empresas.

Vida útil longa é uma característica de muitos bens de capital (Södersten; Wood; Hertwich, 2018). O investimento em capital é o recurso empregado para comprar novos ativos fixos aplicados na produção e reparar ou atualizar os existentes prolongando a sua vida útil ou capacidade de produção (Gao; Yu, 2020). O manual da OECD (2001), define que os ativos fixos são utilizados repetida ou continuamente na produção, compostos, principalmente, de máquinas, equipamentos, edifícios ou outras estruturas, incluindo também, alguns ativos intangíveis (especialmente *softwares*), que desempenham papel crucial no processo produtivo de uma empresa e economia de município, estado e até mesmo país.

Na sua essência, a gestão de ativos consiste em utilizar recursos limitados da forma mais rentável possível (Li; McNeil, 2021). Racionamento de capital refere-se ao processo de alocação de capital financeiro escasso de maneira tão eficiente quanto possível, de acordo com as condições e circunstâncias da empresa (Alhabeeb, 2016). Envolve a alocação de recursos financeiros em ativos de longo prazo, com o objetivo de gerar retornos futuros. Um desafio fundamental na gestão de ativos é determinar como alocar recursos escassos entre categorias de ativos dispareces e necessidades diversas (Li; McNeil, 2021).

Como já mencionado, a decisão de investimentos em bens de capital é um processo complexo que envolve a avaliação de múltiplas alternativas e elevado grau de incertezas. Desta forma, a decisão de investir deve levar em consideração, não apenas os retornos esperados, mas, também, os riscos associados a cada opção (Suhányi; Suhányiová, 2014). A tomada de decisões de investimento envolve avaliação completa não apenas dos benefícios, mas dos riscos vinculados às opções

de investimento (Nguyen *et al.*, 2023). A tomada de decisões financeiras pelas empresas exige o uso de ferramentas para fins de comparação e análise (Alhabeeb, 2016). Há inúmeros métodos e técnicas para avaliar comparativamente as alternativas de investimento. Definir e selecionar a alternativa ideal de investimento é o objetivo ao utilizá-los.

Há diferentes abordagens sobre a melhor maneira de avaliar e comparar a atratividade de um investimento, porém, os critérios mais utilizados pelos investidores na escolha de qual investimento realizar são o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) (Goncharuk, 2011). Alhabeeb (2016), cita os mesmos itens, mas acrescenta também o Índice de Rentabilidade (IR) e o Payback (PB). Tradicionalmente a definição de investimentos em bens de capital é realizada com base em métodos de avaliação financeira. Neste aspecto, a crise financeira e econômica, entre os anos de 2008 e 2009, revelou que tais abordagens metodológicas podem ser ineficazes, devido aos seus propósitos limitados, caráter estático, foco exclusivo em indicadores financeiros, grande número de fatores utilizados e complexidade na interpretação dos resultados (Goncharuk, 2011).

As decisões qualificadas aumentam a probabilidade de retornos positivos no futuro (Suhányi; Suhányiová, 2014). A ênfase deve estar na avaliação das oportunidades de investimento da empresa, a fim de escolher a alternativa mais viável entre elas (Alhabeeb, 2016). Surge, neste momento, a possibilidade da análise de investimentos em bens de capital através da análise da eficiência por meio da aplicação da Análise Envoltória de Dados, também conhecida como DEA. A DEA é uma técnica de programação linear que permite a avaliação e comparação da eficiência de unidades de tomada de decisão, as chamadas DMUs, identificando as eficientes (Misiunas *et al.*, 2016).

Ao realizar a avaliação de desempenho e análise de investimento para o desenvolvimento sustentável do porto de contêineres na China, Lin, Yan e Wang (2019) aplicaram a DEA através de uma abordagem inversa que considera resultados desejáveis e indesejáveis afirmando que, raramente localizaram na literatura existente, discussões sobre a eficiência ou a análise de investimento dos portos de contêineres com base na DEA. Apesar de terem localizado pouca literatura no seu tema de pesquisa, Lin, Yan e Wang (2019) apontam que os resultados

evidenciam que a DEA é um instrumento viável para avaliação de desempenho e fornece, aos decisores, informações sobre a otimização de recursos financeiros dos portos de contêineres, que constituem grandes e complexas estruturas. A DEA é especialmente útil quando há múltiplos critérios para avaliação e quando os dados são mais complexos do que uma simples análise utilizando os métodos tradicionais (Krmac; Kaleibar, 2022). Uma propriedade que torna o método DEA aplicável de forma ampla, confirmando sua robustez, é que não faz suposições sobre a estrutura interna do sistema de produção avaliado, essa é uma característica única da DEA (Ang; Chen, 2016).

A DEA, assim como outras opções de avaliação, tem suas vantagens e desvantagens e, identificá-las com precisão, auxiliará os tomadores de decisão a utilizá-la adequadamente para a gestão de ativos (Li; McNeil, 2021). Adicionalmente, Li e McNeil (2021) afirmam que a DEA pode ser uma ferramenta poderosa ao ser empregada em modelos que contenham grande quantidade de entradas e saídas. Como ferramenta de apoio à tomada de decisão, o modelo proposto, com base na DEA, é amplamente aplicável para seleção de investimentos (Suhányi; Suhányiová, 2014). Ao aplicar a DEA na avaliação de cenários de investimento em ativos rodoviários, Li e McNeil (2021) afirmam que, como outras abordagens para tomada de decisão, a DEA possui vantagens e desvantagens e que, a identificação auxiliará os decisores na aplicação da técnica para a gestão de ativos, podendo ser uma ferramenta poderosa para analisar modelos com múltiplas entradas e saídas.

Uma das desvantagens mais significativas da DEA é a restrição à atuação com dados imprecisos, ao assumir que todos os dados de entrada e saída são conhecidos e completamente exatos (Wang; Greatbanks; Yang, 2005). Métodos para avaliação de investimentos construídos com base na DEA, e suas variações, têm como principais vantagens a previsão do montante específico de investimento, com base nas reais necessidades dos decisores, e a definição clara da direção da alocação ótima de recursos que o investimento requer (Chen et al., 2017). Ao aplicar a DEA, para avaliar os cenários de investimento em ativos de infraestrutura, Li e McNeil (2021) reiteram que a técnica possui diversos fatores positivos, como a capacidade de lidar com múltiplas entradas e saídas, além de não obrigar os

pesquisadores a definir, matematicamente, a função de produção que é fruto de observação.

A DEA é uma técnica que possibilita a atribuição de pesos ao recorrer à otimização, permitindo transformar diversos indicadores em um único, pela abordagem da construção de Indicadores Compostos (IC) (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). Indicadores são dados que sintetizam as características de um sistema ou evidenciam o que está ocorrendo com ele (Saisana; Tarantola, 2002). Já o IC é formado da compilação, em um único índice, de indicadores individuais, selecionados a partir de, entre outros aspectos, por sua relevância, solidez analítica, oportunidade e acessibilidade (OECD, 2008). A combinação matemática de uma série de indicadores é chamada de IC (Saisana; Tarantola, 2002). Associar indicadores-chave de desempenho formam um IC que busca refletir, em uma única medida, conceitos multidimensionais e, suas principais vantagens residem na competência para sintetizar informações, facilitar a interpretação de resultados e comprimir a quantidade de indicadores (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023).

A DEA é uma técnica que estima a eficiência das unidades de produção ao medir a distância até a fronteira de melhores práticas, refletindo quanto os insumos podem ser reduzidos, mantendo a mesma produção, ou, quanto as saídas podem ser aumentadas, sem a inclusão de recursos adicionais (Silva; Camanho; Barbosa, 2020). O IC pode ser gerado tanto de modelos orientados para entradas quanto de saídas com base na DEA, formatação que traz benefícios pois o IC pode oferecer diversas informações gerenciais, sendo especialmente útil para atividades de *benchmarking* (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). As métricas padrões da DEA podem ser entendidas como ICs, uma vez que, a partir da agregação de informações de vários insumos e produtos, geram uma pontuação final (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020).

Há críticas relevantes aos ICs pois, ainda que as pesquisas referentes ao tema tenham notoriamente crescido, os ICs não são eficazes para orientar práticas de melhoria ao conceder informações gerenciais, sendo propensos à rejeição devido à subjetividade durante a construção da importância relativa de cada indicador individual (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). Contudo, Camanho, Zanella e Moutinho (2023) abordam o Manual da OECD, disponibilizado no ano de 2008,

informando que, essa importante publicação, elege a DEA como uma técnica interessante de ponderação e agregação, capaz de reduzir a subjetividade da atribuição de pesos no processo de formação dos ICs.

Pelo exposto, fundamenta-se o desígnio de aliar a técnica DEA à construção de ICs para avaliação de investimentos em bens de capital neste estudo. A DEA é também associada à construção de ICs nas ciências sociais através do modelo *Benefit-of-the-Doubt* (BoD), traduzido para português, Benefício da Dúvida (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020). A presente investigação, também percorre esse caminho durante sua análise.

Diagnosticadas a relevância e aplicabilidade do presente estudo, seu tema central reside na identificação da alternativa ideal de investimento em bens de capital através da análise comparativa da eficiência com ICs, por meio da DEA. As decisões de investimento precisam estar orientadas pelos objetivos estratégicos da organização com base em suas políticas e normas, passando, frequentemente, por reavaliações. Devem ser ajustadas de acordo com resultados obtidos e cenarização de mercado. Superar limitações de métodos convencionais de análise de investimentos compõe o escopo de trabalho desta pesquisa, além de possibilitar a identificação da alternativa que apresente maior viabilidade.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

No longo prazo, o crescimento econômico e a melhoria dos padrões de vida têm sido impulsionados pela mudança, aprimoramento e desenvolvimento tecnológico (OECD, 2001). A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico apresenta o manual de 2001 estruturado em quatro blocos. O foco desse manual reside nos estudos da produtividade e, também, da eficiência, citando a utilidade da técnica DEA. Já o manual de 2008 concentra os esforços na construção de ICs onde aponta a DEA como um mecanismo de ponderação e agregação para reduzir a subjetividade inerente à especificação de pesos nos ICs (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023).

Em seu estudo sobre a eficiência da gestão do capital de giro e sua influência no desempenho da empresa, Seth *et al.* (2020) concluiu que as organizações

precisam gerenciar, cuidadosamente, inúmeros aspectos de suas finanças, porém, alerta que o componente mais importante é garantir a utilização e aplicação eficaz dos ativos de longo prazo, ou seja, os ativos fixos, ou ainda, os bens de capital. Já a eficiência é descrita como conceito de gestão com olhar para o longo prazo, e aborda desde a gestão científica até a reconstrução dos processos de negócio (Mahla *et al.*, 2023). Por meio da DEA, a eficiência pode ser analisada e quantificada, sendo capaz de atuar com múltiplas entradas e saídas (Velasquez; Hester, 2013). A DEA é um método conhecido para avaliar a eficiência relativa das DMUs (Ang; Chen, 2016). A DEA é um método amplamente utilizado para ajudar os gerentes a avaliar suas eficiências (Zhu; Yu; Sun, 2018).

As atividades de pesquisa relacionadas à DEA cresceram rapidamente recentemente (Liu; Lu; Lu, 2016). A DEA ganhou popularidade em vários campos de pesquisa que envolvem economia, logística, engenharia e gestão (Seth; Chadha; Sharma, 2021). A análise de decisão multicritério evoluiu para amparar diversas áreas de aplicação e, no decurso das últimas décadas, tem sido muito utilizada (Velasquez; Hester, 2013). Desta mesma forma, a literatura que desenvolve contribuições metodológicas e empíricas sobre a fronteira não paramétrica, a DEA, tem estado em franca expansão (Daraio *et al.*, 2020). Ao realizar a revisão da literatura dos principais métodos de análise multicritério, Velasquez e Hester (2013) apontam que a DEA é utilizada sempre que o objetivo é comparar eficiências, sendo, usualmente, observada em diagnósticos econômicos, médicos, serviços públicos, segurança rodoviária, agricultura, varejo e negócios.

Os ICs são amplamente utilizados nas estatísticas econômicas e empresariais para avaliar o progresso relativo e mútuo dos países em diversos domínios políticos, como competitividade industrial, desenvolvimento sustentável, globalização e inovação (Munda; Nardo, 2009). Os ICs agregam múltiplas variáveis em um único índice, permitindo uma análise mais holística e abrangente (OECD, 2008). O crescente interesse pelos ICs pelas principais organizações internacionais evidencia sua importância e relevância (Munda; Nardo, 2009). Através da integração de ICs com a DEA, é possível obter uma visão mais detalhada e precisa do desempenho das DMUs, identificando não apenas as mais eficientes, mas também proporcionando a identificação de oportunidades de melhorias. Os ICs construídos

com base na DEA têm a capacidade de fornecer informações gerenciais, particularmente interessantes para fins de *benchmarking* (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023).

O presente estudo aborda a análise da alocação eficiente de recursos em bens de capital. Eficiência é a medição que identifica as melhores práticas em um processo, seja no sentido de engenharia, a eficiência técnica, ou no sentido econômico, a eficiência alocativa (OECD, 2001). O manual da OECD (2001) acrescenta que a eficiência técnica plena é caracterizada por um processo de produção que atinge o rendimento máximo possível com um conjunto fixo de insumos e tecnologia específica, enquanto a eficiência alocativa plena ocorre quando a combinação de insumos e produtos minimiza custos e/ou maximiza lucros. É na análise da eficiência alocativa que reside o interesse da presente pesquisa.

O desempenho e a viabilidade de uma empresa a longo prazo são impactados significativamente por suas decisões de investimento, requerendo abordagem, consideração, mensuração e análise cuidadosas (Nguyen *et al.*, 2023). As oportunidades de investimento variam em vários aspectos como o nível de risco associado e a capacidade de gerar retornos futuros e, desta forma, o critério de escolha pela alta administração, da alternativa ideal de investimento, deve utilizar métodos objetivos, quantitativos e confiáveis para avaliar as opções e selecionar a melhor, priorizando a maior rentabilidade e o menor risco (Alhabeeb, 2016).

Identificar e medir, consistentemente, a eficiência dos investimentos em bens de capital é um desafio, agravado pela complexidade das decisões de alocação de capital, que podem incluir diversos fatores que tornam a avaliação da eficiência no nível agregado da empresa uma tarefa difícil e, por vezes, imprecisa (Gao; Yu, 2020). Investimento é o comprometimento de recursos atuais que são aplicados na expectativa de retornos futuros, implicando que esses retornos podem ser internalizados pelo investidor (OECD, 2001). Alocação eficiente de capital é representada por fluxos de capital para sua utilização mais valorizada, sendo também sinônimo de eficiência econômica, que visa a maximização de valor (Kothari; Ramanna; Skinner, 2010).

Como relatado anteriormente, métodos tradicionais de análise como o IR, VPL, TIR e PB têm sido amplamente utilizados para avaliar a viabilidade financeira

de projetos de investimento. A maioria das abordagens metodológicas aplicadas para medir a atratividade dos investimentos empresariais são insuficientes ou incluem muitos indicadores e índices heterogêneos, dificultando a visão integrada e quase impossibilitando a identificação real das perspectivas de desenvolvimento para a empresa e seu ambiente (Goncharuk, 2011). Embora transfiram e forneçam informações importantes sobre o retorno e o risco associado a um investimento, essas abordagens geralmente se concentram em métricas isoladas e podem não capturar adequadamente o cenário em avaliação e, assim, apresentar capacidade insuficiente perante a complexidade dos processos de investimento, em especial no foco da presente investigação, o investimento em bens de capital.

Contrastando com as características dos métodos tradicionais mencionadas, a DEA oferece uma perspectiva ampliada pois se propõe a observar e considerar múltiplas variáveis de entrada e saída simultaneamente. A DEA não se restringe a hipóteses rígidas sobre as variáveis examinadas, pelo contrário, permite uma avaliação mais flexível e abrangente sobre a realidade das diferentes opções sob exame. O arranjo de lidar com múltiplas entradas e saídas confere à DEA uma série de vantagens, em especial, a possibilidade de revelar relacionamentos que para outros métodos estariam ocultos por não deterem tal capacidade de observação (Velasquez; Hester, 2013).

A atratividade do investimento, avaliada conjuntamente com a eficiência relativa da sua atividade, permite medir o ambiente da empresa e as perspectivas para o seu desenvolvimento (Goncharuk, 2011). Concentrando sua pesquisa, conforme proposição da sentença anterior, Goncharuk (2011) descreve que utilizou o modelo de supereficiência da DEA como base metodológica para análise da fronteira de produção e eficiência, adotando ferramentas de *benchmark* para o processo de tomada de decisão para escolha da alternativa ideal de investimento. O principal benefício da DEA é que ela pode ser aplicada a uma situação de mais de uma entrada e saída, onde há falta de qualquer informação prévia disponível sobre pesos (Dey *et al.*, 2021). Fato é que a DEA se ocupa em apurar a eficiência relativa entre as DMUs (Ang; Chen, 2016), desta forma, sugere-se que seja adotada em conjunto com outras ferramentas. Pois, mesmo com as vantagens aparentes da DEA, há uma série de desafios e limitações associadas ao seu uso.

A investigação explora, não apenas, as vantagens da DEA mas, também, identifica e discute suas limitações, proporcionando uma visão equilibrada e crítica sobre a aplicabilidade dessa metodologia na prática empresarial. Isto porque a seleção das variáveis de entrada e saída é crítica, podendo influenciar significativamente nos resultados. Porém, há outra situação igualmente determinante para o sucesso do uso da DEA. A técnica assume que todos os dados de entradas e saídas estão determinados, conhecidos, disponíveis e perfeitamente exatos (Wang; Greatbanks; Yang, 2005). Em seu estudo, Wang, Greatbanks e Yang (2005) descrevem que essa característica, de não lidar com a imprecisão de dados, é limitante para a DEA pois, em situações do mundo real, isso nem sempre é verdadeiro. Ressaltam, contudo, que avaliar a eficiência em ambientes difusos é algo que merece ser estudado pela necessidade de observar a realidade das organizações com diferentes contextos operacionais e estratégicos.

Apesar desses desafios, a DEA tem o potencial de revelar aspectos valiosos para a definição de investimentos em bens de capital, subsidiando o processo decisório com resultados que contribuirão para a assertividade da decisão pelas organizações. Portanto, o objetivo deste trabalho é explorar a aplicação da DEA nesse contexto. Aliar a técnica DEA a outras ferramentas, desde as tradicionais financeiras até soluções como os ICs. Espera-se, desta forma, que este estudo contribua para o entendimento mais profundo dos métodos de avaliação de eficiência em investimentos de bens de capital, oferecendo subsídios tanto para pesquisadores quanto para gestores que buscam otimizar o uso de recursos em suas organizações. A identificação das contribuições e limitações da DEA pode orientar futuras pesquisas e aplicações práticas, aprimorando e ampliando a assertividade das decisões de investimento no ambiente corporativo.

O problema de pesquisa, a ser abordado durante o desenvolvimento do trabalho, deve ser identificado na etapa inicial, destacando-se que a concepção da pesquisa vai além da escolha de um problema qualquer, envolve a identificação de uma questão científica relevante e digna de investigação (Lozada; Nunes, 2019). Etapa importante é a de conscientização, pois está ligada a compreensão profunda do problema a ser solucionado e comprehende as etapas de definição e formalização (Lacerda *et al.*, 2013).

Considerando a complexidade inerente à análise e às decisões entre alternativas de investimento em bens de capital, o problema central desta pesquisa reside na seguinte questão: Como calcular e avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com ICs por meio da utilização da DEA?

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção, são expostos o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com ICs por meio da DEA.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender e reforçar o objetivo geral desta pesquisa, os objetivos específicos que foram desenvolvidos seguem abaixo:

- i. Propor procedimento para avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA;
- ii. Testar o procedimento de avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA, identificando as opções mais eficientes;
- iii. Analisar os resultados, contribuições e limitações da avaliação de investimentos em bens de capital com ICs por meio da DEA.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para clarificar sua importância e relevância, é fundamental que a pesquisa promova a expansão do conhecimento científico e solucione problemas enfrentados pelas organizações. Na área acadêmica, o pesquisador pode propiciar a ampliação dos conhecimentos teóricos já existentes e, também pode identificar lacunas ainda não exploradas, embasando a discussão sobre o tema escolhido. No campo

empresarial, a colaboração está relacionada com a proposição de medidas para a resolução de problemas e abordagens para o aprimoramento do desempenho e resultados organizacionais. Desta forma, identificar e expor as justificativas acadêmica e empresarial é o que compete a esta seção do estudo.

Uma lacuna teórica, um problema real ou a observação de algum fenômeno podem significar o ponto de partida para uma pesquisa (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). É através do processo de revisão da literatura existente que se identifica e contextualiza o estágio atual do conhecimento sobre o tema, suas lacunas e justifica a relevância do estudo. A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é um dos métodos que pesquisadores podem aplicar em suas pesquisas exploratórias (Oliveira; Lima; Montevechi, 2016). A RSL foi adotada para apoiar a pesquisa como um todo e fundamentar a justificativa acadêmica do presente estudo. Realizar a RSL oferece compreensão ampla e robusta do conhecimento existente, permitindo ao pesquisador acompanhar os avanços nas áreas de interesse, evitando desconsiderar estudos prévios que poderiam produzir trabalhos desnecessários, inadequados, sem a devida relevância e, até mesmo, antiéticos (Morandi; Camargo, 2015). A RSL é uma técnica significativa para o exame da literatura, aumenta as chances de sucesso em uma pesquisa científica exploratória e propicia visão mais densa de dados bibliográficos ao pesquisador (Oliveira; Lima; Montevechi, 2016).

Quadro 1: Resumo da Revisão Sistemática da Literatura

Etapas RSL	Bases de Dados	Critérios de inclusão	Termos de Busca
1ª etapa	Scopus e Web of Science	Identificar e selecionar documentos que aplicam a DEA à análise de investimentos em bens de capital.	("dea" OR "data envelopment analysis" OR "benefit-of-the-doubt") AND ("investment" OR "acquisition" OR "purchase") AND ("capital good" OR "capital goods" OR "capital asset" OR "capital assets")
2ª etapa	Scopus e Web of Science	Identificar e selecionar documentos que aplicam a DEA associada, concomitantemente, com ICs.	("dea" OR "data envelopment analysis" OR "benefit-of-the-doubt") AND ("composite indicators")

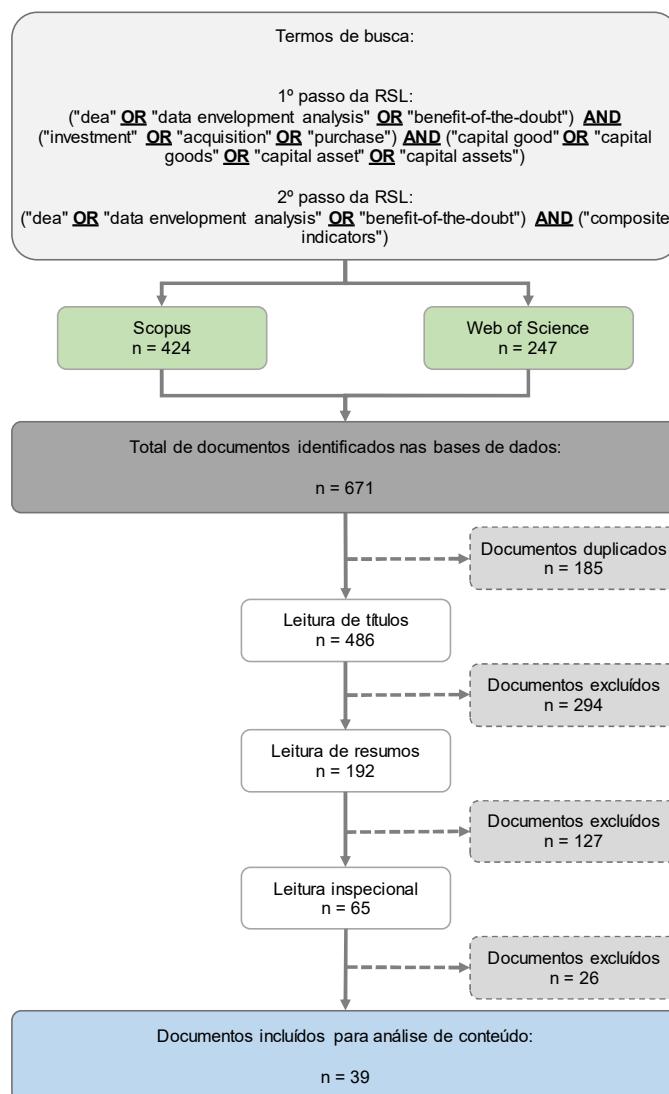
Fonte: elaborado pelo autor

A presente pesquisa propõe explorar a aplicação de ICs através da DEA como forma de avaliar a eficiência em investimentos em bens de capital. Para cumprir esta finalidade, foi realizada uma RSL com busca de artigos científicos nas bases de

dados Scopus e Web of Science. O Quadro 1 apresenta as etapas, as bases de dados, os critérios de inclusão e os termos de busca utilizados na RSL.

Conforme apresentado pelo Quadro 1, a RSL foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foram aplicados termos de busca com o propósito de identificar e selecionar artigos científicos com aplicação da DEA na análise de investimentos em bens de capital. Os termos de busca da segunda etapa foram selecionados com o objetivo de abranger estudos com aplicação da DEA concomitantemente com ICs. Não houve qualquer limitação temporal para o horizonte de publicações, pela quantidade limitada de documentos nessa área específica.

Figura 1: Fluxograma de resultados da RSL



Fonte: elaborado pelo autor, adaptando Morandi e Camargo (2015)

A RSL foi realizada com termos de busca na língua inglesa, porém, foram considerados documentos (artigos, livros, capítulos de livros e conferências) nos idiomas Português e Inglês. Para descartar os documentos inelegíveis ao estudo, foram aplicados os seguintes critérios de exclusão: idioma diferente de inglês e português; que não atendam aos critérios de inclusão; duplicados; sem acesso ao documento completo. O protocolo utilizado está disponível nos anexos, identificado pelo título, Anexo 1: Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura (RSL). O estudo teve como escopo final e análise detalhada de conteúdo para o total de 39 documentos. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de busca e elegibilidade de documentos aplicado na RSL da pesquisa.

As duas etapas da busca, desenvolvidas na RSL, resultaram no total de 671 documentos. Destes, 424 foram oriundos da base de dados Scopus e 247 da Web of Science. Após a eliminação de 185 artigos duplicados, o resultado foi de 486 que passaram pela avaliação de seus títulos, dos quais, 294 foram excluídos por falta de aderência ou baixa ligação com o estudo. Do exame de títulos, resultaram 192 publicações que receberam a leitura de seus resumos, sendo que 127 foram retirados por não atendimento dos critérios de inclusão. Para o saldo de 65 trabalhos, foi aplicada a leitura inspecional, onde 26 foram excluídos, restando 39 documentos que foram trabalhados na presente pesquisa. A relação completa pode ser consultada nos anexos desta dissertação, intitulada Anexo 2: Lista de documentos selecionados na RSL.

A relevância científica da pesquisa parte de sua contribuição para expandir o conhecimento do que foi publicado anteriormente sobre o tópico em estudo (Luft *et al.*, 2022). Embora existam inúmeras pesquisas que aplicam a técnica DEA para avaliação da eficiência, poucos trabalhos exploram sua aplicação, especificamente, no contexto dos investimentos. A principal justificativa acadêmica para o presente estudo consiste na sua originalidade, em razão da escassez de estudos que tratam desses temas de forma integrada. Os Quadros 2 e 3, disponíveis no item 2.4, confirmam esta justificativa. De uma pesquisa que, após exclusão de duplicados, localizou 486 títulos diferentes, apenas 6 documentos possuíam sinergia e aderência com o tema. Ainda assim, somente a metade aborda DEA no modelo da Função de Distância Direcional, traduzido do inglês, *Directional Distance Function* (DDF) e,

nenhum desenvolve todos os itens propostos por esta pesquisa. Neste conjunto de artigos selecionados, não há aplicação de BoD, nem tão pouco de ICs. Comprova-se o ineditismo que se pretende atingir com a condução deste trabalho acadêmico, ao buscar reunir todos esses aspectos: DEA, DEA modelo DDF, BoD e ICs aplicados à análise da eficiência em investimentos de bens de capital. Outra importante contribuição reside na construção, definição e delimitação das fases e atividades do Procedimento para avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA (apresentado na Figura 5).

A avaliação da eficiência em investimentos em bens de capital tem destacada importância pois envolve a alocação ótima de recursos independente do contexto, seja de abundância de capital financeiro ou de restrições econômicas. A abordagem baseada na DEA permite a avaliação do desempenho relativo das DMUs ao comparar múltiplas entradas e saídas, incluindo ICs que sintetizam variáveis multidimensionais. Além disso, a inclusão de saídas indesejáveis na modelagem contribui para uma avaliação mais realista dos investimentos, considerando aspectos como desperdícios, custos não planejados e impactos ambientais, que podem comprometer a eficiência global dos investimentos.

Pelo exposto, o presente estudo contribui para a literatura existente em distintos contextos. Primeiro, na aplicação da DEA para avaliação da eficiência no contexto de investimentos em bens de capital. Segundo, por aplicar a DEA no modelo DDF para investigar saídas indesejadas. Terceiro, por examinar ICs com abordagem do BoD. Quarto, o estudo fornece um procedimento para construção e aplicação da Avaliação da Eficiência de Investimentos em Bens de Capital através de ICs por meio da DEA. Quinto, a partir do conhecimento dos autores e documentos selecionados, nenhum estudo implementou, ainda, a modelagem combinada com DEA, DEA DDF, BoD e ICs.

Medir a eficiência tem sido um assunto de grande interesse e importância à medida que as organizações têm se esforçado para melhorar sua produtividade (Cook; Seiford, 2009). Desta forma, o estudo contribui para a prática profissional ao possibilitar a aplicação de um modelo estruturado que não apenas avalia, mas, também, promove a evolução contínua dos processos de análise, decisão, apuração

e desenvolvimento de aprimoramentos das técnicas de análise para investimento em bens de capital.

O interesse pelo tema provém da atividade profissional do autor do presente estudo. Tem origem na atuação como gerente financeiro de uma empresa do segmento metalmecânico com matriz no noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Essa empresa comercializa seus produtos a nível nacional e internacional. O ramo de atuação demanda alto investimento em infraestrutura, máquinas, equipamentos e sistemas de gestão e informação, itens que compõem os bens de capital. A justificativa empresarial, portanto, está relacionada à necessidade de aprimorar a eficiência dos investimentos em bens de capital, considerando o impacto direto que as decisões de investimento têm sobre a competitividade e a sustentabilidade financeira das organizações. Como gerente financeiro de setor altamente dinâmico, é imprescindível identificar e priorizar alocações de recursos que maximizem o retorno do capital investido. Especialmente em cenários de escassez de recursos, custos de captação elevados, restrições orçamentárias e incertezas econômicas.

O procedimento proposto é aplicável sem restrições a porte de empresa, volume de investimento e segmento de atuação. Prevê a retroalimentação dos processos e etapas, podendo ser revisto e reconstruído à medida que suas etapas forem se realizando. A atuação de especialistas durante as fases do procedimento assegura flexibilidade e demonstra sua adaptabilidade a variados cenários. Em um ambiente corporativo em que atingir resultados positivos, recorrentes e constantes é uma necessidade, a capacidade de identificar as melhores práticas e corrigir ineficiências é um diferencial estratégico. A pesquisa, portanto, não só amplia o entendimento teórico sobre eficiência, mas também se conecta diretamente com desafios cotidianos da gestão financeira na análise de investimentos em bens de capital, permitindo que decisões com maior detalhamento e embasamento sejam implementadas para o fortalecimento da competitividade da empresa no mercado.

1.4 DELIMITAÇÕES

Este estudo busca oferecer uma análise detalhada, com utilização de ICs, sobre a eficiência das opções de investimentos em bens de capital por meio da

aplicação da DEA. A DEA apresenta elevado potencial para complementar os métodos tradicionais de avaliação de investimentos, pois permite a consideração de múltiplas entradas e saídas simultaneamente, transpondo limitações características desses métodos. A DEA tem sido amplamente utilizada em diversas áreas, como saúde, educação e transporte, para avaliar a eficiência de diferentes unidades. No entanto, sua aplicação na definição de investimentos de bens de capital ainda é pouco explorada.

A aplicação da DEA na definição de investimentos em bens de capital pode contribuir para o processo de tomada de decisão em razão de sua capacidade de atuação com diversas variáveis e elevado volume de informações. Pela complexidade do cenário que é avaliada, torna a escolha mais fundamentada, realista e com alta probabilidade de ser bem-sucedida ao apresentar os resultados. Isso pode resultar na alocação mais eficaz de recursos, o que é crucial em um ambiente de negócios cada vez mais competitivo. A utilização dos ICs pode viabilizar um volume maior de informações sendo analisadas.

Contudo, a aplicação da DEA, especificamente no cenário proposto por este estudo, de definição da alternativa ideal de investimentos em bens de capital, demanda análise aprofundada, problematização cuidadosa e modelagem assertiva. Ao fornecer uma perspectiva relativa de eficiência, a DEA é sensível à escolha dos *inputs* e *outputs*. Portanto, a definição adequada dessas variáveis é crucial para obter resultados relevantes e precisos. A seleção das variáveis apropriadas e a definição das DMUs, são exemplos de tarefas que demandam atenção e observação de critérios ajustados. Além disso, análise e interpretação dos resultados também são passos desafiadores ao aplicar a técnica DEA.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. Ao Capítulo 1 compete introduzir o contexto; apontar, previamente, aspectos teóricos; estabelecer o problema de pesquisa; determinar e expor os objetivos; apresentar as justificativas acadêmica e empresarial; delimitar o próprio campo de estudo. Ao Capítulo 2 cabe a fundamentação teórica, que sustenta o estudo, abordando os principais conceitos

associados a temas como produtividade, eficiência, ICs, BoD e DEA, em especial o modelo DDF.

O Capítulo 3 detém a responsabilidade de apresentar os procedimentos metodológicos para atingir os objetivos da pesquisa. É composto pelo delineamento da pesquisa; método de trabalho (destaque para a Figura 5: Procedimento para avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA); a seleção de DMUs e indicadores individuais, a coleta e tratamento de dados; configuração do modelo de DEA, e; os procedimentos aplicados para analisar os dados.

O Capítulo 4 divulga os resultados do teste do procedimento proposto pela pesquisa. Discorre sobre os indicadores individuais utilizados; a aplicação de DEA e o *ranking* de priorização dos projetos; a análise dos alvos e folgas para os indicadores individuais e; a análise dos *benchmarks*. O Capítulo 5 retoma os resultados apresentados no Capítulo 4 realizando uma discussão acerca destes, sendo finalizado com o quadro da síntese das principais contribuições teóricas e práticas da pesquisa. Por fim, o Capítulo 6, apresenta as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Precisão conceitual é elementar e, na relação lógica e sistêmica, definir e categorizar os termos relacionados aos sistemas de produção é tão importante quanto organizá-los e deter entendimento detalhado (Eidelwein *et al.*, 2016). Desta forma, o referencial teórico e os conceitos que concedem direcionamento para a presente pesquisa, estão apresentados a seguir.

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O desempenho das organizações pode ser definido de formas e maneiras diversas. Uma das alternativas de medição do desempenho é através da verificação do índice de produtividade, que é calculado como a razão entre produtos (resultados) e insumos (recursos), onde valores mais elevados deste índice estão associados a um melhor desempenho (Camanho; D'Inverno, 2023). Há vasta literatura que trata da concepção e implementação de ferramentas para medição e gestão de desempenho organizacional (Dey *et al.*, 2021). Desempenho é um conceito relativo exemplificado no desempenho de uma fábrica que pode ser medido e comparado com relação aos níveis do ano anterior ou em relação a outras fábricas (Camanho; D'Inverno, 2023). Em tempos de crise econômica e financeira é impreterível a análise do desempenho empresarial, em especial, com a finalidade de colaborar para aumento da eficiência (Rebelo; Matias; Carrasco, 2013).

Para medir o desempenho das organizações há três conceitos-chave: “produtividade”, “mudança de produtividade” e “eficiência” (Camanho; D'Inverno, 2023). Ao mencionar eficiência lembra-se, também, do termo eficácia. Com frequência, os seus conceitos são confundidos e/ou mal compreendidos (Meireles, 2023). A eficácia não foi desenvolvida nem considerada por este estudo. Cabe, no entanto, definir o conceito de ambas para estabelecer suas diferenças. Camanho e D'Inverno (2023) afirmam que a eficácia corresponde ao alinhamento dos resultados com a estratégia organizacional e implica em fazer o que é necessário, enquanto eficiência se configura em fazer bem o que se faz e, ambas, precisam estar ininterruptamente alinhadas e conectadas. Eficiência é a capacidade de realizar algo

com o mínimo de desperdício de insumo, enquanto eficácia é o grau de sucesso na obtenção do resultado desejado (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023).

Medição e gestão do desempenho são objetivos que precisam estar disseminados em todos os níveis da organização (Nudurupati *et al.*, 2011). Ao observar que eficiência, produtividade e aumento da produtividade são objetivos fortemente desejáveis, é fundamental defini-los conforme teoria econômica e fornecer informações válidas para gestores de organizações e pesquisadores (Camanho; D'Inverno, 2023).

2.1.1 Produtividade e mudança de produtividade

A produtividade é definida como a relação entre o volume de produção e o volume de insumos utilizados (OECD, 2001). Insumos são recursos usados para gerar bens e serviços (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023). Entre outros exemplos de insumos, Madaleno, Macedo e Moutinho (2023), citam: tempo dos trabalhadores, combustíveis, materiais, edifícios, capital financeiro, investigação e desenvolvimento, inovação e equipamentos; que, quando utilizados adequadamente, pela função de produção geram resultados. Produtividade é um conceito econômico fundamental, especialmente porque, sem adição de novos fatores de produção, é possível promover o aumento da produção e o crescimento econômico (Liu; Wu, 2019). Produção é representada pela quantidade de bens ou serviços produzidos em um período específico e, a função de produção, ou produtividade, é expressa pela relação entre as quantidades de fatores produtivos ou insumos utilizados e a quantidade de produtos obtidos (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023).

Em um cenário amplo, a produtividade exprime como um processo faz uso de seus recursos para produzir (Piran; Lacerda; Camargo, 2021). A abordagem econométrica para medir a produtividade ocupa-se somente da observação do volume de produtos e insumos, evitando postular verificação da relação de elasticidade de produção e rendimento, que pode ou não corresponder à realidade (OECD, 2001). O índice de produtividade é obtido através da relação entre produtos e insumos, onde o melhor desempenho é apresentado quando maiores forem os valores de resultado (Coelli *et al.*, 2005). A produtividade relaciona o volume de itens

produzidos com a quantidade de insumos, representando a medida absoluta que considera a relação entre os resultados (*outputs*) gerados e os recursos (*inputs*) utilizados em um processo ou sistema (Piran; Lacerda; Camargo, 2021), definição apresentada na Equação 1.

Equação 1: Definição de produtividade

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Outputs (saídas)}}{\text{Inputs (entradas)}} \quad (1)$$

Fonte: (Piran; Lacerda; Camargo, 2021)

A produtividade é um conceito estático ou de nível, utilizado para comparar o desempenho de uma empresa em um momento específico, permite medir as diferenças em níveis de produtividade da própria empresa ou entre empresas (Meireles, 2023). Entretanto, mudança de produtividade é um conceito dinâmico que avalia a evolução da produtividade ao longo do tempo (Coelli *et al.*, 2005). O aumento da produtividade é o principal motor da prosperidade econômica, dos padrões de vida e da competitividade de um país, por isso, tem atraído o interesse de decisores políticos e pesquisadores (Lin; Chen; Chen, 2013). Melhorar a eficiência é componente chave do crescimento da produtividade que, por sua vez, gera resultados econômicos relevantes para as organizações (Camanho; D’Inverno, 2023).

2.1.2 Eficiência

Eficiência é o grau em que um processo de produção reflete as melhores práticas (OECD, 2001). Geralmente a eficiência está associada ao nível mais alto de desempenho, ou seja, a menor utilização de insumos alcançando o maior volume de resultado (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023). A comparação entre os valores observados ou realizados e os valores ótimos dos *inputs* consumidos e dos *outputs* produzidos é o que corresponde a medida da eficiência de um sistema ou atividade (Rebelo; Matias; Carrasco, 2013).

Frequentemente eficiência e produtividade são, erroneamente, apresentadas como termos sinônimos (Meireles, 2023; Piran; Lacerda; Camargo, 2021). A

definição de produtividade difere da de eficiência (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023). A eficiência se envolve com a capacidade da empresa em melhorar suas vantagens competitivas (Meireles, 2023). Eficiência é um conceito mensurável e, definido a partir da relação entre a produção útil e a entrada total (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023). Na Equação 2, Piran, Lacerda e Camargo (2021) estabelecem o comparativo entre os conceitos de produtividade e eficiência.

Equação 2: Eficiência X Produtividade

$\text{Produtividade} = \frac{\text{Outputs (saídas)}}{\text{Inputs (entradas)}}$ $\text{Eficiência} = \frac{\text{Outputs (saídas)}}{\text{Inputs (entradas)}} \text{ realizada e COMPARADA com } \frac{\text{Outputs (saídas)}}{\text{Inputs (entradas)}} \text{ máxima}$	(2)
--	-----

Fonte: Piran, Lacerda e Camargo (2021)

Eficiência é a medida comparativa que representa o aproveitamento dos recursos disponíveis, ou seja, identifica o que foi produzido com a aplicação de determinados recursos comparando esse resultado ao que poderia ter sido produzido com o emprego dos mesmos recursos (Piran; Lacerda; Camargo, 2021). O conceito de eficiência está vinculado à noção de desempenho e produtividade, conceitos relativos que medem a transformação de insumos em produtos (Meireles, 2023). Compreender a relação entre eficiência e produtividade é relevante ao medir o desempenho organizacional (Camanho; D'Inverno, 2023).

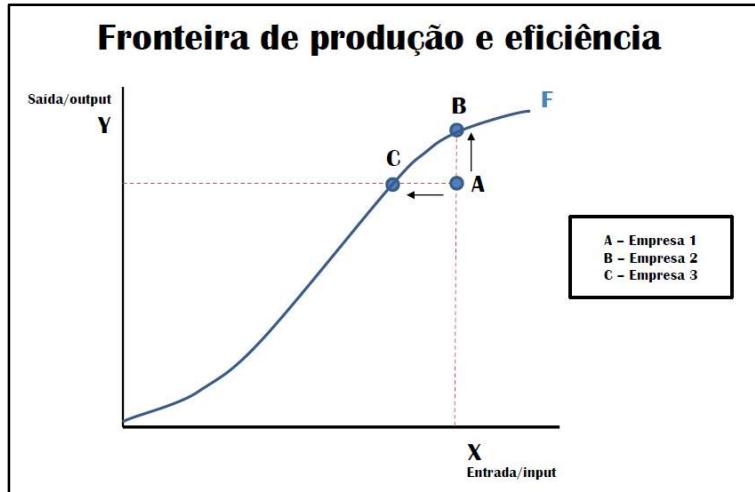
Eficiência é uma medida de excelência operacional diretamente ligada à produtividade, que busca, portanto, minimizar custos e melhorar as margens operacionais da organização (Meireles, 2023). Tanto insumos quanto produtos devem estar correlacionados, há consenso, na literatura, de que a eficiência é obtida ao minimizar os *inputs* ou maximizar os *outputs* (Rebelo; Matias; Carrasco, 2013). Portanto, a definição de eficiência está associada à noção de desempenho e produtividade, conceitos relativos que mensuram a conversão de insumos em produtos (Meireles, 2023), o resultado é obtido da relação entre produtos e insumos, onde maiores valores representam desempenhos melhores (Coelli *et al.*, 2005).

2.1.3 Fronteira de Produção e/ou Eficiência

A análise da eficiência de sistemas produtivos requer a realização do estudo e levantamento das fronteiras de produção (Camargo Junior; Matias; Marques, 2004). Em qualquer organização, o estudo sobre a eficiência, passa, necessariamente, pela definição da fronteira de eficiência (Périco; Rebelatto; Santana, 2008). O conjunto de unidades produtivas que, ao abrigar determinado paradigma tecnológico, atinge a quantidade máxima de produção ao aplicar certo conjunto de insumos, é considerado mais eficiente quando comparado a outros com menor produção (Camargo Junior; Matias; Marques, 2004). A fronteira, nada mais é, do que o máximo de produtividade para uma determinada quantia de recursos, ficando estabelecido que, as organizações mais eficientes são as que alcançam maior produtividade, consumindo menos recursos (Périco; Rebelatto; Santana, 2008). A fronteira é a linha, ou a curva, que separa as duas regiões: eficiência e ineficiência (Camargo Junior; Matias; Marques, 2004). A fronteira de produção eficiente é obtida ao identificar os pontos em que o maior produto é produzido pela aplicação do insumo mínimo (Meireles, 2023). A fronteira de eficiência revela a máxima combinação de produtos que podem ser produzidos para determinado conjunto de insumos (Li; McNeil, 2021).

A Figura 2 apresenta a Fronteira de Produção e Eficiência (Curva F), que revela o valor máximo possível de produção (*output*) em relação a entrada (*input*) que o sistema dispõe (Piran; Lacerda; Camargo, 2021). Neste caso, a “Empresa 1” apresenta desempenho menos eficiente que as “Empresas 2 e 3”. Há duas formas para que a “Empresa 1” atinja o mesmo nível de eficiência das outras duas empresas. A primeira opção é manter o seu consumo atual (*input*) e aumentar sua produção (*output*) para o mesmo nível da “Empresa 2”. A segunda opção é manter sua produção (*output*) nos níveis atuais e reduzir o consumo (*input*) ao volume da “Empresa 3”.

Figura 2: Fronteira de Produção e Eficiência



Fonte: Piran, Lacerda e Camargo (2021)

2.2 MODELOS DEA E DDF

A DEA é uma técnica que estima o melhor desempenho entre unidades de produção ao avaliar o consumo de insumos e a conversão em produtos (Silva; Camanho; Barbosa, 2020). Ao aplicar a DEA, realiza-se a análise da eficiência relativa na transformação de insumos em produtos, onde a DMU pode ser uma empresa, um setor específico de uma organização, um hospital, uma escola, uma região ou qualquer outra entidade com funções semelhantes (Seth *et al.*, 2024). Estimar a fronteira em contextos de produção é, normalmente, onde a DEA é aplicada, ou seja, onde os insumos são transformados em produtos (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020). A DEA avalia os dados para identificar os pontos em que o maior produto é produzido pela aplicação do menor insumo (Meireles, 2023).

Empregar uma relação de entrada e saída, estimando as pontuações de eficiência relativa para as DMUs, é o que a DEA tem capacidade de realizar como técnica não paramétrica, atribuindo índice entre ou iguais a 0 e 1, em que 0 indica ineficiência e 1 indica eficiência (Seth *et al.*, 2024). A DEA fornece uma pontuação, ou medida de eficiência, para cada uma das DMUs avaliadas, além de informações sobre as metas que foram utilizadas na avaliação de eficiência para identificar as DMUs ineficientes (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020). As metas desempenham relevante papel pois reproduzem os níveis de insumos e produtos que uma DMU

ineficiente precisa atingir para tornar seu desempenho eficiente (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020).

A DEA tem a capacidade de lidar com muitos recursos e, simultaneamente, com unidades dimensionais diferentes (Mahla *et al.*, 2023). Desde que a DEA foi estabelecida, os pesquisadores desenvolveram diversas maneiras para aplicar o conceito de ineficiência técnica, definindo-o como a distância entre cada DMU analisada e a fronteira de eficiência estimada (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020). Através do uso da DEA, é possível mensurar qual ajuste é necessário nos *inputs* ou nos *outputs* para atingir o nível eficiente de conversão de insumos em produtos (Meireles, 2023). A DEA revela-se adequada para medição da eficiência pois, cada uma das DMUs, recebe metas de melhoria de eficiência a partir dos resultados apurados na aplicação da técnica (Seth; Chadha; Sharma, 2021).

A distância até a fronteira de melhores práticas é uma medida de eficiência, pois apresenta quanto a produção deve ser aumentada ao manter a mesma quantidade de insumos ou, quanto os insumos devem diminuir enquanto se mantém a mesma produção de produtos (Silva; Camanho; Barbosa, 2020). A projeção da DMU na fronteira de eficiência é o que identifica cada uma dessas formas diferentes de aplicação para a técnica DEA, onde as, comumente mais utilizadas, são as seguintes: medidas radiais, funções de distância direcional, a medida hiperbólica, medidas aditivas ponderadas, as medidas Russell, dentre outras (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020). Além disso, existem uma série de variações do modelo clássico DEA, e, dentre eles, destaca-se o modelo da Função da Distância Direcional (*Directional Distance Function – DDF*).

Acomodar, ao mesmo tempo, indicadores de resultados desejáveis e indesejáveis, é plenamente possível através da utilização da DDF (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023; Silva; Camanho; Barbosa, 2020). A capacidade de poder ser usada para medir a eficiência e a produtividade da DMU no aumento da produção desejável e na redução da produção indesejável, porque permite expandir uma produção e contrair outra saída simultaneamente, é o grande mérito da função de distância de saída direcional (Lin; Chen; Chen, 2013).

Em situações que a DMU apresenta uma direção de projeção clara, a aplicação da abordagem convencional, que maximiza melhorias nessa direção até

alcançar o alvo eficiente, é adequada. Entretanto, quando a DMU não tem a direção de melhoria tão evidente, é apropriado explorar diferentes possibilidades e determinar a quantidade máxima de melhoria correspondente na direção projetada, ou seja, identificar qual a distância até a fronteira eficiente (Lozano; Soltani, 2020). A DDF evita a necessidade de ajustes de escalas e a normalização de indicadores, sendo possível considerar indicadores que tenham tanto resultados desejáveis como indesejáveis, aplicando suas escalas de medição originais (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023).

Abaixo, estão representadas as Equações 3 e 4, utilizadas na aplicação da modelagem do presente estudo. O conceito de DDF, com base em um dado vetor direcional $g(-x, -y_b, y_g)$, tem por princípio, simultaneamente, expandir as saídas desejáveis (y_g) e reduzir as entradas (x) e as saídas indesejáveis (y_b) (Chung; Färe; Grosskopf, 1997). A mudança de direção para as entradas (x), saídas desejáveis (y_g) e indesejáveis (y_b) é indicada pelo vetor direcional (g^\rightarrow). A tecnologia de produção (T), como as fórmulas (3) e (4) apresentam, constitui o conjunto de todas as entradas e saídas viáveis para um determinado processo de produção (ou qualquer sistema sob avaliação). Na expressão (4), (D^\rightarrow) representa a DDF e seu objetivo é maximizar a melhoria potencial existente (β) para escalar entradas e saídas desejáveis/ indesejáveis dentro da tecnologia e sua fronteira eficiente, definindo as melhores práticas (*benchmarks*). A ineficiência ou a distância da fronteira pode ser interpretada como o valor ótimo para (β), ou seja, o escopo de melhoria para uma DMU (k) que está sendo avaliada.

Equações 3 e 4: Modelo DDF

$T = \{(x, y_b, y_g) : x \text{ pode produzir } y_b \text{ e } y_g\}$	(3)
$D^\rightarrow (x, y_b, y_g, g_x, g_{y_b}, g_{y_g}) = \beta : (x - \beta \cdot g_x , y_b - \beta \cdot g_{y_b} , y_g + \beta \cdot g_{y_g}) \in T$	(4)

Fonte: (Chung; Färe; Grosskopf, 1997)

2.3 ICs COM ABORDAGEM BoD EM MODELOS DEA E DDF

Indicador é a medida quantitativa ou qualitativa, resultado de fatos observados que revelam posições relativas à determinada área que, ao ser regularmente mensurado, identifica e demonstra a tendência e direção ao longo do tempo (OECD, 2008). Já um IC é formado a partir da agregação de dois ou mais indicadores-chave de desempenho, ou seja, a utilização dos ICs possibilita, em uma única medida, refletir conceitos multidimensionais (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). ICs têm como base subindicadores ou indicadores individuais (Saisana; Tarantola, 2002). A compilação de indicadores individuais forma um IC, possibilitando que a verificação de atributos variados ocorra, o que seria impossível através de um único indicador individual (OECD, 2008).

Um IC é um agregado de todas as dimensões, objetivos, indicadores individuais e variáveis que o compõe, ou seja, um IC é definido como o conjunto de propriedades subjacentes à sua convenção de agregação (Munda; Nardo, 2009). A construção de ICs é aplicável a variadas finalidades, sendo um processo útil, especialmente, para sintetizar fenômenos sociais e econômicos complexos (Fusco, 2015). Entre os principais benefícios dos ICs estão a capacidade de resumir informações complexas, a facilidade de interpretar seus resultados em comparação com uma bateria de indicadores individualizados separadamente e a capacidade de reduzir o tamanho visível de um conjunto de indicadores sem suprimir a informação de base subjacente (OECD, 2008).

A construção de ICs tem sido relacionada à DEA, especialmente, através da vinculação com o modelo BoD (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020). ICs são cada vez mais aceitos como ferramentas úteis sob a abordagem de BoD, através de modelos DEA utilizados para implementação de sistemas de ponderação flexíveis (Silva; Camanho; Barbosa, 2020). A DEA é vinculada à construção de ICs nas ciências sociais por meio do modelo chamado BoD (Lahouel *et al.*, 2022). Fusco (2015) indicou um método de ponderação com penalidades direcionais usando um modelo de BoD para considerar a estrutura de preferências entre indicadores simples, permitindo estimar tanto a direção como a intensidade das taxas médias de substituição. BoD é o modelo de DEA sem entradas explícitas que tem por objetivo

determinar uma pontuação de eficiência para cada DMU, considerando subindicadores individuais como saídas e uma entrada unitária fictícia, gerando um indicador de desempenho global e agregado, o IC (Lahouel *et al.*, 2022).

Há poucas ferramentas com a capacidade de explorar cenários e fenômenos complexos e multifacetados como os ICs, que são extremamente úteis e provam sua importância ao contribuir e orientar processos de tomada de decisão (Pereira *et al.*, 2021). Madaleno, Macedo e Moutinho (2023) discorrem que pela construção de ICs em BoD é obtida a medida global de desempenho através da agregação de indicadores individuais, que forçam os métodos de fronteira a refletir o desempenho multidimensional além do cenário de produção tradicional, ao restringir a transformação de fatores de produção em produtos. Ao rever formulações alternativas de ICs, inclui-se o IC BoD baseado em DDF, pois permite agrregar indicadores desejáveis e indesejáveis (Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023). Para propor modelos aprimorados, que podem atuar, simultaneamente, com resultados desejáveis e indesejáveis, a literatura tem avançado, significativamente, nas avaliações do BoD (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023).

Em seguida, está representada a Equação 5. Esta equação apresenta a fórmula proposta por Zanella, Camanho e Dias (2015) para o IC com modelo direcional BoD.

Equação 4: IC com modelo direcional BoD

$$\begin{aligned}
 \vec{D}(y, b, \mathbf{1}; g) = \max \delta \\
 \text{s.t. } & \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rj0} + \delta g_y \quad r = 1, \dots, s \\
 & \sum_{j=1}^n b_{kj} \lambda_j \leq b_{kj} - \delta g_b \quad \kappa = 1, \dots, l \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad j = 1, \dots, n \\
 & \lambda_j \geq 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

Fonte: (Zanella; Camanho; Dias, 2015)

Na Equação 5, b_{kj} ($\kappa = 1, \dots, l$) são os indicadores que devem ser reduzidos para a DMU e, j ($j = 1, \dots, n$) e y_{rj} ($r = 1, \dots, s$) são os indicadores que devem ser aumentados. Os componentes do vetor $g = (g_y, -g_b) = (y_{rj} - b_{kj0})$ indicam mudança da direção para os indicadores. As saídas indesejáveis e desejáveis são contraídas e expandidas, respectivamente, de acordo com uma direção que corresponde a mudanças proporcionais aos níveis originais, sempre que o vetor direcional é especificado como o valor atual dos indicadores para a DMU sob avaliação.

A extensão da ineficiência da DMU é indicada pelo fator δ . Equivale e revela à contração dos indicadores indesejáveis e à expansão máxima dos indicadores desejáveis que podem ser alcançados simultaneamente. O valor do IC do modelo BoD direcional, é a medida de eficiência que pode ser obtido como $(1 - \delta)/(1 + \delta)$ quando o vetor direcional é especificado como o valor atual das saídas para a DMU em avaliação.

Uma das principais contribuições do modelo IC Direcional BoD é o redesenho da fronteira eficiente (Zanella; Camanho; Dias, 2015). A fim de evitar segmentos descendentes na fronteira, Zanella, Camanho e Dias (2015), substituíram a restrição de igualdade relacionada aos resultados indesejáveis por uma restrição de desigualdade “menor ou igual a”. Essa restrição é semelhante à imposta às entradas em modelos tradicionais de função de distância direcional, onde reduções proporcionais aos níveis dessas variáveis são buscadas. Isso garante que uma DMU só é classificada como eficiente quando nenhuma melhoria adicional nas saídas desejáveis e indesejáveis for possível (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023).

Adicionalmente, na Equação 5, Zanella, Camanho e Dias (2015), modificaram a restrição de entrada, passando a utilizar um nível unitário de entrada para todas as DMUs e definindo o vetor direcional como $g = (g_y, -g_b, 0)$, que permite, simultaneamente, expandir as saídas desejáveis e contrair as indesejáveis, mantendo as entradas fixas. A restrição de entrada $\sum_{j=1}^n \lambda_j \leq 1$ foi alterada para $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$. Através dessa restrição de igualdade se pretende obter uma fronteira que seja apropriada para avaliações envolvendo agregação de indicadores de desempenho expressos como razões, como é o caso de ICs.

A aplicação da DEA com DDF, é um exemplo dos diversos métodos que têm sido propostos na literatura para a construção de ICs (Silva; Camanho; Barbosa, 2020). Fusco (2015), propôs em seu artigo, uma abordagem para aprimorar questões não compensatórias, considerando a estrutura de preferência entre indicadores simples e introduzir penalidades direcionais em um modelo BoD. Lahouel *et al.* (2022) desenvolveram um IC a partir da DEA aplicando DDF baseado, especificamente, no modelo de BoD, com o objetivo de agregar duas dimensões de indicadores socioambientais com desempenhos bons e ruins.

Como já mencionado, a DEA é utilizada para construção de ICs através de uma abordagem do tipo BoD (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). Aparicio, Kapelko e Monge (2020) apresentam, em seu artigo, um modelo para avaliação de desempenho de unidades decisórias em que são construídos ICs baseados na verificação e determinação da menor distância de cada DMU até a fronteira de eficiência que é calculada por meio da DEA. Através da DDF é possível construir ICs que têm a capacidade de trabalhar com indicadores que apresentem resultados desejáveis e indesejáveis (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). Desta forma, além do BoD, este trabalho também utiliza a técnica da DEA DDF pois a análise de investimentos em bens de capital envolve indicadores que apresentam tanto resultados desejáveis, quanto indesejáveis.

2.4 ESTUDOS RELACIONADOS

Após a realização da análise de conteúdo dos artigos elencados na RSL, foram identificados 6 documentos com maior aderência ao tema da presente dissertação. Os documentos e o resumo de seus aspectos relevantes, constam nos Quadros 2 e 3. O Quadro 2 apresenta um resumo da análise de conteúdo de cada artigo e o Quadro 3 o mapeamento das entradas e saídas utilizadas em cada estudo.

Quadro 2: Estudos relacionados ao tema - Resumo da análise de conteúdo

nº	Título do Documento	Autor(es)	Ano de Publicação	Aplica DEA?	Aplica DEA a Investimentos?	Se aplica a DEA a Investimentos, qual o foco do estudo?	Aplica DEA DDF (Saídas Indesejáveis)?	Aplica BoD (Benefício da Dúvida)?	Aplica IC ?	Aplica DEA + IC ?
1	An investment analysis for China's sustainable development based on inverse data envelopment analysis	CHEN, Lei; WANG, Yingming; LAI, Fujun; FENG, Feng	2017	Sim	Sim	29 províncias, regiões autônomas e municípios da China continental	Sim	Não	Não	Não
2	Benchmarking for investment decisions: A case of food production	GONCHARUK, Anatoliy G.	2011	Sim	Sim	Atratatividade de Investimentos Financeiros para investidores em empresas. Para teste do método, o artigo o aplica na análise da atratatividade de investimento indústria cervejeira da Ucrânia.	Não	Não	Não	Não
3	Data envelopment analysis for highway asset investment assessment	Li, Joshua Qiang; MCNEIL, Sue	2021	Sim	Sim	Avaliar diferentes cenários de investimento em rodovias, para os ativos pavimentos, pontes e sinalização de trânsito.	Sim	Não	Não	Não
4	Investment Projects Ranking with DEA Method Considering Feasibility Study Results	SEBT, M V; JUYBARI, M N; SOLEIMANFAR, V R	2018	Sim	Sim	Avaliar e classificar, com base em 5 indicadores financeiros, através da técnica DEA, 15 oportunidades de investimento que uma empresa iraniana de investimento possui.	Não	Não	Não	Não
5	Linking investment decisions-based on firm performance and open innovation practices in Vietnam's wire and cable market using data envelopment analysis models	NGUYEN, Phi Hung; NGUYEN, Thi Ly; WANG, Chia Nan; VU, Minh Duc; THI NGUYEN, Lan Anh; PHAM, Hong Anh; THI PHAM, Mai Anh; LE, Hong Quan	2023	Sim	Sim	Investigar as ligações entre decisões de investimento, práticas de inovação aberta e desempenho das empresas no mercado de fios e cabos do Vietnã.	Não	Não	Não	Não
6	Performance evaluation and investment analysis for container port sustainable development in China: An inverse DEA approach	LIN, Yang; YAN, Longzhong; WANG, Ying Ming	2019	Sim	Sim	Investimento para desenvolvimento sustentável de portos.	Sim	Não	Não	Não

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 3: Estudos relacionados ao tema - Entradas e Saídas aplicadas

nº	Título do Documento	Autor(es)	Ano de Publicação	Entradas	Saídas
1	An investment analysis for China's sustainable development based on inverse data envelopment analysis	CHEN, Lei; WANG, Yingming; LAI, Fujun; FENG, Feng	2017	- Número de pessoas empregadas - Estoque de capital - Consumo Total de Energia	Saída desejável: - Produto Regional Bruto (PRB) Saídas indesejáveis: - Volume total de dióxido de enxofre emitido (SO ₂) - Volume total de demanda química de oxigênio (DQO) descarregada - Volume total de emissões de dióxido de carbono (CO ₂)
2	Benchmarking for investment decisions: A case of food production	GONCHARUK, Anatoliy G.	2011	- Custos Operacionais Totais - Depreciação do Ativo Imobilizado - Passivo Total	- Vendas líquidas - Capital de Giro Líquido
3	Data envelopment analysis for highway asset investment assessment	LI, Joshua Qiang; MCNEIL, Sue	2021	- Custos de capital inicial - Custos anuais de manutenção	- Custos para o usuário/ Distância percorrida - Custos externos (ligados a emissão de poluentes e acidentes)
4	Investment Projects Ranking with DEA Method Considering Feasibility Study Results	SEBT, M V; JUYBARI, M N; SOLEMYMANFAR, V R	2018	- Investimento Total - Custo Anual de Produção	- Taxa Interna de Retorno - Ponto de Equilíbrio - Lucro Anual
5	Linking investment decisions-based on firm performance and open innovation practices in Vietnam's wire and cable market using data envelopment analysis models	NGUYEN, Phi Hung; NGUYEN, Thi Ly; WANG, Chia Nan; VU, Minh Duc; THI NGUYEN, Lan Anh; PHAM, Hong Anh; THI PHAM, Mai Anh; LE, Hong Quan	2023	- Ativo Total - Passivo Total	- Receita Total - Lucro Bruto
6	Performance evaluation and investment analysis for container port sustainable development in China: An inverse DEA approach	LIN, Yang; YAN, Longzhong; WANG, Ying Ming	2019	- Comprimento do berço - Ativo do equipamento - Número de Funcionários - Custo	Saídas desejáveis: - Produção (milhões de toneladas) - Lucro Saídas indesejáveis: - Emissão de CO ₂ (toneladas) - Emissão de NOx (toneladas)

Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 2, é possível observar que todos os 6 documentos abordam a DEA e a aplicam a alguma área de análise de investimentos. Porém, nenhum dos 6 documentos aborda todos os itens relevantes para a pesquisa. Apenas os itens 3 e 6 estudam a eficiência em investimentos em bens de capital. E ainda, apenas metade dos 6 documentos abordam a DEA e o modelo de DEA DDF para saídas desejáveis e indesejáveis. BoD e ICs, não são aplicados por nenhuma das pesquisas relacionadas. No Quadro 3, constam as variáveis utilizadas em cada um dos 6 estudos. A importância da identificação dessas variáveis reside no aspecto de que nortearam a escolha e medição das variáveis utilizadas pela presente pesquisa. Embora não sejam as mesmas, o conhecimento das variáveis presentes no Quadro 3 auxiliou a condução das entrevistas com os especialistas, facilitando a identificação dos indicadores individuais aplicados por este estudo. Além dos quadros e detalhamento já apresentados neste tópico do trabalho, o Quadro 4 mostra um resumo da abordagem de cada um dos 6 estudos.

Quadro 4: Estudos relacionados ao tema - Resumo da abordagem

Título do documento	Citação	Resumo da abordagem do documento
An investment analysis for China's sustainable development based on inverse data envelopment analysis	(Chen et al., 2017)	Análise de investimento para o desenvolvimento sustentável da China, propondo um método de DEA inversa, com resultados indesejáveis. O desenvolvimento sustentável envolve a concepção de abordagens integradas que sejam capazes de abordar a sustentabilidade ambiental e os resíduos, garantindo ao mesmo tempo a prosperidade social e económica a nível nacional ou mesmo global, implicando um âmbito macroeconómico.
Benchmarking for investment decisions: A case of food production	(Goncharuk, 2011)	O artigo foca no aprimoramento da metodologia e no desenvolvimento do modelo, utilizando ferramentas de <i>benchmarking</i> para o processo de tomada de decisão e escolha ideal do objeto de investimento.
Data envelopment analysis for highway asset investment assessment	(Li; McNeil, 2021)	Para determinar a estratégia de investimento mais eficaz, com recursos escassos, geralmente, falta a integração e, portanto, uma melhor utilização das ferramentas e práticas existentes. Este artigo aplica a DEA para avaliar diferentes cenários de investimento em rodovias. Os ativos estudados são: pavimentos, pontes e sinalização de trânsito.
Investment Projects Ranking with DEA Method Considering Feasibility Study Results	(Sebt; Juybari; Soleymanfar, 2018)	Propõe um modelo para auxiliar a tomada de decisão na área de investimento financeiro por meio do mecanismo DEA. Reduzindo a aplicação de visões parciais pessoais na tomada de decisão a fim de tornar os resultados mais confiáveis.
Linking investment decisions-based on firm performance and open innovation practices in Vietnam's wire and cable market using data envelopment analysis models	(Nguyen et al., 2023)	Estudo aplica a DEA, especificamente, as medidas baseadas em superslacks (Super-SBM) e o índice de Malmquist para avaliar a eficiência lucrativa, posição, inovação técnica e inovação tecnológica das dez principais empresas de fios e cabos no Vietname de 2017 a 2020.
Performance evaluation and investment analysis for container port sustainable development in China: An inverse DEA approach	(Lin; Yan; Wang, 2019)	Avaliação de desempenho e análise de investimento para desenvolvimento sustentável de 16 portos de contêineres na China.

Fonte: elaborado pelo autor

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

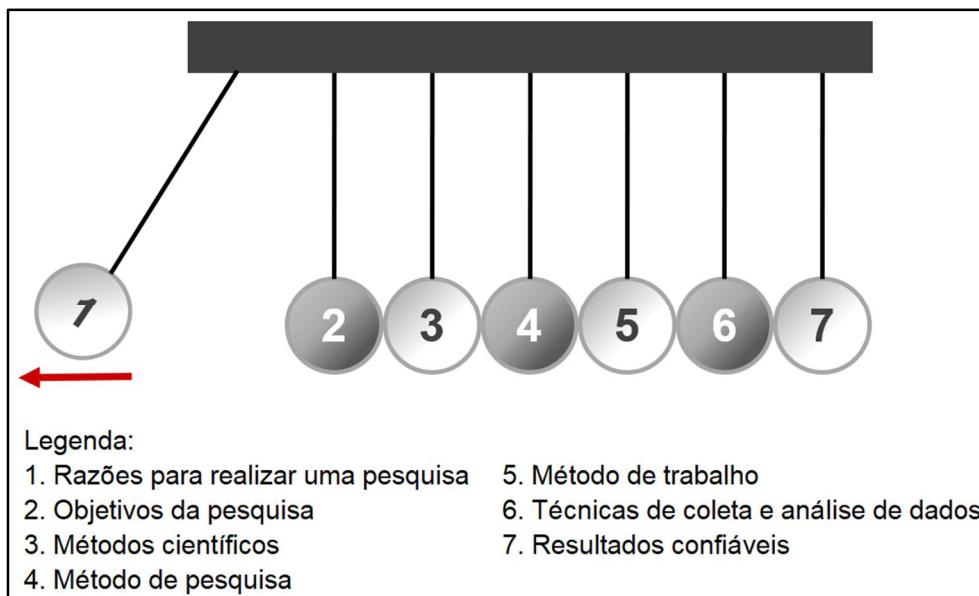
Este capítulo apresenta a metodologia empregada na pesquisa. Das pesquisas na área de gestão espera-se que se dediquem ao estudo, planejamento e desenvolvimento de novos artefatos, além de investigar, descrever e esclarecer determinado problema ou fenômeno (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). Considerando a importância da aplicação rigorosa e assertiva dos procedimentos metodológicos para alcançar o sucesso na realização da pesquisa, este capítulo está subdividido da seguinte forma: (i) delineamento da pesquisa; (ii) método trabalho; (iii) seleção de DMUs e indicadores, coleta e tratamento de dados; (iv) configuração do modelo, e; (v) procedimentos de análise dos dados.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015) utilizam o Pêndulo de Newton, Figura 3, para ilustrar as etapas para condução de uma pesquisa científica e os procedimentos para garantir a confiabilidade dos resultados. O objetivo de Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015), com uso da ilustração, é apresentar a estrutura, tradicionalmente, aplicada para produzir conhecimento científico consistente. Outro aspecto reforçado por Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015) é a especial atenção às relações de dependência e de alinhamento entre cada uma das etapas, a fim de que o atingimento dos resultados esperados, na condução da pesquisa, ocorra de forma confiável e fidedigna.

O planejamento da pesquisa é a fase em que o pesquisador define os métodos e técnicas a serem empregadas para condução apropriada do trabalho e geração de resultados que pretende obter (Lozada; Nunes, 2019). As etapas ‘1. Razões para realizar uma pesquisa’ e ‘2. Objetivos da pesquisa’, apresentadas na Figura 3, foram amplamente debatidas no capítulo 1 desta dissertação. As demais etapas estão apresentadas ao longo deste e dos próximos capítulos.

Figura 3: Etapas para condução de uma pesquisa científica



Fonte: elaborado pelo autor, adaptando Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015)

O método científico é formado pelo conjunto de procedimentos que constituem o passo a passo para a construção do conhecimento científico (Krauss, 2024). Os métodos científicos podem ser complementares entre si e, formam a concepção e os pressupostos mínimos para permitir e prover a constituição do conhecimento (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). O método científico constitui-se de procedimentos reconhecidos, aceitos, validados e aprovados pela comunidade científica, garantindo sua qualidade e confiabilidade ao produzir conhecimento (Appolinário, 2011). Os métodos não são estáticos ou fixos. A ciência evolui ao longo do tempo permitindo que observação, formulação de hipóteses e a experimentação direta sejam cada vez mais diversas complexas e eficientes (Krauss, 2024).

A pesquisa científica utiliza, na área da gestão, principalmente, os três métodos com as seguintes abordagens: indutiva, dedutiva e hipotético-dedutiva (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). Conceituam, Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015), os três métodos: (i) indutivo: envolve a coleta de dados do mundo real para formação da solução de um problema ou fundamentação de novas teorias; (ii) dedutivo: uso da lógica e do teste de hipóteses em condições específicas, muitas vezes simplificando observações complexas, construindo o conhecimento a partir de premissas e de suas relações, e; (iii) hipotético-dedutivo: integra o teste de hipóteses

com a coleta e análise de dados, colocando à prova a falsificabilidade e confiabilidade da investigação científica.

O método científico utilizado para consecução desta pesquisa é o indutivo. Com base em um conjunto de observações empíricas, o método científico indutivo, tem a capacidade de fazer previsões verdadeiras (Lualdi; Fasano, 2019). No método indutivo a construção do conhecimento acontece a partir da observação (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). Indução é a inferência que se utiliza de informações e premissas, normalmente empíricas, para obter uma conclusão (Appolinário, 2011). A partir de conhecimentos ou observações preexistentes, o raciocínio indutivo, contempla o potencial de fazer previsões sobre novas circunstâncias (Lualdi; Fasano, 2019). O conhecimento, no método indutivo, é alicerçado na experiência (Lozada; Nunes, 2019). A indução é empírica e probabilística, capaz de gerar conhecimento novo e, não apenas, organizar o já existente (Appolinário, 2011).

O método de pesquisa, utilizado por este estudo, para responder o problema e atender seus objetivos, é o da modelagem quantitativa. Modelagem, ou modelamento é o método que aplica técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou de parte de um sistema produtivo (Cauchick-Miguel *et al.*, 2018). A estrutura da modelagem transcende os princípios orientadores e métodos, oferece um conjunto detalhado de etapas que guiam o modelador no desenvolvimento do modelo (Robinson *et al.*, 2011). Conceitualmente, os modelos definem as variáveis relevantes do objeto de estudo, o inter-relacionamento, a interdependência e os seus respectivos valores (Bertrand; Fransoo, 2002). As etapas do processo de modelagem são: definição do problema, construção do modelo, solução do modelo, validação do modelo e implementação da solução (Cauchick-Miguel *et al.*, 2018).

A pesquisa que utiliza modelos quantitativos pode ser considerada uma abordagem racional para a geração de conhecimento, oferece processos sistemáticos e objetividade para as análises (Mhlongo *et al.*, 2023). A pesquisa empírica, que utiliza modelos quantitativos, foca na verificação da validade dos modelos científicos aplicados na pesquisa, assim como na avaliação da usabilidade e do desempenho das soluções de problemas derivadas dessas pesquisas em processos (Bertrand; Fransoo, 2002). Amplificam-se as chances de êxito de um

estudo que tenha como base um modelo projetado adequadamente (Robinson *et al.*, 2011). A modelagem quantitativa parte do princípio de que é possível criar modelos capazes de capturar os desafios de tomada de decisão enfrentados por gestores em situações reais (Bertrand; Fransoo, 2002). A concepção do modelo influencia todos os aspectos do estudo, especialmente os requisitos de dados, a rapidez no desenvolvimento do modelo, sua validade, a velocidade da experimentação e a confiabilidade dos resultados obtidos (Robinson *et al.*, 2011).

Há duas situações relevantes na construção do modelo que precisam ser observadas pelos pesquisadores. A primeira é que o modelo precisa ser construído com base em suposições precisas e exatas, caso contrário, a solução correta não será atingida nem por pesquisador e nem pelo usuário (Land *et al.*, 2021). A segunda refere-se à complexidade, de forma que, o modelo pode perder a utilidade, inviabilizando sua aplicação na busca da solução do problema, se tiver um nível elevado de complexidade fazendo com que, pesquisador e usuário, tenham dificuldade de utilização e reprodução (Cauchick-Miguel *et al.*, 2018). Os modelos científicos pressupõem que a modelagem, quando aplicada, seja realizada em um sistema conhecido detalhadamente, pois a obtenção de resultados precisos depende da correta abstração da realidade que deve ser perfeitamente absorvido na conceituação (Robinson *et al.*, 2011).

Pesquisas focadas na criação e formalização de artefatos precisam ser cientificamente válidas, sustentadas por uma abordagem metodológica rigorosa e adequada, além de promover a discussão sobre o avanço do conhecimento (Lacerda *et al.*, 2013). O modelo é um artefato que tem forte relação com a teoria e que, dependendo do problema de pesquisa, pode ser suficiente para estabelecer os passos para sua solução ou promover o direcionamento e definição entre hipóteses que garantam a sua realização (Cauchick-Miguel *et al.*, 2018). O artefato desenvolvido pode servir como base para trabalhos subsequentes de modelagem, devendo ser considerado não como uma alternativa, mas como um precursor de abordagens posteriores (Land *et al.*, 2021). O Quadro 5 resume e apresenta a aplicação dos métodos aplicados na delimitação desta pesquisa.

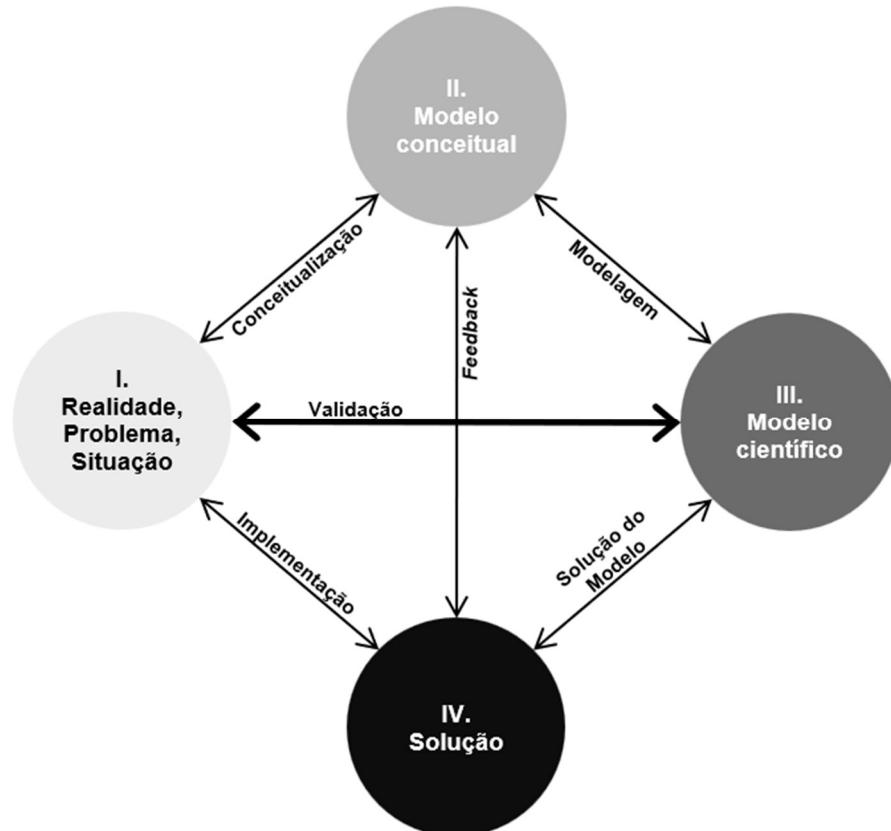
Quadro 5: Resumo das etapas desta pesquisa científica

Etapa	Enquadramento
Tipo de pesquisa	Aplicada
Método Científico	Indutivo
Método de Pesquisa	Modelagem Quantitativa

Fonte: elaborado pelo autor

3.2 MÉTODO DE TRABALHO

Figura 4: Modelagem - visão sistemática da solução de problemas



Fonte: adaptado de Mitroff *et al.* (1974).

Para desenvolver o método da modelagem, a pesquisa adota, como uma de suas bases, o modelo publicado no artigo seminal de Mitroff *et al.* (1974), apresentado na Figura 4. O modelo de Mitroff *et al.* (1974) é extremamente útil para indicar o caminho metodológico que um estudo de modelagem deve seguir

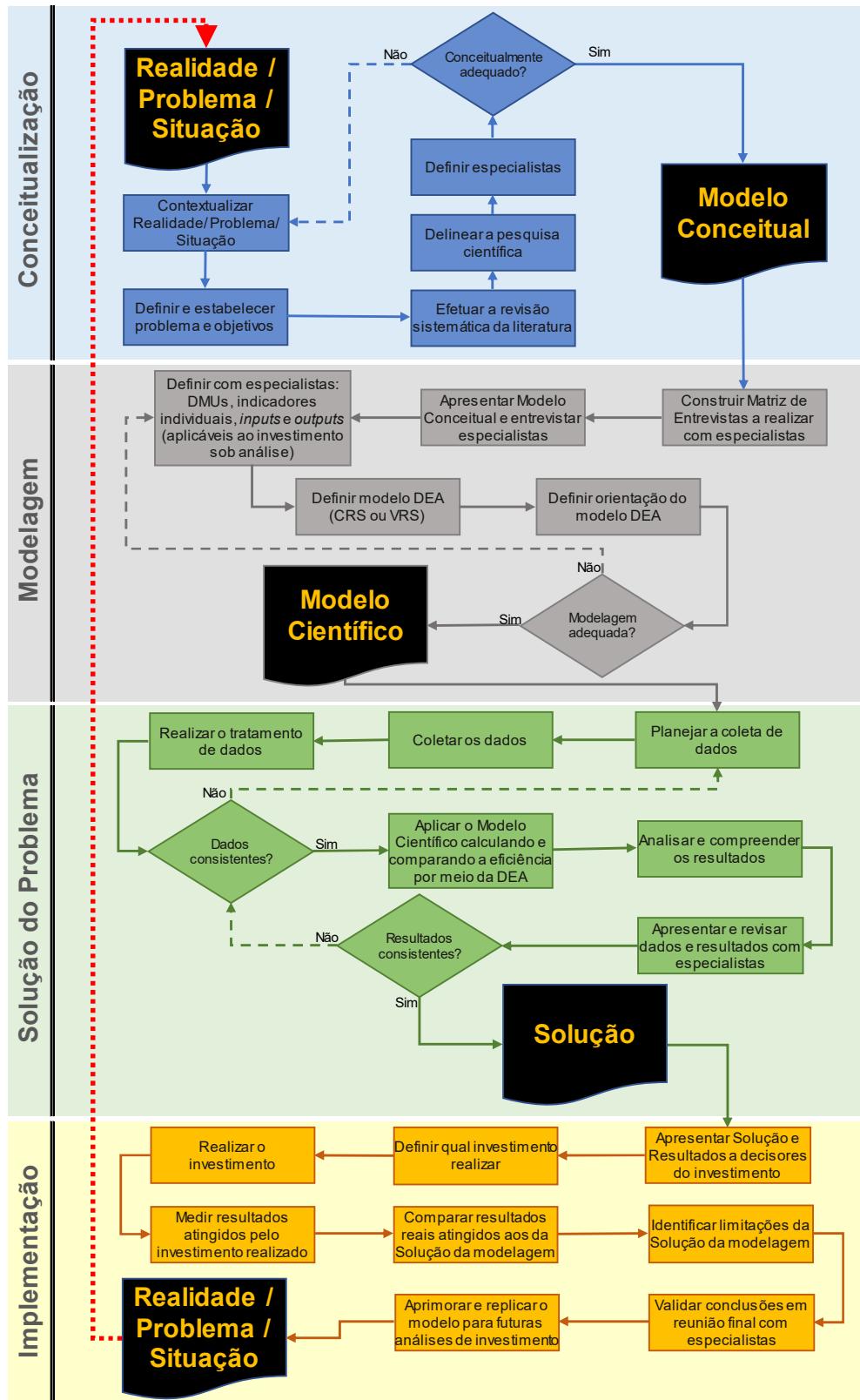
(Bertrand; Fransoo; Udenio, 2024). Em sua abordagem, Mitroff *et al.* (1974) identifica e define quatro fases para as pesquisas que adotam a modelagem como método: (i) conceitualização; (ii) modelagem; (iii) solução do problema, e; (iv) implementação.

Bertrand, Fransoo e Udenio (2024) conceituam, da seguinte forma, cada uma das fases especificadas:

- i. Conceitualização: fase crítica do processo, pois um modelo precisa ser construído com a identificação fidedigna dos fatos e de forma clara e objetiva. A partir da cenarização adequada da realidade, problema e/ou situação, o pesquisador toma decisões a respeito das variáveis que compõem o modelo. Também toma decisões explícitas do que não constitui o modelo. Nesta fase, o pesquisador faz um modelo conceitual do problema e do sistema que está sendo estudado;
- ii. Modelagem: etapa em que o pesquisador constrói o modelo científico, definindo as relações causais entre as variáveis;
- iii. Solução do problema: neste estágio, a matemática, normalmente, passa a desempenhar papel dominante, podendo concentrar a análise através de auxílios numéricos e até simulações computacionais. Resultados através de análise matemática, se adotados corretamente, métodos e definições, são explícitos de forma pertinente e escopo;
- iv. Implementação: é o ponto em que os resultados são aplicados e implementados. Após esse passo, uma nova pesquisa pode ser iniciada.

O desenvolvimento do método de trabalho, para realização da pesquisa, baseada no modelo de Mitroff *et al.* (1974), requer a definição e execução de um roteiro detalhado, que guie a análise das opções de investimento, com a aplicação da DEA. A Figura 5, elaborada pelo autor com base em Mitroff *et al.* (1974) e no *framework* de Oliveira, Lima e Montevechi (2016), desenvolve e apresenta uma abordagem sistemática e estruturada para conduzir o presente estudo. Através de um fluxograma lógico-sequencial, a Figura 5, especifica cada etapa que o procedimento propõe para o desenvolvimento das fases do modelo de Mitroff *et al.* (1974).

Figura 5: Procedimento para avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA



Fonte: elaborado pelo autor, adaptando Oliveira, Lima e Montevechi (2016)

As etapas para avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital, por meio de ICs com a utilização da DEA, através da modelagem quantitativa e aplicação do Modelo de Mitroff, foram apresentadas na Figura 5. A seguir estão descritas cada uma das etapas:

3.2.1 Conceitualização

Na primeira fase, entender e estruturar o investimento em bens de capital, que se pretende avaliar e decidir, compõe o caráter preparativo e introdutório para o estudo. Conceder embasamento teórico, seguindo os rigores dos métodos científicos para obter, ao final da etapa, um Modelo Conceitual robusto e capaz de sustentar todo o progresso e desenvolvimento do trabalho. O processo envolve a identificação e o delineamento claro do problema para garantir que a execução do procedimento garanta a sua resolução. Esta fase é dividida nas seguintes etapas:

- i. Contextualizar Realidade/ Problema/ Situação: inicialmente é realizada a contextualização da empresa, tipo e porte de investimento, aplicação e resultados inicialmente esperados com o investimento;
- ii. Definir e estabelecer problema e objetivos: após identificar o problema, é necessário estabelecer definir claramente e os objetivos geral e específicos, para atendimento do escopo do investimento;
- iii. Efetuar a revisão sistemática da literatura: realização de pesquisa científica para identificar, embasar, interpretar e avaliar pesquisas anteriores sobre o tema. A RSL potencializa a assertividade e relevância dos dados utilizados para avaliar as opções de investimento;
- iv. Delinear a pesquisa científica: definir o planejamento da pesquisa, os métodos e técnicas a serem empregadas para condução e geração de resultados apropriados;
- v. Definir especialistas: definir os profissionais, com especialidade nas áreas relacionadas à modalidade de pesquisa e investimento, com experiência e conhecimentos técnicos, científicos e relevantes ao processo decisório. Esse conjunto de pessoas pode apoiar na compreensão e estruturação da pesquisa, coleta e tratamento de

dados, validação da pesquisa, ratificação dos métodos e, posterior, escolha da opção de investimento mais eficiente;

- vi. Modelo Conceitual: verificar se o modelo está conceitualmente bem estruturado e definido. Se não estiver, retornar às fases anteriores para aprimoramento. Se estiver, a primeira fase está concluída e um Modelo Conceitual está criado, servindo como base teórica para a análise subsequente.

3.2.2 Modelagem

A fase de modelagem tem por objetivo transformar o Modelo Conceitual em uma estrutura analítica que pode ser aplicada para avaliar e identificar a opção de investimento mais eficiente. Neste ponto, o Modelo Conceitual é convertido em uma representação prática, levando em consideração as variáveis e os métodos de análise utilizados. As etapas que a compõe são:

- i. Construir Matriz de Entrevistas a realizar com especialistas: elaborar o roteiro de entrevistas a serem realizadas com os profissionais selecionados. A matriz é elaborada para contribuir com a estruturação dos dados utilizados na análise. Precisa ser submetida à revisão pelos especialistas, com o objetivo de confirmar a essencialidade e representatividade dos dados e se, os aspectos fundamentais para o modelo e decisão, compõem adequadamente e satisfatoriamente o estudo do investimento em bens de capital sob análise.
- ii. Apresentar Modelo Conceitual e entrevistar especialistas: apresentação e disponibilização do Modelo Conceitual aos especialistas para revisão e ajustes, caso necessário. Parte essencial para garantir que o modelo seja robusto e confiável.
- iii. Definir com especialistas DMUs, indicadores individuais, *inputs* e *outputs* (aplicáveis ao investimento sob análise): definição de todas as variáveis objeto de coleta de dados necessárias para o procedimento da avaliação de investimentos. Os especialistas são consultados para validar a relevância e adequação dessas variáveis.

- iv. Definir modelo DEA (CRS ou VRS): determinar, a partir das características do investimento sob análise, qual variante do modelo de DEA aplicar: (i) CRS (*Constant Returns to Scale* - Retorno Constante de Escala, ou; (ii) VRS (*Variable Returns to Scale* - Retorno Variável de Escala);
- v. Definir orientação do modelo DEA: além de escolher o modelo de DEA, é necessário fixar a ótica de análise, definindo a orientação do modelo. Orientação para entradas (*inputs*) ou para saídas (*outputs*), considerando o que é mais adequado para o investimento sob análise;
- vi. Modelo Científico: realizar a verificação final para assegurar que a modelagem atende aos requisitos da definição do investimento em bens de capital em curso. Se necessário, ajustes adicionais são realizados em colaboração com os especialistas. Ao final desta fase, é disponibilizado o Modelo Científico.

3.2.3 Solução do Problema

Esta fase envolve a aplicação prática do Modelo Científico configurado na etapa anterior. A análise dos dados e a obtenção de resultados são os principais objetivos da sequência do fluxo, que valida a eficiência e adequação do modelo para definir, dentre as opções de investimento em bens de capital, qual a mais eficiente. A seguir, são apresentadas cada um de seus estágios:

- i. Planejar a coleta de dados: identificar e selecionar fornecedores para os bens de capital que a empresa pretende realizar o investimento. Definir especificações que permitam a comparabilidade entre os diversos equipamentos e fornecedores a avaliar no processo. Definir os indicadores individuais aplicados no estudo;
- ii. Coletar os dados: solicitar e coletar as propostas técnico-comerciais junto aos fornecedores selecionados;
- iii. Realizar o tratamento de dados: seleção, estratificação, depuração e padronização dos dados. Nesta fase, também se realizam os cálculos dos indicadores individuais;

- iv. Verificar se os dados são consistentes: análise e validação dos dados. Caso seja identificada alguma inconsistência, a coleta e o tratamento podem ser repetidos, bem como, o planejamento de novas coletas pode ocorrer para completar o conjunto de dados necessários para a análise. Sendo consistentes, prossegue-se para a aplicação do Modelo Científico através da configuração da base de dados em planilha;
- v. Aplicar o Modelo Científico calculando e comparando a eficiência por meio da DEA: inserir a base de dados em *software* com capacidade técnica para executar o modelo de DEA definido. Neste trabalho, o *software* utilizado para calcular o indicador agregado ou IC, foi o MaxDEA na versão 12.2. É imprescindível a habilitação e conhecimento da aplicação selecionada para executar o modelo corretamente;
- vi. Analisar e compreender os resultados: a partir da etapa anterior, a modelagem começa a gerar resultados que podem ser analisados e precisam ser compreendidos para atingir a solução pretendida, que é a identificação da opção mais eficiente de investimento em bens de capital, dentre as opções disponíveis e pré-selecionadas para o estudo;
- vii. Apresentar e revisar dados e resultados com especialistas: outra vez os especialistas têm contribuição relevante com o estudo, pois, participam ativamente de todo o processo. Nesse ponto é realizada a análise crítica, validação e autenticação dos resultados;
- viii. Verificar se os resultados são consistentes: a partir da revisão de dados e resultados com os especialistas, garantir que a Solução tenha relevância e confiabilidade. Caso necessário, realizar ajustes finais e refinamentos no modelo;
- ix. Solução: Ao término da fase, uma solução para o problema proposto está à disposição, ou seja, está identificada, dentre as alternativas estudadas, qual a opção mais eficiente de investimento em bens de capital.

3.2.4 Implementação

A fase final do processo consiste em aplicar, na prática, os resultados obtidos. Esta etapa foca na apresentação e implementação da Solução estabelecida na modelagem. Conceder subsídios aos decisores da organização para a melhor tomada de decisão quanto ao investimento a ser realizado. Visa, além disso, aprimorar e replicar o modelo, propondo melhorias para aplicação em futuras análises de investimento em bens de capital. A implementação é composta das seguintes etapas:

- i. Apresentar Solução e Resultados a decisores do investimento: a solução e os resultados devem ser apresentados aos decisores da organização. A opção de investimento, em bens de capital mais eficiente, calculada com a aplicação da DEA, é revelada e são fornecidos subsídios para contribuir com o processo de tomada de decisão;
- ii. Definir qual investimento realizar: com base nos resultados da solução e, consequentemente, identificação das opções de investimento mais eficientes, é definido se o investimento será realizado e, em que momento. A decisão é tomada por diretores da empresa apoiados por gerentes e técnicos das áreas relacionadas, como infraestrutura, processos, produção e finanças;
- iii. Realizar o investimento: execução do investimento, que, a depender de seu porte e complexidade, pode exigir: definição de cronograma de execução, projeto, captação de recursos de terceiros (instituições financeiras ou órgãos de fomento), implantação e disponibilização para uso do bem de capital;
- iv. Medir resultados atingidos pelo investimento realizado: após a realização do investimento, a mensuração dos resultados alcançados é etapa fundamental;
- v. Comparar resultados reais atingidos aos da Solução da modelagem: comparar os resultados reais da aplicação e utilização do investimento com os projetados durante o estudo. O objetivo é identificar se o investimento produziu os efeitos esperados pela organização;

- vi. Identificar limitações da Solução da modelagem: identificar quais são as limitações da Solução proposta durante a modelagem. Relacionar os aspectos que podem ser explorados em pesquisas futuras e os pontos de melhoria para próximas decisões de investimento;
- vii. Validar conclusões em reunião final com especialistas: neste ponto, o principal objetivo é apresentar aos especialistas a comparação entre os resultados reais e os que foram projetados. Avaliar o impacto das decisões tomadas com base no procedimento. Também compõe esta etapa, a validação das limitações identificadas na etapa anterior, buscando propostas de melhorias e ajustes para aumentar sua robustez;
- viii. Aprimorar e replicar o modelo para futuras análises de investimento: a partir da validação com os especialistas, busca-se aprimorar a Solução da modelagem para aplicação em novos estudos de investimento. Se a avaliação é de que o procedimento é efetivo deve ser replicado em outros contextos ou problemas semelhantes. Identificar as melhorias e ajustes para o aprimoramento contínuo e adaptação do procedimento a novos cenários de investimento em bens de capital;
- ix. Realidade / Problema / Situação: a realização do investimento impõe um novo cenário para a organização. A partir de uma visão cíclica dos processos, o fechamento do fluxograma não encerra as necessidades. Pelo contrário, uma nova Realidade / Problema / Situação emerge. Desta forma, um novo cenário requer a avaliação de investimentos futuros e o ciclo do procedimento reinicia novamente.

3.3 SELEÇÃO DE DMUs E INDICADORES, COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Este tópico apresenta o passo a passo da seleção das DMUs e dos indicadores individuais, assim como relata as atividades de coleta e tratamento dos dados. Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015) indicam que as técnicas de coleta de dados podem ser: documental, bibliográfica, entrevistas, grupos focais, questionários e observações diretas. No desenvolvimento deste estudo, dentre as

técnicas mencionadas acima, aplicam-se duas: documental e entrevistas. A técnica documental está associada à coleta de informações, dados, planilhas, valores e demais informações a respeito do investimento em bens de capital sob análise e avaliação. A técnica de entrevistas está aplicada no desenvolvimento de reuniões e entrevistas com especialistas selecionados para apoiar o estudo.

A pesquisa recebeu o apoio de 5 especialistas com relevante e reconhecida experiência em temas como gestão de empresas, controladoria, contabilidade, finanças, infraestrutura e gestão de projetos. Uma distinção do procedimento proposto pela Figura 5 é a consulta e participação ativa de especialistas na consecução de diversas das suas etapas. O Quadro 6 caracteriza esses profissionais. A participação desse grupo abrangeu atividades como: (i) recomendação e validação de DMUs; (ii) disponibilização de materiais e dados; (iii) identificação e definição dos indicadores individuais aplicados no teste do procedimento proposto pela pesquisa; e (iv) análise crítica, validação e autenticação da metodologia, dos dados e dos resultados.

Quadro 6: Painel de Especialistas

Atividade Profissional	Tempo atividade	Formação
Consultor de Empresas	20 anos	Mestre em Controladoria e Finanças
Diretor de Empresa	7 anos	Mestre em Administração de Empresas
Gerente de Controladoria	10 anos	Graduação em Administração de Empresas incompleta
Gerente de Infraestrutura	12 anos	Graduado em Engenharia Mecânica
Gerente de Produção	1 ano	Mestrando em Engenharia da Produção e Sistemas

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 5: Procedimento para avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA, determina, desenvolve e apresenta as etapas do presente trabalho. Para aplicação e teste desse procedimento, foram selecionadas 28 DMUs e coletados seus dados. O conjunto de bens de capital estudados é composto por projetos de investimentos em máquinas e equipamentos para aplicação nos processos produtivos de indústrias metalmecânicas como:

centros de usinagem, máquinas de corte a laser, desbobinadores de chapas de aço, linhas de pintura, prensas, robôs de solda e robôs para automatização do processo de prensa. A utilização de 28 DMUs cumpre o pressuposto sugerido pela literatura, de o número de DMUs ser no mínimo 3 vezes o número de *inputs* e *outputs* somados (Piran; Lacerda; Camargo, 2021). Os dados foram coletados a partir da empresa onde o mestrando atua profissionalmente. O escopo de investimentos avaliados é composto por máquinas e equipamentos que tiveram a aquisição analisada pela empresa entre os anos de 2021 e 2025.

As empresas, fornecedoras das máquinas e equipamentos, assim como as pessoas envolvidas, não estão identificadas na pesquisa. Manter identidades preservadas tem como objetivo garantir o devido sigilo de informações e proteção de dados. Conduzir o estudo dessa forma visa garantir a confidencialidade na troca de informações, promover ambiente de mútua confiança e incentivar a colaboração. Cabe afirmar que, essa abordagem não compromete a qualidade e assertividade da pesquisa. Além disso, não afeta a integridade dos dados e resultados nem a validade científica do trabalho.

Como mencionado anteriormente, os Quadros 2 e 3 relacionam os estudos identificados na RSL com maior aderência com o tema da presente pesquisa e apresentam os *inputs* e *outputs* adotados em cada documento. Os indicadores individuais selecionados para avaliar a eficiência das 28 DMUs foram VPL, TIR, PB Simples, PB Descontado e Margem de Contribuição (MC). Esses 5 indicadores econômico-financeiros são amplamente utilizados em análises de viabilidade. Foram definidos a partir da observação dos estudos relacionados nos Quadros 2 e 3 e das reuniões realizadas com os especialistas que suportaram o presente estudo.

Os cálculos dos indicadores individuais foram realizados a partir da coleta do Fluxo de Caixa Projetado para cada DMU para o período de 7 anos. O Fluxo de Caixa Projetado para cada máquina ou equipamento compõe a série de dados fundamentais coletados para avaliação da eficiência em bens de capital. Dada sua relevância estratégica, os dados dos Fluxos de Caixa Projetados não estão divulgados na presente dissertação. Sua coleta e tratamento foram realizados observando sigilo e confidencialidade. No presente trabalho constam apenas os resultados, índices e indicadores individuais. O Fluxo de Caixa Projetado é composto

pelo valor do custo total de aquisição e instalação do bem de capital e, a projeção de resultado líquido entre receitas e despesas nos 7 primeiros anos de aplicação dos equipamentos nos processos produtivos.

O processo de coleta de dados foi estruturado para garantir a confiabilidade e a relevância das informações. Para minimizar o impacto da variação de preços e valores ao longo do período, os Fluxos de Caixa Projetados de cada DMU foram corrigidos até o ano de 2025. A pesquisa aplicou o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), que é calculado e divulgado mensalmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A Tabela 1 apresenta os índices aplicados para cada investimento, conforme o ano em que ocorreu a análise e a projeção do seu respectivo fluxo de caixa.

Tabela 1: IPCA – Índice de Correção

Ano	Índice de correção
2021	1,2769309
2022	1,1602023
2023	1,0967567
2024	1,0483130
2025	1

Fonte: elaborado pelo autor, adaptando (Banco Central do Brasil, 2025)

O objetivo da correção dos Fluxos de Caixa Projetados para 2025 é garantir que as DMUs tenham bases de precificação, geração de receitas e realização de gastos comparáveis. A partir da correção dos fluxos, os indicadores individuais foram calculados, compilados e tabelados em formato de matriz. Com os dados disponíveis em Excel, a próxima fase é realizar a configuração do modelo.

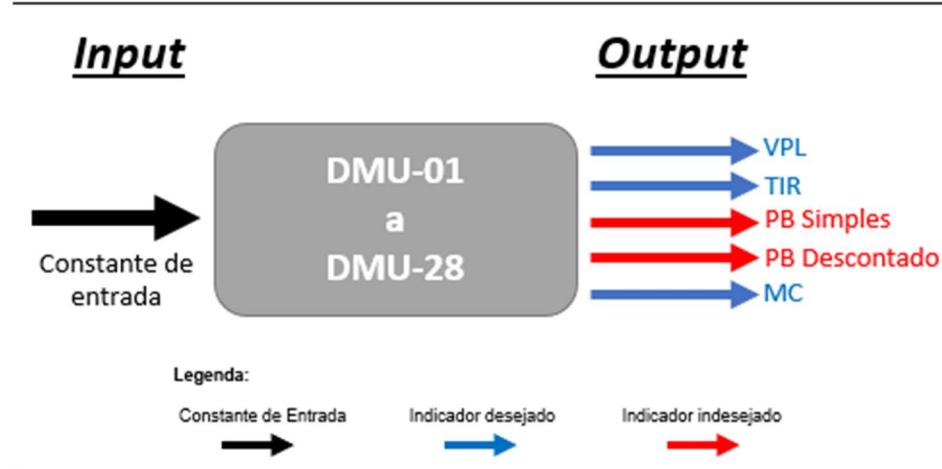
3.4 CONFIGURAÇÃO DO MODELO

Esta subdivisão apresenta como o modelo de DEA DDF com BoD foi aplicado para avaliar investimentos em bens de capital através de ICs aplicado por esta pesquisa. Além dos 5 indicadores individuais, todos *outputs*, foi considerado um único *input* fictício de valor padrão para gerar o IC através da DEA. O indicador de

input foi nominado como Entrada Constante e atribuído, para todas as DMUs, com valor de 1.

A Figura 6 demonstra o modelo de DEA adotado neste estudo. A Constante de Entrada como *input* para todas as 28 DMUs e os indicadores individuais como *output*. Como referenciado no capítulo 2, a aplicação da DEA DDF com BoD permite a utilização de indicadores com resultados desejados e indesejados. O estudo considera, no total, 5 *outputs*. Desses 5 indicadores, 3 são variáveis de resultados desejáveis (VPL, TIR e MC) representadas com setas em azul na Figura 6 e, os outros 2, são variáveis de resultados indesejados (PB Simples e PB Descontado) representadas com setas vermelhas na mesma figura.

Figura 6: Modelo DEA DDF com BoD aplicado para avaliar investimentos em bens de capital através de ICs



Fonte: elaborado pelo autor

A utilização de indicador único de entrada fictícia (valor 1 para todas as DMUs) desconsidera as diferenças nas aplicações de recursos, orientando, desta forma, a análise para as saídas, ou seja, para os resultados alcançados por cada DMU. Isto foi exatamente o que o estudo realizou, aplicou o modelo de DEA DDF orientado para as saídas. Adicionalmente, o modelo foi configurado na variante CRS de DEA. É recomendável que o CRS seja utilizado quando existe relação constante de escala entre os *inputs* e *outputs* das DMUs, o que é caso do presente estudo.

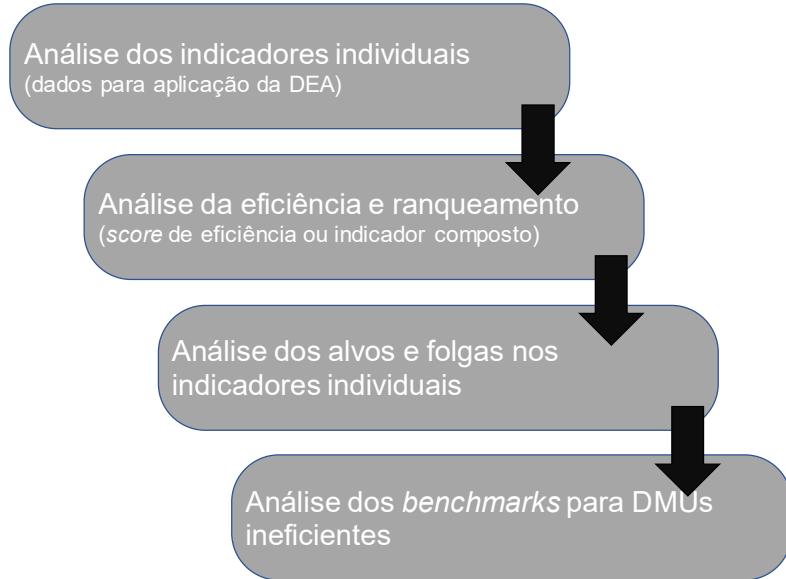
3.5 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS

A presente seção relata os procedimentos executados para analisar os dados utilizados no teste do procedimento de avaliação da eficiência em investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA, proposto na Figura 5. O processo de análise de dados, por meio de raciocínio analítico e lógico, é uma das etapas que devem ser realizadas ao conduzir uma pesquisa (Islam, 2020). A análise de dados precisa ter robustez para propiciar uma ligação eficaz com a teoria, sendo, dessa forma, suficiente para atingir conclusões sólidas (Miguel, 2007). É objetivo da análise dos dados, dar sentido a uma série de informações levantadas (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). A análise de dados é o processo de limpeza, transformação e modelagem de dados, aplicado com a finalidade de descobrir informações úteis para a tomada de decisões empresariais (Islam, 2020).

Com a base de dados concluída e disponível em Excel (atividade abordada no tópico 3.3) e a configuração do modelo determinada (atividade realizada no tópico 3.4), a próxima fase é inserir a base de dados em *software* com capacidade técnica para executar o modelo de DEA que foi definido. Neste trabalho, o *software* utilizado para calcular o indicador agregado ou IC, foi o MaxDEA na versão 12.2. Foi imprescindível a expertise do professor orientador para executar o modelo no referido programa de computador.

A partir da importação dos dados para o *software* MaxDEA, os cálculos de eficiência foram realizados. Os dados utilizados para determinar o IC constam na Tabela 2, tópico 4.1 da presente dissertação. Os procedimentos de análise dos dados foram executados conforme Figura 7, com objetivo de identificar as opções de investimento em bens de capital mais eficientes. As etapas dos procedimentos para análise de dados, apresentadas pela Figura 7, estão descritas na seção 4 do presente trabalho, apresentando os resultados obtidos em cada uma delas.

Figura 7: Procedimentos para análise de dados



Fonte: elaborado pelo autor

Cabe ressaltar que o foco desta dissertação não está em executar todo o procedimento proposto na Figura 5. O presente estudo executará, das quatro fases, somente as três primeiras: conceitualização, modelagem e solução do problema. Apesar do estudo apresentar o procedimento completo e discorrer sobre cada uma de suas etapas, a última fase, a de implementação, não será executada. A implementação está relacionada com a decisão de efetivar ou não o investimento. É o momento em que acontece a apresentação dos resultados aos decisores da empresa e estes realizam as devidas análises, ponderações e escolhas. Por estas razões, além da maturação dos projetos de investimento e o consequente tempo longo para geração de resultados, é que a implementação não compõe o escopo do presente trabalho. O foco deste estudo, portanto, reside em propor o procedimento, realizar o seu teste e analisar os resultados, contribuições e limitações na avaliação de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A exposição dos resultados está organizada em quatro subseções. A primeira subseção apresenta os indicadores individuais selecionados para a aplicação da DEA, detalhando seu papel na caracterização das DMUs e sua contribuição para a avaliação global. Em seguida, a segunda subseção discute o score de eficiência gerado pelo IC derivado do DDF, bem como o ranqueamento dos projetos, possibilitando a identificação daqueles que alcançaram a fronteira de eficiência e daqueles com desempenho relativo inferior. A terceira subseção foca na análise dos alvos e das folgas associadas a cada indicador, oferecendo subsídios para compreender os ajustes necessários ao alcance da eficiência plena, sejam eles decorrentes da redução dos indicadores indesejados ou do incremento dos indicadores desejados. Por fim, a quarta subseção apresenta a identificação dos *benchmarks* para cada DMU ineficiente, evidenciando as unidades de referência que servem como modelo de melhores práticas dentro do conjunto analisado.

4.1 INDICADORES INDIVIDUAIS UTILIZADOS NA ANÁLISE DOS DADOS

Os cinco indicadores individuais selecionados para aplicação do procedimento proposto para análise de investimentos em bens de capital foram: VPL (R\$), TIR (%), PB Simples (anos), PB Descontado (anos) e MC (%). Os indicadores VPL, TIR e MC seguem a lógica “quanto maior, melhor”, indicando que valores mais elevados refletem maior geração de fluxo de caixa, melhor rentabilidade e maior contribuição unitária para a cobertura dos custos fixos e obtenção de lucro, compondo, portanto, os resultados desejados deste estudo. Por outro lado, os indicadores PB Simples e PB Descontado seguem a lógica inversa, “quanto menor, melhor”, uma vez que prazos reduzidos para recuperação do investimento implicam menor exposição ao risco e maior agilidade na reversão do capital investido, constituindo, desta forma, os resultados indesejados da pesquisa.

A Tabela 2 consolida os valores de cada indicador para as 28 DMUs, permitindo uma visão global do desempenho individual de cada projeto. A análise

descritiva subsequente busca destacar, para cada indicador, as cinco DMUs com os melhores resultados, considerando as respectivas regras de avaliação.

Tabela 2: Indicadores individuais para avaliação dos investimentos

DMUs	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK SIMPLES (anos)	PAYBACK DESCONTADO (anos)	Margem de Contribuição (%)
DMU-01	1.160.872,65	7,1%	4,2	5,3	19,6%
DMU-02	127.407,50	1,3%	4,9	6,6	16,8%
DMU-03	92.070,96	0,6%	4,9	6,8	15,9%
DMU-04	452.993,52	17,3%	3,2	3,9	24,3%
DMU-05	598.268,67	3,9%	4,5	5,9	18,5%
DMU-06	2.394.125,63	9,9%	3,8	4,8	22,7%
DMU-07	69.298,36	0,4%	5,0	6,9	16,2%
DMU-08	1.226.585,17	9,4%	3,9	4,9	21,5%
DMU-09	665.740,22	6,7%	4,2	5,3	19,1%
DMU-10	1.824.128,21	16,0%	3,4	4,1	26,1%
DMU-11	411.595,78	3,7%	4,6	6,0	18,2%
DMU-12	234.775,62	5,1%	4,4	5,7	19,1%
DMU-13	2.986.297,93	10,1%	3,8	4,8	23,2%
DMU-14	173.439,12	3,2%	4,7	6,1	18,2%
DMU-15	2.403.950,77	9,6%	3,9	4,9	23,7%
DMU-16	511.829,89	2,4%	4,7	6,3	18,0%
DMU-17	200.625,01	3,4%	4,6	6,1	18,2%
DMU-18	684.448,61	7,2%	4,1	5,2	20,0%
DMU-19	165.606,30	1,3%	4,9	6,6	16,7%
DMU-20	1.695.285,93	13,7%	3,5	4,3	23,9%
DMU-21	245.209,45	1,9%	4,8	6,4	17,2%
DMU-22	616.242,76	8,9%	4,0	5,0	21,9%
DMU-23	1.820.332,47	10,9%	3,7	4,7	24,4%
DMU-24	267.818,01	3,8%	4,5	6,0	18,6%
DMU-25	153.705,84	1,6%	4,8	6,5	17,6%
DMU-26	582.481,08	8,2%	4,0	5,1	21,6%
DMU-27	697.156,73	9,6%	3,9	4,8	22,1%
DMU-28	1.270.269,63	7,7%	4,1	5,2	20,9%

Fonte: elaborado pelo autor

No indicador VPL, que representa o valor presente dos fluxos de caixa futuros descontados, as maiores cifras foram obtidas pelas DMU-13 (R\$ 2.986.297,93), DMU-15 (R\$ 2.403.950,77), DMU-06 (R\$ 2.394.125,63), DMU-10 (R\$ 1.824.128,21) e DMU-23 (R\$ 1.820.332,47). Esses resultados revelam que tais projetos possuem maior capacidade de geração líquida de valor.

No caso da TIR, métrica que expressa a taxa percentual de retorno anualizada, os maiores desempenhos foram verificados nas DMU-04 (17,3%), DMU-10 (16,0%), DMU-20 (13,7%), DMU-23 (10,9%) e DMU-13 (10,1%). Observa-se que, embora algumas dessas DMUs não figurem entre as maiores posições em VPL, elas

apresentam alta rentabilidade percentual, o que pode indicar investimentos de menor porte, porém, com retorno proporcionalmente mais elevado.

Para o PB Simples, que mensura o tempo necessário para recuperar o capital investido em termos nominais, os menores valores foram obtidos pelas DMU-04 (3,2 anos), DMU-10 (3,4 anos), DMU-20 (3,5 anos), DMU-23 (3,7 anos) e pelas DMU-06 e DMU-13 (3,8 anos). A presença simultânea de determinados projetos entre os primeiros lugares em VPL, TIR e PB Simples evidencia consistência entre retorno absoluto, rentabilidade percentual e recuperação do capital investido em menor tempo.

No indicador PB Descontado, que considera o valor do dinheiro no tempo, os resultados mais favoráveis foram identificados na DMU-04 (3,9 anos), DMU-10 (4,1 anos), DMU-20 (4,3 anos), DMU-23 (4,7 anos) e nas DMU-06, DMU-13 e DMU-27 (4,8 anos). Essa métrica, por corrigir o efeito da defasagem temporal nos fluxos de caixa, reforça a atratividade de projetos que, além de apresentarem prazos curtos de retorno nominal, mantêm desempenho semelhante quando os valores são descontados.

Por fim, a MC apresentou seus melhores desempenhos nas DMU-10 (26,1%), DMU-23 (24,4%), DMU-04 (24,3%), DMU-20 (23,9%) e DMU-15 (23,7%). Este indicador revela a proporção da receita que excede os custos e despesas variáveis, refletindo a capacidade do investimento de gerar lucro. A presença recorrente de determinadas DMUs entre os melhores resultados, deste e de outros indicadores, reforça a consistência do seu desempenho.

A análise comparativa permite observar que alguns projetos, como as DMU-04, DMU-10, DMU-20 e DMU-23, apresentam desempenho destacado em múltiplos indicadores, evidenciando equilíbrio entre geração de valor absoluto, rentabilidade, velocidade de recuperação do capital e capacidade de geração de margem. Essa convergência de resultados sugere que tais projetos possivelmente se situam próximos à fronteira de eficiência e, portanto, tendem a apresentar vantagem competitiva relevante no processo de ranqueamento da DEA.

Em contrapartida, existem DMUs que se destacam em apenas um ou dois indicadores, o que indica desempenho pontual e reforça a importância da avaliação integrada. O uso simultâneo dos cinco indicadores assegura que o processo

decisório não seja influenciado de forma desproporcional por uma métrica isolada, mas sim por um conjunto de medidas que capta múltiplas dimensões do desempenho financeiro e operacional dos investimentos. Essa abordagem contribui para maior robustez da análise e prepara o terreno para a subsequente aplicação da DEA, na qual os indicadores individuais são combinados na forma de um IC, permitindo identificar com maior precisão as unidades mais eficientes.

4.2 APLICAÇÃO DE DEA E *RANKING* DE PRIORIZAÇÃO DOS PROJETOS

A presente subseção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de DEA aos 28 projetos de investimento em bens de capital avaliados. O software utilizado para aplicação do modelo DEA DDF para os indicadores individuais de cada DMU foi o MaxDEA. O *score* obtido pelo DEA, variando entre 0 e 1, representa a eficiência relativa de cada projeto, sendo que valores iguais ou próximos de 1 indicam unidades eficientes e, portanto, prioritárias. Além do *score*, é apresentado o ranqueamento geral e o valor de *Beta*, que corresponde à diferença para a eficiência máxima. Valores menores de *Beta* indicam que a DMU está mais próxima da fronteira de eficiência e, portanto, requerem menor esforço para alcançar desempenho ótimo. Destaca-se que em algumas observações, o somatório do *Beta* e do *score* de eficiência podem ultrapassar 1, mostrando a possibilidade de obtenção de supereficiência da DMU.

A ordenação dos projetos foi definida com base no *score* de eficiência, permitindo identificar aqueles que oferecem maior potencial de retorno em relação aos resultados dos indicadores individuais de cada projeto de investimento. A Tabela 3 apresenta os resultados classificados de forma decrescente pelo *score*, o que facilita a visualização dos projetos mais e menos atrativos para execução.

Tabela 3: Resultados do DEA: *Score*, *Rank* e *Beta* das DMUs

DMUs	Score	Rank	Beta
DMU-04	1	1	0
DMU-10	1	1	0
DMU-13	1	1	0
DMU-15	0,970218	4	0,030696
DMU-20	0,951753	5	0,050693
DMU-06	0,95132	6	0,051171
DMU-23	0,943838	7	0,059503
DMU-27	0,876678	8	0,14067
DMU-08	0,864851	9	0,156268
DMU-22	0,858057	10	0,165424
DMU-26	0,851114	11	0,17493
DMU-28	0,833108	12	0,200324
DMU-18	0,820502	13	0,218765
DMU-01	0,809908	14	0,234708
DMU-09	0,801772	15	0,247237
DMU-12	0,785834	16	0,272534
DMU-24	0,768354	17	0,301484
DMU-05	0,767718	18	0,302561
DMU-11	0,761168	19	0,31377
DMU-17	0,760796	20	0,314413
DMU-14	0,756887	21	0,3212
DMU-16	0,749574	22	0,334092
DMU-25	0,74042	23	0,350584
DMU-21	0,737177	24	0,356526
DMU-19	0,725543	25	0,378278
DMU-02	0,724352	26	0,380544
DMU-07	0,71235	27	0,403805
DMU-03	0,710922	28	0,406625

Fonte: elaborado pelo autor

A análise dos resultados permite identificar as DMUs mais próximas da fronteira de eficiência e, portanto, prioritárias para execução. Considerando o *score* como principal critério, os dez projetos com maior prioridade são: DMU-04, DMU-10, DMU-13, DMU-15, DMU-20, DMU-06, DMU-23, DMU-27, DMU-08 e DMU-22. Esses projetos apresentam *scores* superiores a 0,85, com destaque para as três primeiras (DMU-04, DMU-10 e DMU-13), que alcançaram eficiência plena (*score* = 1), indicando desempenho ótimo pelos indicadores individuais utilizados no cálculo.

Dentro deste grupo prioritário, as DMUs DMU-15, DMU-20 e DMU-06 apresentam valores de *Beta* inferiores a 0,052, o que significa que pequenas melhorias nos indicadores já seriam suficientes para atingir eficiência máxima. Já as DMU-23, DMU-27, DMU-08 e DMU-22, apesar de apresentarem bom desempenho,

possuem *Betas* entre 0,059 e 0,165, exigindo esforços adicionais, embora ainda mantenham viabilidade interessante.

Por outro lado, os cinco projetos menos viáveis no momento, considerando seus baixos *scores* e elevados valores de *Beta*, são: DMU-03, DMU-07, DMU-02, DMU-19 e DMU-21. Essas DMUs apresentam *scores* entre 0,710 e 0,737, o que indica distância significativa da fronteira de eficiência e necessidade de melhorias substanciais nos indicadores para tornarem-se competitivas. O alto valor de *Beta* nesses casos (variando de 0,356 a 0,407) evidencia que, na conjuntura atual, o esforço e os recursos necessários para alcançar níveis adequados de eficiência seriam elevados, o que justifica sua baixa prioridade na alocação imediata de investimentos.

O levantamento das contribuições gerenciais do estudo ocorre pela observação e compreensão de seus resultados. É extremamente relevante que o conhecimento gerado produza contribuições práticas e aplicáveis para as organizações. A análise dos dados revela diferenças significativas na viabilidade econômico-financeira entre os projetos avaliados. A partir dos resultados de *score*, *rank* e *Beta*, apresentados na Tabela 3, é possível definir um plano de priorização para o conjunto de máquinas e equipamentos sob avaliação. A leitura combinada de *score* e *Beta* auxilia nesse processo pois, o *score* define o ranqueamento da DMU e o *Beta* quantifica o quanto falta em termos de projeção até a fronteira de eficiência. Desta forma, a realização dos investimentos em bens de capital que, em geral, demandam volume de recursos elevados, pode ser organizada através de um roteiro de implementação por ondas, aspecto que será mais bem detalhado no item 5, Discussão dos Resultados.

4.3 ANÁLISE ALVOS E FOLGAS PARA OS INDICADORES INDIVIDUAIS

A análise dos alvos e folgas para os indicadores individuais constitui uma etapa importante na interpretação dos resultados obtidos pelo modelo DEA, pois, permite identificar, com precisão, as distâncias entre o desempenho atual dos projetos e os níveis de referência que representam a eficiência máxima. Neste estudo foram avaliadas 28 DMUs correspondentes a projetos distintos, considerando

indicadores econômico-financeiros amplamente utilizados em análises de viabilidade: VPL, TIR, PB Simples, PB Descontado e MC. Cada indicador foi comparado com seu respectivo alvo, valor projetado pelo DEA para que a DMU atinja 100% de eficiência e, a partir dessa comparação, mensuraram-se as folgas existentes.

A presença de folgas indica potencial de melhoria, seja pela necessidade de ampliar retornos ou reduzir prazos de recuperação do investimento. A avaliação individualizada permite identificar quais indicadores demandam maior atenção e quais projetos apresentam maior distância de seus alvos ideais. Com isso, torna-se possível definir prioridades de intervenção, otimizar recursos e formular estratégias alinhadas aos objetivos estratégicos da organização. Além de apoiar o diagnóstico, essa análise serve como guia para ações corretivas e preventivas, maximizando as chances de sucesso dos projetos de investimentos, especialmente para aqueles que forem escolhidos e definidos pela organização.

A avaliação das folgas individuais calculadas pelo DEA oferece uma visão granular sobre a distância de cada projeto em relação aos padrões de eficiência e está apresentada na Tabela 4. As DMUs que atingiram eficiência máxima foram DMU-04, DMU-10 e DMU-13. O foco de análise desse tópico concentra-se, porém, nos projetos que efetivamente apresentam lacunas de desempenho. As folgas representam, neste contexto, a diferença entre o resultado observado e o valor que seria necessário para alcançar 100% de eficiência, funcionando como um guia para decisões gerenciais. Ao segmentar por indicador, é possível identificar quais projetos são menos viáveis econômico e financeiramente e quais estão próximos do nível ótimo, possibilitando priorização estratégica.

Tabela 4: Folgas para cada indicador individual por DMU

DMUs	Benchmark (lambda)	Folga VPL (R\$)	Folga TIR (%)	Folga PAYBACK SIMPLES (anos)	Folga PAYBACK DESCONTADO (anos)	Folga Margem de Contribuição (%)
DMU-01	DMU-10(0,928889)	272.466,67	1,7%	-1,0	-1,2	4,6%
DMU-02	DMU-10(0,891852)	48.484,16	0,5%	-1,9	-2,5	6,4%
DMU-03	DMU-10(0,855517)	37.438,32	0,2%	-2,0	-2,8	6,4%
DMU-04	DMU-04(1)	-	-	-	-	-
DMU-05	DMU-10(0,926019)	181.012,87	1,2%	-1,4	-1,8	5,6%
DMU-06	DMU-13(0,621785)	122.510,19	0,5%	-0,2	-0,2	1,2%
DMU-07	DMU-10(0,87055)	27.983,04	0,2%	-2,0	-2,8	6,5%
DMU-08	DMU-10(0,952188)	191.676,07	1,5%	-0,6	-0,8	3,4%
DMU-09	DMU-10(0,913879)	164.595,42	1,6%	-1,0	-1,3	4,7%
DMU-10	DMU-10(1)	-	-	-	-	-
DMU-11	DMU-10(0,916129)	129.146,61	1,2%	-1,4	-1,9	5,7%
DMU-12	DMU-10(0,932263)	63.984,25	1,4%	-1,2	-1,5	5,2%
DMU-13	DMU-13(1)	-	-	-	-	-
DMU-14	DMU-10(0,924472)	55.708,71	1,0%	-1,5	-2,0	5,9%
DMU-15	DMU-13(0,562408)	73.791,45	0,3%	-0,1	-0,1	0,7%
DMU-16	DMU-10(0,919581)	170.998,14	0,8%	-1,6	-2,1	6,0%
DMU-17	DMU-10(0,917268)	63.079,02	1,1%	-1,4	-1,9	5,7%
DMU-18	DMU-10(0,937546)	149.733,69	1,6%	-0,9	-1,1	4,4%
DMU-19	DMU-10(0,884909)	62.645,18	0,5%	-1,8	-2,5	6,3%
DMU-20	DMU-10(0,946983)	85.938,31	0,7%	-0,2	-0,2	1,2%
DMU-21	DMU-10(0,895962)	87.423,54	0,7%	-1,7	-2,3	6,1%
DMU-22	DMU-10(0,977912)	101.941,13	1,5%	-0,7	-0,8	3,6%
DMU-23	DMU-10(0,910064)	108.316,09	0,6%	-0,2	-0,3	1,4%
DMU-24	DMU-10(0,926831)	80.742,80	1,2%	-1,4	-1,8	5,6%
DMU-25	DMU-10(0,910038)	53.886,81	0,6%	-1,7	-2,3	6,2%
DMU-26	DMU-10(0,975411)	101.893,47	1,4%	-0,7	-0,9	3,8%
DMU-27	DMU-10(0,969205)	98.068,76	1,3%	-0,5	-0,7	3,1%
DMU-28	DMU-10(0,962057)	254.466,07	1,5%	-0,8	-1,0	4,2%

Fonte: elaborado pelo autor

No VPL, indicador que sintetiza o retorno financeiro líquido descontado no tempo, as maiores folgas foram observadas nas DMU-01, DMU-28, DMU-08, DMU-05 e DMU-16. Esses projetos apresentam lacunas expressivas, superiores a R\$ 170 mil e chegando a ultrapassar R\$ 272 mil, como no caso das duas primeiras. Tais distâncias evidenciam problemas estruturais de viabilidade, possivelmente relacionados a custos de implantação elevados, receitas projetadas aquém do necessário ou ambos. Para aproximar-se do alvo, seria necessário não apenas ampliar receitas, mas também otimizar despesas operacionais e revisar insumos estratégicos. Por outro lado, as menores folgas no VPL foram registradas nas DMU-07, DMU-03, DMU-02, DMU-25 e DMU-14, com lacunas entre R\$ 27 mil e R\$ 55 mil. Embora ainda relevantes, estas representam ganhos mais tangíveis e de execução

relativamente rápida, como a melhoria de processos internos, ajustes no escopo e a eliminação de desperdícios.

Na TIR, que mede a rentabilidade percentual de um projeto, as maiores folgas apareceram nas DMU-01, DMU-09, DMU-18, DMU-28 e DMU-22, todas com diferenças acima de 1,5 pontos percentuais. Em termos práticos, isso significa que, para atingir o nível ótimo, essas iniciativas precisariam melhorar sensivelmente sua rentabilidade, seja reduzindo o tempo de maturação, acelerando entregas ou aumentando margens de lucro. Já as menores folgas em TIR foram registradas nas DMU-07, DMU-03, DMU-15, DMU-02 e DMU-06, com variações de 0,2 a 0,5 pontos percentuais. Esses projetos se encontram próximos do alvo e podem atingir a eficiência máxima com intervenções táticas pontuais, como ajustes de cronogramas ou maior controle gerando redução de custos.

No PB Simples, que avalia o tempo de retorno do investimento inicial, a interpretação das folgas é inversa: valores mais próximos de zero indicam melhor desempenho, e os mais negativos refletem inviabilidade. As menores folgas (mais próximas do alvo) ocorreram nas DMU-15, DMU-20, DMU-06, DMU-23 e DMU-27, variando de -0,1 a -0,5 anos. Nesses casos, há oportunidade para atingir a eficiência total com melhorias marginais na entrada de receitas ou redução pontual de custos, viabilizando o retorno no prazo ótimo. Já as maiores folgas (mais críticas) apareceram nas DMU-07, DMU-03, DMU-02, DMU-19 e DMU-21, com tempos de retorno de -1,7 a -2,0 anos. A distância em relação ao alvo sugere desafios mais profundos, como investimentos iniciais elevados ou baixo volume de vendas projetados perante seus custos.

O PB Descontado, que ajusta o tempo de retorno considerando o valor do dinheiro no tempo, reforçou o padrão do PB Simples. As maiores folgas, indicando proximidade com o alvo, foram observadas nas DMU-15, DMU-20, DMU-06, DMU-23 e DMU-27, com variações entre -0,1 e -0,7 anos. Essas unidades necessitam de ações relativamente simples para alcançar a eficiência plena, que podem incluir a otimização da projeção de receitas e/ou melhor aproveitamento do capital. As menores folgas (mais distantes do alvo), foram novamente DMU-07, DMU-03, DMU-02, DMU-19 e DMU-21, com lacunas entre -2,3 e -2,8 anos. Para esses casos, a

melhoria da eficiência exige uma transformação abrangente, envolvendo revisão estrutural do escopo do projeto.

Na MC, que expressa o percentual de receita que permanece após a dedução dos custos variáveis, as maiores folgas foram registradas nas DMU-07, DMU-03, DMU-02, DMU-19 e DMU-25, com valores entre 6,2 e 6,5 pontos percentuais. Essas distâncias indicam margens insuficientes para sustentar o investimento de forma saudável, sendo fundamental agir tanto na elevação de receitas quanto na redução de custos. Entre as menores folgas estão DMU-15, DMU-06, DMU-20, DMU-23 e DMU-27, cujas lacunas variam de 0,7 a 3,1 pontos percentuais, indicando maior proximidade com o alvo e possibilidade de atingir a eficiência máxima com ajustes seletivos, como revisão de premissas de receita e custos otimizando o fluxo de caixa projetado.

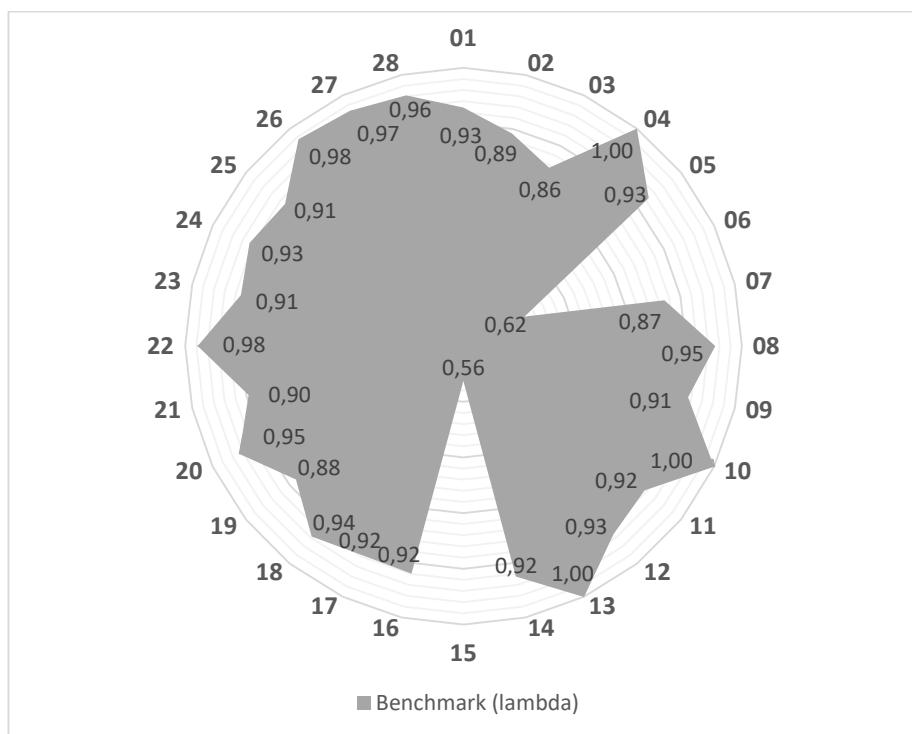
A leitura conjunta desses resultados permite identificar padrões importantes. Primeiramente, algumas DMUs figuram repetidamente entre as maiores folgas em diferentes indicadores, como DMU-01, DMU-07, DMU-03 e DMU-02. Isso sugere problemas sistêmicos ou múltiplos pontos de fragilidade, revelando projetos que apresentam a menor viabilidade econômico-financeira dentre as opções estudadas. Em segundo lugar, unidades como DMU-15, DMU-20 e DMU-06 aparecem, recorrentemente, entre as menores folgas. Essa observação revela uma grande oportunidade. As DMU-15, DMU-20 e DMU-06 podem elevar a eficiência e até atingir a fronteira máxima de eficiência com menor esforço sobre os indicadores individuais do que as DMU-01, DMU-07, DMU-03 e DMU-02.

Por fim, ainda que o foco desta subseção resida na análise das DMUs ineficientes, a presença das DMU-04, DMU-10 e DMU-13 como *benchmarks* é estratégica. Essas unidades provam que, dadas as variáveis de formação de seus fluxos de caixa e retornos, é possível alcançar folga zero em todos os indicadores. O desafio está em compreender as práticas que levaram a esse resultado e analisar a replicabilidade para as demais opções de investimento ineficientes, respeitando, obviamente, diferenças de estrutura, mercado e escala. Esse processo de transferência de conhecimento e adaptação de estratégias tem potencial para acelerar o fechamento das lacunas, aumentar a competitividade e sustentar ganhos de eficiência ao longo do tempo.

4.4 ANÁLISE DOS BENCHMARKS

A análise de *benchmark* no contexto do modelo DEA permite identificar quais unidades de decisão (DMUs) servem de referência para as demais, estabelecendo padrões de desempenho a serem seguidos. No presente estudo, as DMUs com eficiência máxima (score igual a 1), DMU-04, DMU-10 e DMU-13, ocupam o papel de *benchmark*, compondo a fronteira eficiente e servindo como modelos para os projetos ineficientes. O índice λ (*lambda*) associado a cada relação indica o grau de proximidade entre a DMU avaliada e seu *benchmark*, sendo que valores mais elevados sugerem maior similaridade e potencial de replicação das práticas observadas. Essa informação é relevante e estratégica pois possibilita avaliar as variações de desempenho entre *benchmarks* e as unidades menos eficientes. Para 4 DMUs (DMU-06, DMU-15, DMU-20 e DMU-23), o cálculo de eficiência identificou mais de uma DMU como referência. Para as análises de *benchmark*, o estudo considerou apenas a DMU com o maior λ .

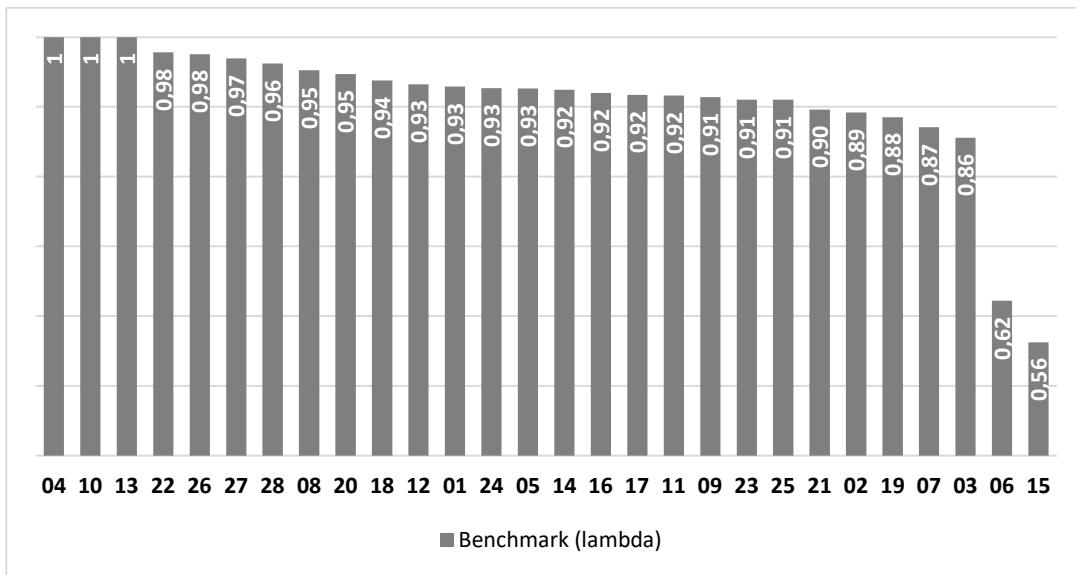
Gráfico 1: Proximidade de cada DMU em relação ao *benchmark*



Fonte: elaborado pelo autor

Os Gráficos 1 e 2 apresentam a proximidade de cada DMU em relação ao seu *benchmark*. Ambos os gráficos demonstram, de forma visual, as opções de investimento em bens de capital mais e menos eficientes. O Gráfico 1 está organizado de forma sequencial pelo número da DMU. Enquanto o Gráfico 2, está ordenado de forma decrescente pelo índice de proximidade da fronteira de eficiência.

Gráfico 2: Proximidade ao *benchmark* em ordem decrescente



Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, é apresentada uma matriz de referência cruzando as DMUs ineficientes com os *benchmarks*, servindo como base para a análise detalhada das relações e do papel de cada projeto no portfólio de investimentos em bens de capital sob estudo. Utilizando-se como referência a Tabela 4, no Quadro 7 é apresentada a relação entre os projetos de eficiência máxima e para quais projetos ele é *benchmark*.

Quadro 7: Matriz de *benchmark*

DMUs	Projetos de eficiência máxima		
	DMU-04	DMU-10	DMU-13
DMU-01		X	
DMU-02		X	
DMU-03		X	
DMU-04	X		
DMU-05		X	
DMU-06			X
DMU-07		X	
DMU-08		X	
DMU-09		X	
DMU-10		X	
DMU-11		X	
DMU-12		X	
DMU-13			X
DMU-14		X	
DMU-15			X
DMU-16		X	
DMU-17		X	
DMU-18		X	
DMU-19		X	
DMU-20		X	
DMU-21		X	
DMU-22		X	
DMU-23		X	
DMU-24		X	
DMU-25		X	
DMU-26		X	
DMU-27		X	
DMU-28		X	

Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos dados apresentados, observa-se que todo o conjunto de DMUs ineficientes está vinculado a pelo menos um dos três *benchmarks*: DMU-04, DMU-10 ou DMU-13. Entre eles, a DMU-10 desonta como a principal referência, sendo o *benchmark* mais recorrente e com os maiores valores de λ médios. Essa predominância indica que a DMU-10 reúne características operacionais e financeiras capazes de projetar, por similaridade, a maior parte dos demais projetos para a fronteira de eficiência. Valores de λ próximos ou superiores a 0,90, como no caso das DMU-08 (0,952188), DMU-22 (0,977912) e DMU-26 (0,975411), indicam

altíssima proximidade estrutural, sugerindo que as práticas adotadas pela DMU-10 podem ser incorporadas de forma relativamente simples e com alta probabilidade de ganho.

Em contrapartida, λ mais baixos revelam uma relação de referência mais fraca. Exemplos claros estão nas DMU-06 (0,621785 em relação à DMU-13) e DMU-15 (0,562408 em relação à DMU-13). Esses casos indicam que, embora exista proximidade suficiente para projeção, há diferenças relevantes que precisam ser ajustadas. Projetos com λ menores tendem a demandar maior esforço de adaptação das práticas do *benchmark*, pois a compatibilidade inicial é limitada.

Já a DMU-04 apresenta um papel residual na rede de *benchmarks*. Ela surge apenas como referência para si mesma (autorreferência), não projetando outras DMUs. Esse comportamento é típico de um ponto extremo na fronteira eficiente. Apresenta características únicas, com baixo potencial de replicabilidade aos demais projetos. Mesmo assim, trata-se de relevante unidade de análise pois compõe a definição da interseção e dos limites da fronteira de eficiência.

Ao relacionar λ com o *score* de eficiência, percebe-se um padrão: DMUs com *scores* mais altos tendem a ter λ elevados com seu *benchmark*, refletindo proximidade estrutural e necessidade de ajustes limitados para atingir a eficiência total. Por exemplo, DMU-20 (*score* 0,951753) tem $\lambda=0,946983$ em relação à DMU-10, enquanto DMU-23 (*score* 0,943838) apresenta $\lambda=0,910064$ para o mesmo *benchmark*. Por outro lado, projetos mais distantes da fronteira exibem λ menores, como DMU-15 (0,562408 para DMU-13), revelando maior heterogeneidade e desafios mais amplos de convergência, mesmo possuindo λ elevado (0,970218).

Em termos de gestão, a identificação de λ elevados é valiosa para avaliação estratégica e transferência de conhecimento. Para DMUs com forte aderência a um *benchmark*, recomenda-se replicar diretamente processos, estruturas e métodos de gestão, adaptando apenas aspectos contextuais. Já para aquelas com λ mais baixos, é necessário um diagnóstico profundo e abrangente. Identificar e selecionar quais práticas podem ser incorporadas e quais precisam ser reformuladas ou desenvolvidas com maior critério.

Por fim, a DMU que se destaca como referência para os demais projetos de investimento em bens de capital é a DMU-10, tanto pelo número de DMUs que

projeta quanto pelos valores de λ elevados associados. Sua capacidade de servir de modelo para uma ampla gama de contextos, no portfólio estudado, indica que suas práticas têm alto grau de generalização e aplicabilidade. Portanto, a DMU-10 deve ser priorizada e analisada, inclusive como opção para disseminação de boas práticas de resultados econômico-financeiros em projetos de investimentos em bens de capital para o escopo avaliado neste estudo.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A presente pesquisa, ancorada na aplicação da DEA com a abordagem DDF para construção de ICs, apresenta-se como uma possível contribuição no campo da avaliação de investimentos em bens de capital a partir da avaliação dos resultados da RSL. Conforme demonstrado no Quadro 2, embora todos os artigos analisados apliquem a DEA para avaliar investimentos, nenhum integrou a metodologia à construção de ICs. Tal lacuna metodológica posiciona esta dissertação como contribuição diferenciada, ao propor um modelo que sintetiza múltiplos indicadores financeiros em uma única métrica de eficiência, reduzindo subjetividade e aumentando a comparabilidade entre alternativas (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023; OECD, 2008).

No que se refere às variáveis de entrada e saída, o Quadro 3 evidencia outro ponto de distinção. Enquanto os estudos analisados adotaram indicadores distintos, frequentemente associados a métricas operacionais ou setoriais específicas (Chen *et al.*, 2017; Li; McNeil, 2021; Nguyen *et al.*, 2023), a presente pesquisa fundamenta a avaliação no conjunto composto por VPL, TIR, PB Simples, PB Descontado e MC. Esses indicadores, amplamente utilizados para análise de viabilidade econômica (Alhabeeb, 2016; Goncharuk, 2011), foram integrados ao modelo DDF da DEA para formar um IC, proporcionando uma visão holística da eficiência relativa aos investimentos. Essa escolha alinha-se ao objetivo geral do estudo, que é avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com ICs (OECD, 2001), e afasta-se das abordagens isoladas, que são predominantes na literatura.

Outro aspecto distintivo é a geração de um ranqueamento objetivo das alternativas de investimento, baseado nos scores de eficiência calculados pela DEA. O procedimento proposto e testado por esta pesquisa permite identificar, de forma direta, qual projeto apresenta maior retorno relativo frente aos recursos investidos. Essa priorização facilita a tomada de decisão gerencial, reforçando o papel da DEA como instrumento de apoio estratégico (Li; McNeil, 2021; Velasquez; Hester, 2013). Ao observar o Quadro 4, nota-se que os estudos correlatos aplicaram a DEA em contextos diversos, como sustentabilidade em nível macroeconômico (Chen *et al.*, 2017; Lin; Yan; Wang, 2019), infraestrutura viária (Li; McNeil, 2021) e indústria

alimentícia (Goncharuk, 2011). Essa abordagem reforça a relevância do presente trabalho, pois, como destacam (Södersten; Wood; Hertwich, 2018), ativos de capital possuem vida útil longa e impacto duradouro sobre a capacidade produtiva, exigindo métodos robustos para sua avaliação.

Além disso, a aplicação do modelo proposto atende à recomendação da literatura sobre a necessidade de superar limitações dos métodos tradicionais, como VPL e TIR isolados, que tendem a fornecer visões parciais (Alhabeeb, 2016; Goncharuk, 2011). A combinação de múltiplos indicadores financeiros no formato de IC, ponderados pela DEA, reduz o risco de decisões enviesadas por métricas únicas (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023), ao mesmo tempo em que incorpora resultados desejáveis e indesejáveis, característica viabilizada pelo uso da DEA DDF (Silva; Camanho; Barbosa, 2020).

Nesta primeira parte da avaliação, a comparação com a literatura revela que esta dissertação: (i) introduz a integração de DEA e ICs no contexto de investimentos em bens de capital; (ii) utiliza um conjunto específico de indicadores financeiros amplamente utilizados, mas não explorados de forma integrada nos estudos prévios; (iii) gera um ranqueamento direto das alternativas com base em *scores* de eficiência; e (iv) aplica a metodologia em um domínio até então pouco explorado, contribuindo para o avanço teórico e oferecendo ferramenta prática para gestores.

A Figura 5 da presente dissertação, intitulada “Procedimento para avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA”, foi desenvolvida a partir do *framework* elaborado por (Oliveira; Lima; Montevechi, 2016), originalmente concebido para orientar pesquisas em simulação de cadeias de suprimentos. Esse *framework* fornece uma estrutura lógica que organiza as principais fases de um estudo, assegurando coerência metodológica e alinhamento entre objetivos e resultados. A adaptação realizada nesta pesquisa preserva a lógica geral do *framework*, mas especializa suas etapas para o contexto da avaliação de investimentos de bens de capital por meio da DEA com DDF e ICs. Ela apresenta a mesma lógica sequencial do modelo original, mas introduz etapas e detalhamentos que o tornam aplicável a um campo distinto. Entre as fases estruturantes destacam-se: (i) Conceitualização, que compreende a definição do escopo de análise, a identificação do portfólio de projetos e a caracterização dos bens de capital

entregando um modelo conceitual; (ii) Modelagem, que envolve a definição e cálculo dos indicadores aplicáveis ao investimento, estabelecendo a base de dados que será utilizada na análise, gerando um modelo científico; (iii) Solução do Problema, na qual se aplica o modelo DEA-DDF para obtenção dos *scores* de eficiência e demais métricas necessárias, apresentando uma solução; e (iv) Implementação, que contempla a análise e interpretação dos resultados, a geração do ranqueamento de alternativas e a identificação de *benchmarks* para subsidiar a tomada de decisão, podendo ser avaliada a efetividade após a implementação do projeto.

Essas etapas, embora inspiradas no *framework* original, ampliam seu escopo ao integrar um método de mensuração de eficiência que combina múltiplos indicadores em um único resultado sintético. Ao fazê-lo, o procedimento proposto confere maior objetividade ao processo decisório, superando limitações de análises fragmentadas e permitindo comparações mais amplas entre as alternativas. Essa abordagem contribui para a robustez do estudo, alinhando-se à proposta de oferecer um modelo metodológico que sintetiza, em um procedimento estruturado, desde a preparação e organização dos dados, a aplicação e interpretação dos resultados até a implementação pelos decisores da organização.

Por seu caráter estruturado e adaptável, o procedimento da Figura 5 pode superar os limites desta dissertação, podendo ser utilizada como referência em estudos futuros que tratem da avaliação de investimentos ou da aplicação da DEA em diferentes setores. Sua organização em fases, com destaque para Conceitualização, Modelagem, Solução do Problema e Implementação, oferece aos pesquisadores um guia replicável que pode ser ajustado conforme as especificidades de cada contexto de estudo. Ao mesmo tempo, consolida-se como contribuição para a literatura, pois traduz um *framework* para um campo ainda pouco explorado sob essa perspectiva metodológica, reforçando a aplicabilidade e o potencial de utilização em pesquisas futuras.

A leitura conjunta dos resultados indica um panorama coerente entre o desempenho dos indicadores individuais (Tabela 2), os *scores* de eficiência e o ranqueamento produzidos pela modelagem (Tabela 3), as distâncias até a fronteira expressas por alvos e folgas (Tabela 4) e a estrutura de referência entre projetos (Gráfico 1 e Quadro 7). A Tabela 2 já sinaliza, de forma descritiva, uma concentração

de bom desempenho em torno de algumas DMUs específicas, que reaparecem como eficientes na Tabela 3. Em particular, DMU-04, DMU-10 e DMU-13 são recorrentes entre as melhores posições de VPL, TIR, PB (Simples e Descontado) e MC, o que antecipa a eficiência plena observada depois. Esse padrão sugere convergência de atributos desejáveis: geração de valor, rentabilidade, recuperação rápida do investimento e margens adequadas. A consistência desses quatro eixos ajuda a explicar por que essas alternativas atingem score 1, configurando-se como referências internas.

Quando se observa, detalhadamente, a Tabela 2, nota-se que os melhores valores de VPL concentram se em DMU-13, DMU-15, DMU-06, DMU-10 e DMU-23, enquanto a TIR destaca DMU-04, DMU-10, DMU-20, DMU-23 e DMU-13. Os prazos mais curtos de PB Simples (quanto menor, melhor) ocorrem novamente em DMU-04, DMU-10, DMU-20 e DMU-23, seguidos de valores muito próximos em DMU-06 e DMU-13. O PB Descontado repete o desenho geral do PB Simples. Por fim, as maiores MC concentram se em DMU-10, DMU-23, DMU-04, DMU-20 e DMU-15. Esse cruzamento fortalece a leitura de que DMU-04, DMU-10 e DMU-13, além de figurarem entre os melhores em múltiplos indicadores, compõem combinações equilibradas e robustas para sustentar a eficiência global. Há, contudo, nuances relevantes: DMU-15 e DMU-23 despontam muito bem em VPL e MC, porém, não atingem a fronteira de eficiência em razão do pior desempenho dos demais indicadores individuais em relação as DMUs eficientes.

A Tabela 3 materializa esse raciocínio por meio dos scores de eficiência e do ranqueamento. As três unidades na fronteira da eficiência (DMU-04, DMU-10 e DMU-13) formam o conjunto de referência, enquanto um grupo imediatamente subsequente (DMU-15, DMU-20, DMU-06 e DMU-23), apresenta scores elevados, entre 0,94 e 0,97. Em termos gerenciais, esse bloco compõe a “faixa de prioridade alta” para execução, pois exige esforços marginais para alcançar a fronteira de eficiência. O indicador *Beta* ajuda a qualificar a intensidade desses esforços: DMU-15 (*Beta* ≈ 0,031), DMU-20 (*Beta* ≈ 0,051) e DMU-06 (*Beta* ≈ 0,051) têm lacunas pequenas, coerentes com ajustes táticos e melhorias de baixa complexidade. DMU-23, com *Beta* próximo de 0,060, ainda está em posição confortável, porém demandará intervenções um pouco mais abrangentes para chegar a 1,00. Em

seguida, um bloco intermediário (DMU-27, DMU-08, DMU-22, DMU-26 e DMU-28) apresenta *scores* entre $\approx 0,83$ e $0,88$ e *Betas* que já ultrapassam $0,14$, sugerindo necessidade de planos mais estruturados. Por fim, a cauda do ranqueamento (DMU-03, DMU-07, DMU-02, DMU-19, DMU-21), com *scores* entre $\approx 0,71$ e $0,74$, indica baixa atratividade relativa no momento, uma vez que a distância até a fronteira (*Betas* entre $\approx 0,356$ e $0,407$) implicaria reconfigurações significativas para tornar essas alternativas competitivas.

A Tabela 4 aprofunda os diagnósticos de eficiência ao apresentar e detalhar os alvos e folgas de cada indicador, evidenciando as relações de *benchmark* entre as DMUs. O padrão de referência é dominado pela DMU-10, que aparece com elevado λ em grande parte das projeções. Como por exemplo, λ entre $\approx 0,952$ e $0,978$ para DMU-08, DMU-22 e DMU-26. Esse comportamento indica uma forte similaridade estrutural e um expressivo potencial de transferência de boas práticas, reforçando o papel da DMU-10 como modelo a ser seguido pelo desempenho ótimo observado. A DMU-13, por sua vez, destaca-se como referência para duas DMUs, além de si própria. O desempenho verificado ficou em $\lambda \approx 0,622$ para a DMU-06 e $\lambda \approx 0,562$ para a DMU-15, evidenciando um padrão de eficiência relevante para a difusão de boas práticas com ambas. Em contraste, a DMU-04 atua como ponto extremo da fronteira. Serve, basicamente, de autorreferência. Trata-se de perfil eficiente, porém, não replicável, típico de DMUs com configuração muito específica de insumos e resultados.

Essas análises ilustram, de forma concreta, a aplicabilidade do uso da DEA combinada com ICs para avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital. Enquanto a análise individual de indicadores apontaria desempenhos isolados, a DEA permite integrar múltiplas dimensões de desempenho, identificando quais unidades servem de referência sistêmica para o conjunto. Assim, a aplicação do modelo DEA não apenas quantifica a eficiência relativa, mas revela a estrutura de interdependência e o potencial de comparação e repetibilidade entre as DMUs. Dessa forma, a técnica apresenta a fronteira de eficiência construída a partir de combinações de boas práticas replicáveis, demonstrando o ganho analítico e interpretativo da abordagem adotada neste trabalho.

No detalhe das folgas, o VPL expõe onde estão as maiores lacunas absolutas: DMU-01, DMU-28, DMU-08, DMU-05 e DMU-16 registram distâncias expressivas até seus alvos, exigindo ganhos de escala de valor que, em geral, combinam ajustes de receita com revisão de custos. Em contraste, DMU-07, DMU-03, DMU-02, DMU-25 e DMU-14 apresentam folgas de VPL menores, sinalizando oportunidades mais tangíveis para avanço. Na TIR, as maiores se folgas concentram em DMU-01, DMU-09, DMU-18, DMU-28 e DMU-22 (diferenças acima de 1,5 pontos percentuais), enquanto DMU-07, DMU-03, DMU-15, DMU-02 e DMU-06 demandam correções discretas (0,2 a 0,5 pontos percentuais). Já os prazos de PB (Simples e Descontado), mantêm o padrão de interpretação (quanto menor, melhor), e os resultados reforçam a leitura: DMU-15, DMU-20, DMU-06, DMU-23 e DMU-27 estão relativamente próximos do alvo (variações entre -0,1 e -0,7 anos), ao passo que DMU-03, DMU-07, DMU-02, DMU-19 e DMU-21 exibem lacunas entre -1,7 e -2,8 anos, sugerindo maior esforço para adequação do tempo de retorno. Por fim, as folgas de MC são mais críticas em DMU-07, DMU-03, DMU-02, DMU-19 e DMU-25 (entre 6,2 e 6,5 pontos percentuais), enquanto DMU-15, DMU-06, DMU-20, DMU-23 e DMU-27 mostram *gaps* moderados (0,7 e 3,1 pontos percentuais). Em suma, o mapa de folgas confirma porque determinadas DMUs estão “quase eficientes” e porque outras se mantêm distantes da fronteira.

A relação entre *scores* e λ , reforçada pelo Gráfico 1 e sistematizada no Quadro 7, é particularmente útil para o planejamento de ações. Em linhas gerais, DMUs com *scores* mais altos tendem a apresentar λ elevados frente ao *benchmark* (quase sempre DMU-10), o que indica que pequenas adaptações podem ser suficientes para alcançar a eficiência plena. É o caso, por exemplo, de DMU-20 ($score \approx 0,952$; $\lambda=0,946983$ para DMU-10) e DMU-23 ($score \approx 0,944$; $\lambda=0,910064$ para DMU-10): proximidades altas sugerem que a replicação de práticas de DMU-10 (com a devida adequação ao contexto) tende a produzir ganhos rápidos e mensuráveis. Em contrapartida, λ mais baixos, como em DMU-15 (0,562408 em relação a DMU-13) e DMU-06 (0,621785 em relação a DMU-13), indicam que, embora a referência seja válida, haverá necessidade de ajustes mais substantivos na combinação de atributos para convergir à fronteira. Esse achado orienta a intensidade do plano de melhoria: quanto menor o λ , maior a atenção a redesenhos de escopo, processos e premissas.

Do ponto de vista gerencial, essa arquitetura de evidências permite montar um roteiro de implementação por ondas. A primeira onda, além dos *benchmarks* (DMU-04; DMU-10; DMU-13) reúne as DMUs de alta prioridade (DMU-15, DMU-20, DMU-06 e DMU-23), que, por estarem próximas da fronteira de eficiência, e por exibirem folgas modestas em PBs, TIR e MC, podem ser alavancadas rapidamente via ações táticas: calibragem fina de custos variáveis, ajustes de *mix* e ganhos de produtividade que encurtem prazos e reforcem margens, além de medidas pontuais de captura de receita. A segunda onda inclui DMU-27, DMU-08, DMU-22, DMU-26 e DMU-28; aqui, além de iniciativas táticas, será necessário um programa estruturado, com metas por indicador e prazos de revisão, para reduzir lacunas de VPL e MC e ajustar tempos de retorno. A terceira onda inclui as DMU-03, DMU-07, DMU-02, DMU-19 e DMU-21 que ficaram nas últimas colocações no *ranking* de priorização. Essas 5 DMUs demandam decisões estratégicas, um redesenho profundo (reavaliação de premissas de mercado, cronograma e estrutura de custos) ou a postergação/ eliminação, conforme as necessidades de atendimento e gargalos produtivos além da própria restrição orçamentária.

No plano acadêmico, os resultados reforçam três contribuições. Primeiro, a integração de múltiplos indicadores aplicáveis ao investimento em um procedimento único, com síntese via DEA DDF, demonstrou capacidade de traduzir desempenhos heterogêneos em um *ranking* objetivo, o que não é obtido quando se comparam indicadores de forma isolada. Segundo, a incorporação explícita de alvos e folgas por indicador, vinculados a *benchmarks* internos amplia a utilidade do modelo para além do diagnóstico, pois aponta a direção e a intensidade de mudança necessárias. Terceiro, a análise de relações de referência (proximidade e matriz do Quadro 7) permite estudar difusão de práticas dentro da própria carteira, fornecendo um elo metodológico entre avaliação e implementação que é pouco explorado em estudos de investimentos de bens de capital. Em termos metodológicos, chama atenção ainda a coerência entre as peças: valores de *Beta* e padrões de λ alinhados ao desempenho da Tabela 2 explicam, sem contradições, o posicionamento no *ranking* da Tabela 3.

Operacionalmente, a figura de DMU-10 como principal *benchmark* emerge com clareza. A recorrência de λ elevados em direção a essa unidade sugere que ela

combina atributos replicáveis nos demais projetos: desempenho sólido nos indicadores, equilíbrio entre geração de valor e prazos de retorno e margens compatíveis com a fronteira eficiente. Do ponto de vista da governança do portfólio, a Tabela 4 oferece ainda um recurso de monitoramento. A redução sistemática das folgas de PBs e TIR para a “faixa de quase eficientes” pode ser usada como marcos de curto prazo, enquanto a aproximação de VPL e MC aos alvos funciona como verificação de sustentação econômica de médio prazo. Em outras palavras, o modelo não apenas prioriza, mas também sugere que sequência de métricas acompanhar para reduzir o risco de avanços pontuais que não se traduzam em ganho econômico líquido.

Por fim, cabe registrar uma observação técnica advinda dos próprios resultados: em alguns casos, o somatório entre o *score* e o *Beta* ultrapassa ligeiramente 1, mostrando a possibilidade de obtenção da supereficiência da DMU. Esse fato evidencia que o *Beta* não atua como simples complemento numérico do *score*, mas como distância direcional até a fronteira segundo o modelo adotado. Não se trata de inconsistência dos dados, e sim de propriedade do procedimento de projeção utilizado. Esse ponto não altera as conclusões de priorização e, de todo modo, reforça a importância de ler *score* e *Beta* de forma conjunta, sempre à luz das folgas por indicador e das relações de referência.

Em síntese, a leitura integrada das Tabelas 2, 3 e 4, do Gráfico 1 e do Quadro 7 consolida um diagnóstico robusto e acionável. No campo acadêmico, demonstra a utilidade de sintetizar múltiplos indicadores aplicáveis ao investimento via modelagem de eficiência, articulando avaliação, metas e referências em uma única moldura analítica. No campo gerencial, entrega um roteiro claro: priorizar o bloco de eficientes (DMU-04, DMU-10 e DMU-13), depois as quase eficientes (DMU-15, DMU-20, DMU-06, DMU-23), promover programas de melhoria para o grupo intermediário e reavaliar estrategicamente as alternativas na cauda do *ranking*. Executar essas etapas alavancando a DMU-10 como referência principal e DMU-13 como referência auxiliar, usando as folgas por indicador como guia de execução e os λ como bússola de proximidade. Esse encadeamento confere previsibilidade ao processo decisório e cria as bases para ciclos de melhoria contínua do portfólio de investimentos em bens de capital.

5.1 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS E PRÁTICAS DA PESQUISA

Para sintetizar as inovações metodológicas e as implicações gerenciais derivadas dos resultados (Tabelas 2, 3 e 4, Gráficos 1 e 2 e Quadro 7) e do procedimento proposto na Figura 5, apresenta-se a seguir o Quadro 8: Síntese das principais contribuições do estudo. Ele organiza, de forma objetiva, as contribuições teóricas (CT) e práticas (CP), com seu respectivo lastro empírico no trabalho.

Quadro 8: Síntese das principais contribuições do estudo

Tipo	Código	Contribuição (resumo)	Evidências no estudo
Teóricas	CT-1	Integra a DEA-DDF à construção de um IC aplicável à avaliação de investimentos em bens de capital, superando o uso isolado de métricas e a lacuna identificada na RSL.	Tabela 3 (<i>ranking</i> objetivo), Figura 5 (procedimento), comparação com RSL (Quadro 2).
	CT-2	Adapta o <i>framework</i> desenvolvido por Oliveira, Lima e Montevechi (2016) para um procedimento específico de avaliação de investimentos, estruturado em Conceitualização, Modelagem, Solução do Problema e Implementação.	Figura 5 (procedimento), texto da discussão comparativa.
	CT-3	Conecta eficiência relativa a metas operacionais por meio de alvos e folgas por indicador, explicitando caminhos de melhoria dentro do próprio modelo.	Tabela 4 (alvos/folgas), análise por indicador.
	CT-4	Consolida múltiplos indicadores aplicáveis ao investimento em um único <i>score</i> , permitindo priorização comparável entre projetos heterogêneos.	Tabelas 2 e 3 (da leitura individual à síntese), análise integrada.
	CT-5	Esclarece a leitura conjunta de <i>score</i> e <i>Beta</i> na DDF (incluindo casos em que <i>score</i> + <i>Beta</i> > 1), refinando a interpretação técnica do distanciamento à fronteira.	Observação técnica na discussão dos resultados.
Práticas	CP-1	Fornece roteiro de priorização por ondas (alta prioridade, intermediária, cauda), calibrado por <i>score</i> , <i>Beta</i> , λ e folgas; transforma diagnóstico em plano de execução.	Tabela 3 (<i>ranking</i>), Tabela 4 (folgas), Quadro 7 e Gráfico 1 (proximidade/ <i>benchmark</i>).
	CP-2	Direciona intervenções por indicador (onde atuar em VPL, PBs, TIR, MC), reduzindo dispersão decisória e aumentando efetividade de melhorias.	Tabela 4 (folhas de rota por DMU e indicador).
	CP-3	Institui <i>benchmark</i> interno robusto (DMU-10 como referência principal; DMU-13 como complementar) para difusão de práticas com alta probabilidade de ganho.	Quadro 7 (matriz de <i>benchmark</i>), Gráfico 1 (proximidade λ).
	CP-4	Estabelece lógica de governança e monitoramento: metas de curto prazo em PBs/ TIR e de sustentação econômica em VPL/ MC.	Tabela 4 (alvos e folgas), encadeamento de métricas.
	CP-5	Oferece procedimento replicável (Figura 5) para avaliação de investimentos em bens de capital, escalável para carteiras distintas e útil a gestores e pesquisadores.	Figura 5 (procedimento), integração das análises.

Fonte: elaborado pelo autor

No plano teórico, a contribuição central de CT-1 reside em avançar a fronteira metodológica ao integrar a DEA-DDF com a construção de IC voltado a avaliação de investimentos em bens de capital. A RSL evidenciou o uso de DEA com a síntese em um índice único comparável entre as alternativas de investimento. Neste trabalho, a modelagem produz um *ranking* objetivo (Tabela 3) que se apoia na leitura

multidimensional dos indicadores aplicáveis ao investimento (Tabela 2), permitindo comparações consistentes entre projetos com perfis distintos. Essa síntese resolve um problema recorrente em estudos de viabilidade: a dificuldade de conciliar métricas com sinais e escalas diferentes, mantendo rigor no tratamento de resultados desejáveis e indesejáveis.

Em paralelo, a adaptação do *framework* desenvolvido por Oliveira, Lima e Montevechi (2016) para o contexto de avaliação de investimentos em CT-2, materializa-se na Figura 5, que ordena o processo em quatro etapas: Conceitualização, Modelagem, Solução do Problema e Implementação. Essa moldura dá previsibilidade ao fluxo analítico: do escopo e caracterização dos projetos (Conceitualização), à definição e cálculo dos indicadores aplicáveis (Modelagem), à execução do modelo DEA-DDF (Solução do Problema), chegando à interpretação e decisão (Implementação). O resultado é um procedimento, que se encaixa naturalmente à lógica de portfólio e facilita a replicação da modelagem para outras realidades, problemas ou situações.

A terceira contribuição teórica CT-3, é o “fechamento do ciclo” entre mensuração e ação: ao incorporar alvos e folgas por indicador (Tabela 4). O estudo converte a eficiência relativa em um mapa de distâncias operacionais, explicitando “quanto” e “onde” melhorar para atingir a fronteira. Esse desenho ainda dialoga com CT-4, onde a consolidação de múltiplos indicadores em um *score* único, sem perder a objetividade necessária para direcionar as melhorias. Por fim, CT-5 esclarece a leitura conjunta de *score* e *Beta* no contexto da DDF, incluindo a observação de que, em certos casos, o somatório pode ultrapassar 1, mostrando a possibilidade de obtenção da supereficiência da DMU. Não implica em inconsistência, mas um refinamento interpretativo útil a estudos futuros que venham a empregar a função direcional.

Do lado prático, as contribuições colocam a organização em posição de agir. O roteiro por ondas CP-1 transforma a fotografia do *ranking* (Tabela 3) e as distâncias (Tabela 4) em cronograma: primeiro as eficientes, segundo as quase eficientes (pouco esforço para atingir a eficiência plena), depois as intermediárias (programas estruturados de ganho), por fim a cauda (rever premissas, postergar ou eliminar). Essa priorização é reforçada pela leitura de proximidade ao *benchmark*

(Gráfico 1) e pela matriz do Quadro 7, que tornam a transferência de práticas mais objetiva e clara. Com CP-2, o gestor sai do genérico para o específico: identifica se a trava é VPL, prazos de retorno, TIR ou MC e, qual intensidade. Isso encurta o ciclo entre diagnóstico e intervenção, permitindo verificação e atuação projeto a projeto.

A contribuição CP-3 formaliza o papel de DMU-10 como referência predominante e de DMU-13 como apoio. Essa evidência que emerge da frequência e magnitude de λ no Quadro 7. Essa “dupla de *benchmarks*” organiza a difusão interna. Onde há alta proximidade com a DMU-10, replicar práticas tende a gerar ganhos rápidos. Quando a aderência é maior a DMU-13, opta-se por ajustes seletivos que respeitam a combinação de atributos daquela referência. Em CP-4, a seção de governança propõe um encadeamento de monitoramento: metas de curto prazo nos PBs e na TIR (velocidade de retorno e rentabilidade), com validação de sustentabilidade por VPL e MC (resultado econômico líquido). Essa cadênciav evita erros nas avaliações das opções de investimento mais eficientes e ancora as decisões em indicadores de resultado.

Por último, CP-5 destaca o valor instrumental da Figura 5. Além de sintetizar o aprendizado do estudo, ela padroniza o procedimento para novas avaliações de projetos em bens de capital. Em termos de utilidade, o procedimento é suficientemente geral para acomodar outras combinações de indicadores aplicáveis ao investimento, mantendo o mecanismo de síntese (DEA-DDF), a inteligência de metas (alvos/folgas) e a lógica de referência (λ). Isso facilita a adoção por equipes distintas e oferece a pesquisadores um procedimento claro para replicação, extensão e testes comparativos.

Em conjunto, as contribuições teóricas estabelecem um avanço metodológico, e um caminho de mensuração que começa na pluralidade dos indicadores e culmina em um *ranking* interpretável e açãoável. Já as contribuições práticas convertem esse avanço em decisões melhores: o que priorizar, onde intervir, como difundir boas práticas e como acompanhar se os ganhos realmente se materializam no resultado econômico. Essa combinação confere robustez acadêmica e utilidade gerencial à proposta, reforçando seu potencial de aplicação em avaliações futuras de investimentos em bens de capital e em agendas de pesquisa derivadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais desta dissertação retomam o objetivo geral: avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com ICs por meio da DEA (via DDF). As Tabelas 2, 3 e 4 demonstram, respectivamente, o comportamento dos indicadores aplicáveis ao investimento, a eficiência relativa e as distâncias até a fronteira; o Gráfico 1 e o Quadro 7 evidenciam a proximidade de cada DMU aos seus *benchmarks*; e a Figura 5 organiza o procedimento em fases claras, oferecendo um caminho replicável da preparação dos dados até a decisão.

A síntese dos achados indica convergência entre as leituras descritiva e de fronteira de eficiência. As DMU-04, DMU-10 e DMU-13 apresentam eficiência plena e, de modo consistente com a Tabela 2, reúnem combinações favoráveis de geração de valor (VPL), rentabilidade (TIR), prazos de retorno (PB Simples e Descontado) e MC. Logo abaixo, forma-se a “faixa quase eficiente” (DMU-15, DMU-20, DMU-06 e DMU-23), com *scores* elevados (Tabela 3) e *Betas* reduzidos, sinalizando esforço incremental para atingir a fronteira de eficiência. A conexão entre *score*, *Beta*, λ e folgas explica o ranqueamento: onde λ é alto em direção ao *benchmark* (em geral, DMU-10) e as folgas por indicador são modestas (Tabela 4), observa-se menor distância operacional; onde λ diminui e as folgas aumentam, a convergência requer mudanças mais abrangentes. Essa leitura conjunta evita interpretações parciais e sustenta a priorização.

Do ponto de vista científico, a dissertação cumpre importante papel ao reunir todos os aspectos ao mesmo tempo: DEA, DEA modelo DDF, BoD e ICs, aplicados à avaliação da eficiência em investimentos de bens de capital. Aliada ainda a evidência apontada na RSL do uso de DEA para sintetizar uma série de indicadores individuais em um indicador agregado, o chamado IC, que permite a comparabilidade entre as várias DMUs, nesse caso, os projetos de investimento em bens de capital. A adaptação do *framework* desenvolvido por Oliveira, Lima e Montevechi (2016) para a área de investimentos em bens de capital, estruturando o processo em Conceitualização, Modelagem, Solução do Problema e Implementação, permitiu acoplar a construção do IC e a execução da DEA-DDF em um mesmo fluxo analítico (Figura 5). A leitura combinada de *score* e *Beta*, articulada às folgas por indicador,

contribui para a interpretação técnica da distância direcional: o *score* posiciona a DMU, o *Beta* quantifica o quanto falta em termos de projeção até a fronteira, e as folgas detalham “onde” atuar.

As implicações gerenciais derivam diretamente dessa arquitetura de resultados. Primeiro, a priorização de realização dos investimentos por ondas: (i) as opções que formam a fronteira de eficiência (DMU-04, DMU-10 e DMU-13); (ii) após, as quase eficientes (DMU-15, DMU-20, DMU-06, DMU-23) são candidatas à execução, pois exibem *Betas* pequenos e alta proximidade com os *benchmarks*; (iii) o bloco intermediário (DMU-27, DMU-08, DMU-22, DMU-26, DMU-28) que demanda programas de melhoria com metas por indicador; (iv) a cauda (DMU-03, DMU-07, DMU-02, DMU-19, DMU-21), que requer reavaliação estratégica de premissas, postergação ou eliminação. Segundo, o foco de intervenção por indicador: no curto prazo, concentrar esforços em PBs e TIR para acelerar retorno e rentabilidade; no médio prazo, consolidar ganhos via VPL e MC, assegurando sustentação econômica.

A robustez e a aplicabilidade do procedimento emergem da Figura 5 e de seu encadeamento lógico. O procedimento proposto organiza desde a seleção dos indicadores individuais, a preparação da base de dados, passa pela proposição de uma solução para o problema de eficiência e finaliza com a implementação das decisões. Essa estrutura facilita sua replicação a outros projetos de avaliação de investimento em bens de capital. É possível replicá-lo mesmo com conjuntos distintos de DMUs, preservando o mecanismo de síntese (DEA-DDF), a lógica de metas (alvos e folgas) e o uso de *benchmarks* internos (λ) para orientar a execução. No plano operacional, a identificação de DMU-10 como referência predominante e de DMU-13 como referência complementar oferece um eixo prático de difusão de práticas no portfólio.

Como toda pesquisa aplicada, há limitações. No campo acadêmico, o escopo amostral e as premissas associadas aos indicadores individuais aplicáveis aos projetos de investimentos sob análise, podem restringir a generalização direta para contextos diversos do estudado. A qualidade dos dados analisados condiciona o posicionamento relativo das DMUs e pode refletir características setoriais ou contingenciais. Além disso, a escolha do modelo DDF e das variáveis de avaliação,

ainda que tecnicamente justificadas, influencia a geometria da fronteira e, por consequência, o padrão de projeções e das decisões de realização ou não do investimento em bens de capital, podendo interferir, inclusive, na decisão de qual (ou quais) dentre as opções de investimento realizar.

No campo gerencial, foram identificadas 3 limitações para a aplicação do procedimento proposto na Figura 5. A primeira, está relacionada ao rigor da técnica DEA que pode inviabilizar a sua utilização para avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital. A aplicação da DEA exige que, a quantidade de DMUs avaliadas, seja de, no mínimo, 3 vezes o número de *inputs* e *outputs*. Para este estudo, a exigência era de, pelo menos, 18 DMUs. Este pré-requisito foi atendido ao estabelecer, como horizonte de tempo para a seleção das DMUs, os últimos 5 anos. Para garantir bases de precificação, geração de receitas e realização de gastos comparáveis, os Fluxos de Caixa Projetados, de cada DMU, foram corrigidos até o ano de 2025. Foi utilizado o IPCA, conforme índices da Tabela1, para realizar a correção de acordo com o ano em que ocorreu a análise do bem de capital avaliado. A segunda limitação está associada aos dados utilizados, pois a aplicação de indicadores econômico-financeiros exige zelo, ponderação e dados exatos. Antes mesmo dos cálculos dos indicadores individuais, que demandam igual atenção e conhecimento, a Projeção dos Fluxos de Caixa é a fase crítica, que determina se os resultados serão corretos, precisos e aplicáveis. A indisponibilidade de pessoal capacitado para a atividade pode impossibilitar a aplicação da avaliação. Contar com o apoio de especialistas auxilia a reduzir as chances de erro, pois participam ativamente de todo o processo incluindo a análise crítica, validação e autenticação da metodologia, dos dados e dos resultados. A terceira limitação é o acesso a software com capacidade técnica para executar o modelo de DEA definido. Softwares com essa capacidade estão disponíveis apenas através de versões pagas. A utilização não recorrente torna a aquisição de licença cara e com baixa relação custo-benefício. Alternativamente, os cálculos podem ser realizados via parceria com pesquisadores ou instituições de ensino, que detenham a ferramenta adequada. Neste trabalho, foi utilizado para calcular o indicador agregado ou IC, o software MaxDEA na versão 12.2. O curso de Mestrado/ Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas da UNISINOS possui licença para acesso. Também

compõe fator preponderante a detenção de conhecimento e apoio de pessoal capacitado para utilização do programa de computador. Nesta pesquisa, foi imprescindível a expertise do professor orientador para executar o modelo no *software*.

As oportunidades para pesquisas futuras existem. Recomenda-se: (i) testar o procedimento em outros setores e perfis de risco, incorporando cenários diversos e ramos de atuação; (ii) comparar a DDF com outros modelos de DEA, avaliando estabilidade de *scores* e projeções; (iii) explorar a sensibilidade dos resultados a diferentes conjuntos de indicadores individuais, não apenas os estritamente econômico-financeiros (pode conduzir a uma decisão ainda mais assertiva); (iv) agregar, à decisão de investimento, aspectos qualitativos aos fornecedores e aos bens de capital sob análise, e; (v) executar todo o procedimento da Figura 5, inclusive, a fase de implementação, mensurando e comparando resultados reais com os projetados.

Encerrando, a dissertação cumpre o objetivo geral e os objetivos específicos. Foi proposto um procedimento para avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital por meio de ICs com a DEA; o procedimento foi testado, identificando unidades eficientes e prioridades de execução; e os resultados, contribuições e limitações foram analisados. No plano teórico, a integração DEA-DDF e IC, articulada a metas e *benchmarks* internos, oferece um caminho para mensuração e comparação. No plano gerencial, o uso combinado de *score*, *Beta*, λ e folgas entrega critérios práticos de priorização, intervenção e monitoramento. Em termos de decisão, o procedimento aumenta a assertividade na alocação de capital ao transformar múltiplas medidas em um roteiro operacionalmente claro. Delineia o caminho do diagnóstico à implementação, contribuindo para escolhas mais assertivas com base em análises fundamentadas e alinhadas à criação de valor no portfólio de investimentos. Pelo exposto, o problema de pesquisa foi resolvido com sucesso. A combinação das técnicas de DEA no modelo DDF com ICs, possibilita uma abordagem robusta. Além de abranger aspectos técnicos e teóricos, se alia com indicadores financeiros amplamente utilizados, que, neste estudo, formam o conjunto de indicadores individuais aplicados para gerar o indicador agregado, o IC.

REFERÊNCIAS

- ALHABEEB, M. J. Comparative Analysis of the Traditional Models for Capital Budgeting. **International Journal of Marketing Studies**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 16, 2016.
- ANG, Sheng; CHEN, Chien Ming. Pitfalls of decomposition weights in the additive multi-stage DEA model. **Omega (United Kingdom)**, [s. l.], v. 58, p. 139–153, 2016.
- APARICIO, Juan; KAPELKO, Magdalena; MONGE, Juan F. A Well-Defined Composite Indicator: An Application to Corporate Social Responsibility. **Journal of Optimization Theory and Applications**, [s. l.], v. 186, n. 1, p. 299–323, 2020.
- APPOLINÁRIO, Fábio. **Dicionário de Metodologia Científica: um guia para a produção do conhecimento científico**. 2^aed. São Paulo: Atlas, 2011.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/meubc/calculadoradocidadao>. Acesso em: 28 jul. 2025.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C.; UDENIO, Maxi. Model-based research. In: KARLSSON, Christer (org.). **Research Methods for Operations and Supply Chain Management**. 3^aed. London: Routledge - Taylor & Francis Group, 2024. p. 274–311.
- CAMANHO, Ana S.; D'INVERNO, Giovanna. Data Envelopment Analysis: A Review and Synthesis. In: ADVANCED MATHEMATICAL METHODS FOR ECONOMIC EFFICIENCY ANALYSIS. [S. l.: s. n.], 2023. p. 33–54.
- CAMANHO, Ana S.; ZANELLA, Andreia; MOUTINHO, Victor. Benefit-of-the-Doubt Composite Indicators and Use of Weight Restrictions. In: MACEDO, Pedro; MOUTINHO, Victor; MADALENO, Mara (org.). **Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis - Theory and Empirical Applications**. [S. l.: s. n.], 2023. v. 692, p. 93–112.
- CAMARGO JUNIOR, Alceu Salles; MATIAS, Alberto Borges; MARQUES, Felipe Tumenas. Desempenho dos bancos comerciais e múltiplos de grande porte no Brasil. **CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CHARNES**, [s. l.], 2004.
- CAUCHICK-MIGUEL, Paulo Augusto et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3^aed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

CHEN, Lei *et al.* An investment analysis for China's sustainable development based on inverse data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 142, p. 1638–1649, 2017.

CHUNG, Y H; FÄRE, R; GROSSKOPF, S. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 51, p. 229–240, 1997.

COELLI, Timothy J. *et al.* **An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis**. 2^aed. New York: Springer-Verlag, 2005.

COOK, Wade D.; SEIFORD, Larry M. Data envelopment analysis (DEA) - Thirty years on. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 192, n. 1, p. 1–17, 2009.

DARAIO, Cinzia *et al.* Empirical surveys of frontier applications: a meta-review. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 709–738, 2020.

DEY, Prasanta Kumar *et al.* Performance Management of Supply Chain Sustainability in Small and Medium-Sized Enterprises Using a Combined Structural Equation Modelling and Data Envelopment Analysis. **Computational Economics**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 573–613, 2021.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. 1^aed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

EIDELWEIN, Fabrício *et al.* Precisão conceitual em Engenharia de Produção: uma abordagem teórica. **Revista Espacios**, [s. l.], v. 37, n. 26, 2016. Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a16v37n26/16372606.html>.

EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE.; ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Handbook on constructing composite indicators : methodology and user guide**. [S. l.]: OECD, 2008.

FUSCO, Elisa. Enhancing non-compensatory composite indicators: A directional proposal. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 242, n. 2, p. 620–630, 2015.

GAO, Ru; YU, Xin. How to measure capital investment efficiency: a literature synthesis. **Accounting and Finance**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 299–334, 2020.

GONCHARUK, Anatoliy G. Benchmarking for investment decisions: A case of food production. **Benchmarking**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 694–704, 2011.

ISLAM, Mohaiminul. Data Analysis: Types, Process, Methods, Techniques and Tools. **International Journal on Data Science and Technology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 10–15, 2020.

KOTHARI, S. P.; RAMANNA, Karthik; SKINNER, Douglas J. Implications for GAAP from an analysis of positive research in accounting. **Journal of Accounting and Economics**, [s. l.], v. 50, n. 2–3, p. 246–286, 2010.

KRAUSS, Alexander. Redefining the scientific method: as the use of sophisticated scientific methods that extend our mind. **PNAS Nexus**, [s. l.], v. 3, n. 4, 2024.

KRMAC, Evelin; KALEIBAR, Mozghan Mansouri. A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) methodology in port efficiency evaluation. **Maritime Economics and Logistics**, [s. l.], 2022.

LACERDA, Daniel Pacheco *et al.* Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção Design Science Research: a research method to production engineering. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LAHOUEL, Béchir Ben *et al.* The assessment of socio-environmental performance change: A Benefit of the Doubt indicator based on Directional Distance Function and Malmquist productivity index. **Finance Research Letters**, [s. l.], v. 49, 2022.

LAND, Martin J. *et al.* Inventory diagnosis for flow improvement—A design science approach. **Journal of Operations Management**, [s. l.], v. 67, n. 5, p. 560–587, 2021.

LI, Joshua Qiang; MCNEIL, Sue. Data envelopment analysis for highway asset investment assessment. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 117–128, 2021.

LIN, Eugene Yu-Ying; CHEN, Ping Yu; CHEN, Chi Chung. Measuring green productivity of country: A generalized metafrontier Malmquist productivity index approach. **Energy**, [s. l.], v. 55, p. 340–353, 2013.

LIN, Yang; YAN, Longzhong; WANG, Ying Ming. Performance evaluation and investment analysis for container port sustainable development in China: An inverse DEA approach. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 17, 2019.

LIU, John S.; LU, Louis Y.Y.; LU, Wen Min. **Research fronts in data envelopment analysis**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2016.

LIU, Anyu; WU, Doris Chenguang. Tourism productivity and economic growth. **Annals of Tourism Research**, [s. l.], v. 76, p. 253–265, 2019.

LOZADA, Gisele; NUNES, Karina da Silva. **Metodologia Científica**. 1^aed. Porto Alegre: Sagah - Soluções Integradas, 2019.

LOZANO, Sebastián; SOLTANI, Narges. Efficiency assessment using a multidirectional DDF approach. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 2064–2080, 2020.

LUALDI, Marta; FASANO, Mauro. Statistical analysis of proteomics data: A review on feature selection. **Journal of Proteomics**, [s. l.], v. 198, p. 18–26, 2019.

LUFT, Julie A. *et al.* Literature Reviews, Theoretical Frameworks, and Conceptual Frameworks: An Introduction for New Biology Education Researchers. **CBE life sciences education**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. rm33, 2022.

LUMAN, Ronald Reed; GALPIN, Timothy John; KRILL, Jerry Ames. Becoming a Strategy-Driven Technology Organization - A Case Study. **IEEE Engineering Management Review**, [s. l.], v. 51, n. 2, p. 104–119, 2023.

MADALENO, Mara; MACEDO, Pedro; MOUTINHO, Victor. Introduction. In: MACEDO, Pedro; MOUTINHO, Victor; MADALENO, Mara (org.). **Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis - Theory and Empirical Applications**. [S. l.: s. n.], 2023. v. 692, p. 1–14.

MAHLA, Deepak *et al.* An inverse data envelopment analysis model to consider ratio data and preferences of decision-makers. **IMA Journal of Management Mathematics**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 441–464, 2023.

MEIRELES, Mónica. Production Economics and Economic Efficiency. In: MACEDO, Pedro; MOUTINHO, Victor; MADALENO, Mara (org.). **Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis - Theory and Empirical Applications**. [S. l.: s. n.], 2023. v. 692, p. 17–32.

MHLONGO, Noluthando Zamanjomane *et al.* Quantitative models in asset management: A review of efficacy and limitations. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 391–398, 2023.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Case research in production engineering: structure and recommendations for its conduction Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

MISIUNAS, Nicholas *et al.* DEANN: A healthcare analytic methodology of data envelopment analysis and artificial neural networks for the prediction of organ recipient functional status. **Omega (United Kingdom)**, [s. l.], v. 58, p. 46–54, 2016.

MITROFF, Ian I. *et al.* On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. **Interfaces**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 46–58, 1974.

MORANDI, Maria Isabel Wolf Motta; CAMARGO, Luis Felipe Riehs. Revisão sistemática da literatura. In: DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco;

ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle (org.). **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia.** 1^aed. Porto Alegre: Bookman, 2015. p. 141–172.

MUNDA, Giuseppe; NARDO, Michela. Noncompensatory/nonlinear composite indicators for ranking countries: A defensible setting. **Applied Economics**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 1513–1523, 2009.

NGUYEN, Phi Hung *et al.* Linking investment decisions-based on firm performance and open innovation practices in Vietnam's wire and cable market using data envelopment analysis models. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2023.

NUDURUPATI, S. S. *et al.* State of the art literature review on performance measurement. **Computers and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 279–290, 2011.

OLIVEIRA, Josenildo Brito; LIMA, Renato Silva; MONTEVECHI, José Arnaldo Barra. Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. **Simulation Modelling Practice and Theory**, [s. l.], v. 62, p. 166–191, 2016.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT.; SOURCEOECD (ONLINE SERVICE). **Measuring productivity : measurement of aggregate and industry-level productivity growth : OECD Manual.** [S. l.]: OECD, 2001.

PARFENTIEVA, O. *et al.* The role of organizational and Economic Mechanism of strategic Company Management in the National Economy. **Financial and credit Activities: problems of Theory and Practice**, [s. l.], v. 6, n. 41, p. 307–317, 2021.

PEREIRA, Miguel Alves *et al.* Incorporating preference information in a range directional composite indicator: The case of Portuguese public hospitals \$. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], 2021.

PÉRICO, Ana Elisa; REBELATTO, Daisy Aparecida do Nascimento; SANTANA, Naja Brandão. Eficiência bancária: os maiores bancos são os mais eficientes? Uma análise por envoltória de dados. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 421–431, 2008.

PIRAN, Fabio Sartori; LACERDA, Daniel Pacheco; CAMARGO, Luís Felipe Riehs. **Análise e gestão da eficiência: Aplicação em sistemas produtivos de bens e serviços.** [S. l.]: Folio Digital, 2021.

REBELO, Sandra; MATIAS, Fernanda; CARRASCO, Paulo. Application of the DEA methodology in the analysis of efficiency of the Portuguese hotel industry: an analysis applied to the Portuguese geographical regions. **Tourism & Management Studies**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 21–28, 2013.

ROBINSON, Stewart *et al.* **Conceptual modeling for discrete-event simulation.** [S. I.]: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2011. v. 1

SAISANA, Michaela; TARANTOLA, Stefano. **State-of-the-Art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development.** [S. I.: s. n.], 2002.

SEBT, M V; JUYBARI, M N; SOLEYMANFAR, V R. Investment Projects Ranking with DEA Method Considering Feasibility Study Results. **International Journal of Research in Industrial Engineering**, [s. I.], v. 7, n. 3, p. 320–335, 2018. Disponível em: www.riejournal.com.

SETH, Himanshu *et al.* Assessment of working capital management efficiency – a two-stage slack-based measure of data envelopment analysis. **Managerial Finance**, [s. I.], v. 50, n. 7, p. 1344–1365, 2024.

SETH, Himanshu *et al.* Exploring predictors of working capital management efficiency and their influence on firm performance: an integrated DEA-SEM approach. **Benchmarking**, [s. I.], v. 28, n. 4, p. 1120–1145, 2020.

SETH, Himanshu; CHADHA, Saurabh; SHARMA, Satyendra. Benchmarking the efficiency model for working capital management: data envelopment analysis approach. **International Journal of Productivity and Performance Management**, [s. I.], v. 70, n. 7, p. 1528–1560, 2021.

SILVA, Maria C.A.; CAMANHO, Ana S.; BARBOSA, Flávia. Benchmarking of secondary schools based on Students' results in higher education. **Omega (United Kingdom)**, [s. I.], v. 95, 2020.

SÖDERSTEN, Carl Johan; WOOD, Richard; HERTWICH, Edgar G. Environmental Impacts of Capital Formation. **Journal of Industrial Ecology**, [s. I.], v. 22, n. 1, p. 55–67, 2018.

SUHÁNYI, Ladislav; SUHÁNYIOVÁ, Alžbeta. **Multi-criteria decision-making tool design for the investment decision-making of territorial self-government regions.** [S. I.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/286215543>.

VELASQUEZ, Mark; HESTER, Patrick T. **An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods***International Journal of Operations Research*. [S. I.: s. n.], 2013.

WANG, Ying Ming; GREATBANKS, Richard; YANG, Jian Bo. Interval efficiency assessment using data envelopment analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, [s. I.], v. 153, n. 3, p. 347–370, 2005.

ZANELLA, Andreia; CAMANHO, Ana S.; DIAS, Teresa G. Undesirable outputs and weighting schemes in composite indicators based on data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 245, n. 2, p. 517–530, 2015.

ZHANG, Yulei *et al.* The Optimal Investment Strategy Based on the DEA Model. **Open Journal of Modelling and Simulation**, [s. l.], v. 04, n. 02, p. 46–54, 2016.

ZHU, Weiwei; YU, Yu; SUN, Panpan. Data envelopment analysis cross-like efficiency model for non-homogeneous decision-making units: The case of United States companies' low-carbon investment to attain corporate sustainability. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 269, n. 1, p. 99–110, 2018.

ANEXOS

Anexo 1: Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

ELEMENTO	ESCOLHA
Número da Revisão	Revisão nº 0
Data última Revisão	28 de junho de 2024
Responsável Revisão	Maiquel Sandocan Radmann
Título da Pesquisa	Eficiência de investimentos em bens de capital: uma avaliação com indicadores compostos por meio da análise envoltória de dados.
Equipe de Trabalho	Mestrando Maiquel Sandocan Radmann Prof. Dr. Fabio Antônio Sartori Piran
Stakeholders	Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.
Questão de Pesquisa	Como calcular e avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com ICs por meio da utilização da DEA?
Objetivos da Pesquisa	<p>Objetivo geral: O objetivo geral deste estudo é avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital com ICs por meio da DEA.</p> <p>Objetivo específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> i. Propor procedimento para avaliar a eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA; ii. Testar o procedimento de avaliação da eficiência de investimentos em bens de capital através de ICs por meio da DEA, identificando as opções mais eficientes; iii. Analisar os resultados, contribuições e limitações da avaliação de investimentos em bens de capital com ICs por meio da DEA.

ELEMENTO	ESCOLHA
Contexto	A decisão de investimentos em bens de capital é um processo complexo que envolve a avaliação de múltiplas alternativas e elevado grau de incertezas. Nesse aspecto, o estudo compreende a análise da alocação eficiente de recursos em bens de capital. A realização de investimentos em bens de capital é uma decisão estratégica que pode contribuir, determinantemente, para o desempenho de uma organização. A alocação estratégica de recursos e capital pode melhorar a eficiência operacional, expandir a presença no mercado e impulsionar a inovação das empresas. A política de investimento é elemento fundamental da gestão estratégica e deve estipular o desenvolvimento sustentável empresarial a fim de evitar a realização de investimentos ineficientes. Maximizar os resultados positivos é o propósito comum a todas as decisões de investimentos. Como ferramenta de apoio à tomada de decisão, o procedimento proposto, com base na DEA, é amplamente aplicável para seleção de investimentos. A DEA, assim como outras opções de avaliação, tem suas vantagens e desvantagens e, identificá-las com precisão, auxiliará tomadores de decisão a utilizá-la, adequadamente, na gestão de ativos.
Horizonte de tempo	Sem limite temporal.
Idiomas	A RSL foi realizada com termos de busca na língua inglesa, porém, foram considerados documentos nos idiomas Português e Inglês.
Objetivo da revisão	A RSL tem como objetivos identificar e selecionar artigos científicos, nas bases de dados Scopus e Web of Science, que apliquem a DEA na análise de investimentos em bens de capital e artigos que apliquem a DEA concomitantemente com indicadores compostos.
Estratégia de revisão	(<input type="checkbox"/>) configurativa (<input checked="" type="checkbox"/>) agregativa
Critérios de busca	<p>Critérios de inclusão:</p> <ul style="list-style-type: none"> i. Documentos que aplicam a DEA à análise de investimentos em bens de capital; ii. Documentos que aplicam a DEA associada, concomitantemente, com indicadores compostos. <p>Critérios de exclusão:</p> <ul style="list-style-type: none"> i. Documentos em idioma diferente de inglês e português; ii. Documentos que não atendam aos critérios de inclusão; iii. Documentos em duplicidade; iv. Falta de acesso ao documento completo.

ELEMENTO	ESCOLHA
Termos de busca	<p>1º passo da RSL: Identificar e selecionar documentos que aplicam a DEA à análise de investimentos em bens de capital. ("dea" OR "data envelopment analysis" OR "benefit-of-the-doubt") AND ("investment" OR "acquisition" OR "purchase") AND ("capital good" OR "capital goods" OR "capital asset" OR "capital assets")</p> <p>2º passo da RSL: Identificar e selecionar documentos que aplicam a DEA associada, concomitantemente, com indicadores compostos. ("dea" OR "data envelopment analysis" OR "benefit-of-the-doubt") AND ("composite indicators")</p>
Fontes de busca	Scopus Web of Science
Índices de busca	Título, palavra-chave e resumo.

Fonte: elaborado pelo autor, adaptando Morandi e Camargo (2015)

Anexo 2: Lista de documentos selecionados na RSL

	Título do Documento	Autores	Ano	Citação
1	A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) methodology in port efficiency evaluation	Krmac, Evelin; Kaleibar, Mozghan Mansouri	2022	(Krmac; Kaleibar, 2022)
2	A Well-Defined Composite Indicator: An Application to Corporate Social Responsibility	Aparicio, Juan; Kapelko, Magdalena; Monge, Juan F.	2020	(Aparicio; Kapelko; Monge, 2020)
3	An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis	Coelli, Timothy J.; Rao, D.S. Prasada; O'donnell, Christopher J.; Battese, George E.	2005	(Coelli <i>et al.</i> , 2005)
4	An inverse data envelopment analysis model to consider ratio data and preferences of decision-makers	Mahla, Deepak; Agarwal, Shivi; Amin, Gholam R.; Mathur, Trilok	2023	(Mahla <i>et al.</i> , 2023)
5	An investment analysis for China's sustainable development based on inverse data envelopment analysis	Chen, Lei; Wang, Yingming; Lai, Fujun; Feng, Feng	2017	(Chen <i>et al.</i> , 2017)
6	Assessment of working capital management efficiency – a two-stage slack-based measure of data envelopment analysis	Seth, Himanshu; Deepak, Deepak; Ruparel, Namita; Chadha, Saurabh; Agarwal, Shivi	2021	(Seth <i>et al.</i> , 2024)
7	Benchmarking for investment decisions: A case of food production	Goncharuk, Anatoliy G.	2011	(Goncharuk, 2011)
8	Benchmarking of secondary schools based on Students' results in higher education	Silva, Maria C.A.; Camanho, Ana S.; Barbosa, Flávia	2020	(Silva; Camanho; Barbosa, 2020)
9	Benchmarking the efficiency model for working capital management: data envelopment analysis approach	Seth, Himanshu; Chadha, Saurabh; Sharma, Satyendra	2024	(Seth; Chadha; Sharma, 2021)
10	Benefit-of-the-Doubt Composite Indicators and Use of Weight Restrictions	Camanho, Ana S.; Zanella, Andreia; Moutinho, Victor	2023	(Camanho; Zanella; Moutinho, 2023)
11	Data envelopment analysis (DEA) - Thirty years on	Cook, Wade D.; Seiford, Larry M.	2009	(Cook; Seiford, 2009)
12	Data envelopment analysis cross-like efficiency model for non-homogeneous decision-making units: The case of United States companies' low-carbon investment to attain corporate sustainability	Zhu, Weiwei; Yu, Yu; Sun, Panpan	2018	(Zhu; Yu; Sun, 2018)
13	Data envelopment analysis for highway asset investment assessment	Li, Joshua Qiang; McNeil, Sue	2021	(Li; McNeil, 2021)
14	Data Envelopment Analysis: A Review and Synthesis	Camanho, Ana S.; D'inverno, Giovanna	2023	(Camanho; D'Inverno, 2023)
15	DEANN: A healthcare analytic methodology of data envelopment analysis and artificial neural networks for the prediction of organ recipient functional status	Misiunas, Nicholas; Oztekin, Asil; Chen, Yao; Chandra, Kavitha	2016	(Misiunas <i>et al.</i> , 2016)
16	Efficiency assessment using a multidirectional DDF approach	Lozano, Sebastián; Soltani, Narges	2020	(Lozano; Soltani, 2020)

	Título do Documento	Autores	Ano	Citação
17	Eficiência bancária: os maiores bancos são os mais eficientes? Uma análise por envoltória de dados	Périco, Ana Elisa; Rebelatto, Daisy Aparecida Do Nascimento; Santana, Naja Brandão	2008	(Périco; Rebelatto; Santana, 2008)
18	Empirical surveys of frontier applications: a meta-review	Daraio, Cinzia; Kerstens, Kristiaan; Nepomuceno, Thyago; Sickles, Robin C.	2020	(Daraio <i>et al.</i> , 2020)
19	Enhancing non-compensatory composite indicators: A directional proposal	Fusco, Elisa	2015	(Fusco, 2015)
20	Exploring predictors of working capital management efficiency and their influence on firm performance: an integrated DEA-SEM approach	Seth, Himanshu; Chadha, Saurabh; Sharma, Satyendra Kumar; Ruparel, Namita	2020	(Seth <i>et al.</i> , 2020)
21	How to measure capital investment efficiency: a literature synthesis	Gao, Ru; Yu, Xin	2020	(Gao; Yu, 2020)
22	Implications for GAAP from an analysis of positive research in accounting	Kothari, S. P.; Ramanna, Karthik; Skinner, Douglas J.	2010	(Kothari; Ramanna; Skinner, 2010)
23	Incorporating preference information in a range directional composite indicator: The case of Portuguese public hospitals	Pereira, Miguel Alves; Camanho, Ana Santos; Figueira, José Rui; Marques, Rui Cunha	2021	(Pereira <i>et al.</i> , 2021)
24	Interval efficiency assessment using data envelopment analysis	Wang, Ying Ming; Greatbanks, Richard; Yang, Jian Bo	2005	(Wang; Greatbanks; Yang, 2005)
25	Introduction	Madaleno, Mara; Macedo, Pedro; Moutinho, Victor	2023	(Madaleno; Macedo; Moutinho, 2023)
26	Linking investment decisions-based on firm performance and open innovation practices in Vietnam's wire and cable market using data envelopment analysis models	Nguyen, Phi Hung; Nguyen, Thi Ly; Wang, Chia Nan; Vu, Minh Duc; Thi Nguyen, Lan Anh; Pham, Hong Anh; Thi Pham, Mai Anh; Le, Hong Quan	2023	(Nguyen <i>et al.</i> , 2023)
27	Measuring green productivity of country: A generalized metafrontier Malmquist productivity index approach	Lin, Eugene Yu-Ying; Chen, Ping Yu; Chen, Chi Chung	2013	(Lin; Chen; Chen, 2013)
28	Multi-criteria decision-making tool design for the investment decision-making of territorial self-government regions	Suhányi, Ladislav; Suhányiová, Alžbeta	2014	(Suhányi; Suhányiová, 2014)
29	Noncompensatory/nonlinear composite indicators for ranking countries: A defensible setting	Munda, Giuseppe; Nardo, Michela	2009	(Munda; Nardo, 2009)
30	Performance evaluation and investment analysis for container port sustainable development in China: An inverse DEA approach	Lin, Yang; Yan, Longzhong; Wang, Ying Ming	2019	(Lin; Yan; Wang, 2019)

	Título do Documento	Autores	Ano	Citação
31	Performance Management of Supply Chain Sustainability in Small and Medium-Sized Enterprises Using a Combined Structural Equation Modelling and Data Envelopment Analysis	Dey, Prasanta Kumar; Yang, Guo Liang; Malesios, Chrysovalantis; De, Debashree; Evangelinos, Konstantinos	2021	(Dey <i>et al.</i> , 2021)
32	Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review	Oliveira, Josenildo Brito; Lima, Renato Silva; Montevechi, José Arnaldo Barra	2016	(Oliveira; Lima; Montevechi, 2016)
33	Pitfalls of decomposition weights in the additive multi-stage DEA model	Ang, Sheng; Chen, Chien Ming	2016	(Ang; Chen, 2016)
34	Production Economics and Economic Efficiency	Meireles, Mónica	2023	(Meireles, 2023)
35	Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach	Chung, Y H; Färe, R; Grosskopf, S.	1997	(Chung; Färe; Grosskopf, 1997)
36	Research fronts in data envelopment analysis	Liu, John S.; Lu, Louis Y.Y.; Lu, Wen Min	2019	(Liu; Lu; Lu, 2016)
37	Scenario-based Simultaneous Investment, Financing and Operational Planning	Steglich, Mike	2020	(Steglich, 2020)
38	The assessment of socio-environmental performance change: A Benefit of the Doubt indicator based on Directional Distance Function and Malmquist productivity index	Lahouel, Béchir Ben; Zaiéd, Younes Ben; Taleb, Lotfi; Kočíšová, Kristína	2022	(Lahouel <i>et al.</i> , 2022)
39	Tourism productivity and economic growth	Liu, Anyu; Wu, Doris Chenguang	2016	(Liu; Wu, 2019)

Fonte: elaborado pelo autor