

**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**

**JOSIANE GRAZIELE VOGT**

**UMA LAMINAÇÃO CONECTADA: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA NO SETOR  
SIDERÚRGICO UTILIZANDO *NETWORK* DEA ATRAVÉS DO *BENCHMARKING*  
INTERNO**

**SÃO LEOPOLDO**

**2024**

JOSIANE GRAZIELE VOGT

**UMA LAMINAÇÃO CONECTADA: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA NO SETOR  
SIDERÚRGICO UTILIZANDO *NETWORK DEA* ATRAVÉS DO *BENCHMARKING*  
INTERNO**

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

Orientador: Dr. Fabio Antônio Sartori Piran

SÃO LEOPOLDO

2024

V886l Vogt, Josiane Graziele  
Uma laminação conectada : avaliação de eficiência no  
setor siderúrgico utilizando *Network* DEA através do  
*benchmarking* interno / por Josiane Graziele Vogt. – 2024.  
114 f. : il.; 30 cm.

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

Orientador: Prof. Dr. Fabio Antônio Sartori Piran.

1. Eficiência. 2. Indústria siderúrgica. 3. Análise  
envoltória de dados em rede (NDEA). 4. *Benchmarking*  
interno. I. Título.

CDU 669.1

Catálogo na Fonte:  
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

**JOSIANE GRAZIELE VOGT**

**UMA LAMINAÇÃO CONECTADA: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA NO SETOR  
SIDERÚRGICO UTILIZANDO *NETWORK DEA* ATRAVÉS DO *BENCHMARKING*  
INTERNO**

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

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ricardo Cassel  
PMPEP UFRGS

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Mariana Rodrigues de Almeida  
PPGEP UFRN

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Isabel Wolf Motta Morandi  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda  
PPGEPS Unisinos

*Dedico essa dissertação aos meus pais, Márcia e Carlos, pessoas simples que não tiveram a oportunidade de estudar, porém sempre me incentivaram a buscar conhecimento e nunca parar! Eles são os meus exemplos de persistência e resiliência no mundo.*

*Também dedico à minha irmã, que sempre buscou me apoiar nos momentos mais difíceis desta trajetória! Ela é o meu exemplo de alegria e empatia*

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

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

## AGRADECIMENTOS

Sem dúvidas, este é o momento mais esperado na vida de uma mestranda, a finalização de um grande e trabalhoso ciclo. Foi difícil chegar até aqui, muitos foram os obstáculos e só tenho a agradecer a Deus, pois me deu saúde, força e me presenteou com a melhor família que poderia ter! Gratidão à minha família, que sempre esteve comigo, me incentivando, apoiando e acreditando que tudo seria possível!

Sou grata ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Sartori Piran, por ter acreditado em mim, desde a época da graduação e, por ter me apoiado infinitamente ao longo deste ciclo, além de ser uma grande inspiração para todos os seus alunos! Gratidão! Agradeço também a todos os professores e aos colegas do GMAP, que me acompanharam ao longo do mestrado, aconselhando, apoiando e compartilhando experiências. Aproveito a oportunidade para agradecer Prof<sup>a</sup>. Dra. Mariana Rodrigues de Almeida, pois sem o apoio incondicional dela, não seria possível dar esse passo tão importante na vida acadêmica. Gratidão eterna!

Gratidão aos meus amigos, pois entenderam os vários momentos em que precisei estar ausente, pelo apoio nos momentos mais difíceis do mestrado e por me acalmarem ao longo deste trabalho. Sem dúvidas, o processo se tornou mais leve depois de todos os abraços, conversas e envio de energias positivas! Gratidão por estarem comigo ao longo destes dois anos e meio!

Enfim, gostaria de agradecer a todos que, de alguma forma, estiveram presentes em minha vida ao longo do processo. Foram tantas pessoas que colaboraram de alguma maneira para que tudo fosse possível, sendo uma conversa calorosa, o empréstimo de um material ou, simplesmente, pelo fato de compartilhar as dores e os momentos engraçados, só me resta agradecer muito! Muito obrigada por tudo! Gratidão é a palavra que define tudo!

## RESUMO

As empresas estão constantemente buscando a melhoria da produtividade e eficiência dos seus processos. No mercado siderúrgico mundial, há desafios relacionados com competição internacional, principalmente com produtos a custo baixo. No Brasil, a indústria siderúrgica busca soluções para tornar seus processos mais eficientes, logo, reduzindo perdas, o que por sua vez apresenta reflexos positivos no faturamento das usinas. Dentre os vários processos produtivos do setor siderúrgico, destaca-se a relevância da laminação de barras e perfis, devido à sua gama de produtos que atendem desde indústrias a construção civil. No entanto, muitos estudos focam principalmente em avaliar a eficiência do seu sistema, porém não conseguem dimensionar se os subprocessos que compõem o sistema impactam positiva ou negativamente na eficiência global. O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar a eficiência em rede, do processo de laminação de aço de uma empresa fabricante de barras e perfis, utilizando o Network DEA (NDEA) por meio do benchmarking interno. Para isso, foi realizado um estudo de caso, onde foi possível analisar a eficiência global da rede, que obteve uma eficiência média de 41,99%, transitando com uma eficiência mínima de 15,12% e máxima de 99,23%. Foi possível analisar a eficiência de cada um dos estágios que a compõem, onde percebeu-se que os escores do terceiro estágio contribuem negativamente para a eficiência global. Por fim, foi possível realizar a análise dos incidentes críticos que afetaram a eficiência global, destacando que 66,67% dos incidentes ocorrem no 4º trimestre de cada ano.

**Palavras-chave:** Eficiência. Indústria siderúrgica. Análise envoltória de dados em rede (NDEA). *Benchmarking* interno.

## ABSTRACT

Companies are constantly seeking to improve the productivity and efficiency of their processes. In the global steel market, there are challenges related to international competition, especially with low-cost products. In Brazil, the steel industry is looking for solutions to make its processes more efficient, thus reducing losses, which in turn has a positive impact on the plants' revenue. Among the various production processes in the steel sector, the relevance of rolling bars and profiles stands out, due to its range of products that range from industries to civil construction. However, many studies focus mainly on evaluating the efficiency of your system but are unable to assess whether the sub-processes that make up the system have a positive impact on overall efficiency. of a company that manufactures bars and profiles, using Network DEA (NDEA) through internal benchmarking. To this end, a case study was carried out, where it was possible to analyze the overall efficiency of the network, which obtained an average efficiency of 41.99%, traveling with a minimum efficiency of 15.12% and a maximum efficiency of 99.23%. It was possible to analyze the efficiency of each of the advances that the composition, where we will see that the third stage scores are improved for global efficiency. Finally, it was possible to carry out an analysis of critical incidents that affected global efficiency, highlighting that 66.67% of incidents occurred in the 4th quarter of each year.

**Keywords:** Efficiency. Steel industry. Network data envelopment analysis (NDEA). Internal benchmarking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Laminação a quente.....	17
Figura 2 - Busca e elegibilidade da pesquisa.....	23
Figura 3 - Fronteiras da produção e eficiência padrão.....	29
Figura 4 - Conexão entre Input, Output e DMU – DEA.....	33
Figura 5 - Modelo tradicional.....	35
Figura 6 - Modelo tradicional ao longo do tempo.....	36
Figura 7 - Modelo com compartilhamento de recursos.....	37
Figura 8 - Modelo Network DEA.....	38
Figura 9 - Estrutura de rede em série.....	40
Figura 10 - Estrutura de rede em paralelo.....	43
Figura 11 - Exemplo de rede mista.....	45
Figura 12 - Pêndulo representativo da condução de pesquisas científicas.....	57
Figura 13 - Etapas para condução do estudo de caso.....	59
Figura 14 - Método de trabalho.....	60
Figura 15 - Fluxo do processo.....	64
Figura 16 - Estrutura de rede.....	70
Figura 17 - Rede NDEA.....	72
Figura 18 - Procedimento para análise dos dados.....	77
Figura 19 - Primeiro estágio da rede.....	80
Figura 20 - Segundo estágio da rede.....	83
Figura 21 - Terceiro estágio da rede.....	86
Figura 22 - Rede NDEA.....	89

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Eficiências do primeiro estágio .....	81
Gráfico 2 - Eficiências do segundo estágio .....	84
Gráfico 3 - Eficiências do terceiro estágio .....	87
Gráfico 4 - Eficiências globais .....	91
Gráfico 5 – Análise integrada das eficiências.....	93
Gráfico 6 - Identificação incidentes críticos .....	95

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de pesquisa.....	21
Quadro 2 - Estudos incluídos na pesquisa.....	23
Quadro 3 - Classificação de eficiência .....	31
Quadro 4 - Lista de estudos incluídos na pesquisa.....	47
Quadro 5 - Grupo focal de especialistas .....	62
Quadro 6 - Lista de variáveis do modelo.....	68
Quadro 7 - Variáveis do modelo.....	72
Quadro 8 - Planejamento da coleta dos dados .....	74
Quadro 9 - Resumo incidentes críticos .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução das publicações sobre Network DEA em sistemas e manufaturas .....	22
Tabela 2 - Estatística descritiva das variáveis.....	75
Tabela 3 - Eficiências do primeiro estágio.....	80
Tabela 4 - Eficiência média trimestral - 1ºE.....	82
Tabela 5 - Eficiência média anual- 1ºE.....	82
Tabela 6 - Eficiências do segundo estágio.....	83
Tabela 7 - Eficiência média trimestral - 2ºE.....	85
Tabela 8 - Eficiência média anual- 2ºE.....	85
Tabela 9 - Eficiências do terceiro estágio.....	86
Tabela 10 - Eficiência média trimestral - 3ºE.....	88
Tabela 11 - Eficiência média anual- 3ºE.....	88
Tabela 12 - Eficiências globais da rede.....	89
Tabela 13 - Média das eficiências trimestrais.....	91
Tabela 14 - Eficiência global média anual.....	92

## LISTA DE SIGLAS

CRS	Constant Returns to Scale (Retorno Constante de Escala)
DEA	Data Envelopment Analysis (Análise Envoltória de Dados)
NDEA	<i>Network Data Envelopment Analysis</i>
DMU	Decision Making Unit (Unidades de Tomada de Decisão)
VRS	Variable Returns to Scale (Retorno Variável de Escala)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Objetivo Geral .....	20
1.2.2. Objetivos específicos.....	20
<b>1.3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>20</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>27</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1 CONCEITUANDO A DIFERENÇA ENTRE PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4 NETWORK DEA.....</b>	<b>34</b>
2.4.1 Outros tipos de redes .....	44
2.4.2 Estudos relacionados com a utilização de Network DEA .....	46
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....</b>	<b>56</b>
<b>3.2 MÉTODO DE TRABALHO .....</b>	<b>59</b>
<b>3.3 PROJETO DO MODELO NDEA.....</b>	<b>62</b>
3.3.1 Definição do processo a ser analisado.....	63
3.3.3 Definição do período de análise .....	66
3.3.4 Definição das variáveis do modelo DEA (inputs e outputs) .....	67
3.3.5 Definição do tipo de rede dos estágios a serem utilizado.....	69
3.3.6 Validação do modelo com os especialistas da empresa .....	73

<b>3.4 COLETA DE DADOS .....</b>	<b>73</b>
<b>3.5 ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>77</b>
<b>4. ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1 ANÁLISES DA EFICIÊNCIA DE CADA ESTÁGIO DO PROCESSO (REDE).....</b>	<b>79</b>
<b>4.2 ANÁLISES DA EFICIÊNCIA GLOBAL DO SISTEMA.....</b>	<b>88</b>
<b>4.3 ANÁLISES DOS INCIDENTES CRÍTICOS DO SISTEMA.....</b>	<b>94</b>
4.3.1 Identificação e análise dos Incidentes Críticos.....	94
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>99</b>
<b>6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO A – PROTOCOLO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA.....</b>	<b>114</b>

## 1.INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de atender as necessidades dos consumidores, as empresas têm buscado maneiras para conter custos, otimizar o uso de recursos, bem como, garantir o abastecimento do mercado (Pelegri, 2005; Yadollahi et al., 2022). Esse mercado, cada vez mais globalizado, têm se movimentado em torno das perspectivas de negócios mais eficientes, fazendo com que as empresas foquem no aprimoramento da produtividade e eficiência de seus processos (Rathore Et Al., 2005; Song et al., 2020).

Embora as estratégias corporativas, marketing e táticas comerciais sejam importantes para manter a competitividade das indústrias em relação aos seus concorrentes, uma parcela significativa dos negócios ocorre em nível operacional (Black 1998). De acordo com Black (1998), as operações em sistemas produtivos consistem em um conjunto de tarefas realizadas por operadores em conjunto com máquinas e equipamentos. Melhorar o desempenho de equipamentos e operações é crucial para atender às demandas crescentes dos mercados consumidores (Collatto et al., 2018). A produtividade e a eficiência estão diretamente ligadas à permanência das indústrias no mercado, especialmente em uma competição global intensa (Fleischer et al., 2006; Huang et al., 2003). Portanto, é essencial realizar medições adequadas para identificar perdas, garantir a produtividade e manter a competitividade no mercado.

Dentre os processos produtivos da siderurgia, a laminação de barras e perfis se destaca como essencial para a indústria da construção civil. No entanto, muitos estudos focam no aumento da capacidade instalada e na melhoria da eficiência produtiva, mas ignoram aspectos importantes, como interrupções do processo, custos envolvidos nessas interrupções e geração de sucata. Além disso, fatores como mix de produção e uso de água são frequentemente negligenciados em estudos de eficiência na laminação de barras e perfis.

Diante da complexidade da indústria siderúrgica, a Análise Envoltória de Dados (DEA) surge como uma técnica atrativa para avaliar a produtividade e eficiência do processo. A DEA, desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes em 1978, é utilizada para mensurar a eficiência relativa das Unidades de Tomada de Decisão (DMUs), considerando múltiplas entradas e saídas. A eficiência

relativa é avaliada por meio do procedimento de benchmarking (Piran et al., 2021, 2023).

No entanto, a DEA é frequentemente tratada como uma "caixa preta", onde as entradas são transformadas em saídas para medir a eficiência relativa (Santos, 2010). Para lidar com essa limitação, o modelo Network DEA (NDEA) foi proposto por Färe e Grosskopf (2000), cujo objetivo é estudar o desempenho de uma DMU analisando os processos envolvidos e identificando possíveis causas da ineficiência. Esse modelo oferece informações mais detalhadas para os tomadores de decisão, permitindo uma compreensão clara dos fatores que influenciam a eficiência (Kao, 2014; Hsieh; Ling, 2010).

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como tema central a avaliação da eficiência de um sistema produtivo de laminação de barras de aço, utilizando a técnica de Análise Envoltória de Dados em Rede (NETWORK DEA). Além disso, é utilizado o procedimento do *benchmarking* interno que resulta em uma comparação do sistema com ele mesmo ao longo do tempo (Piran et al., 2021, 2023). A próxima seção apresentará o objeto de estudo e o problema de pesquisa a serem abordados.

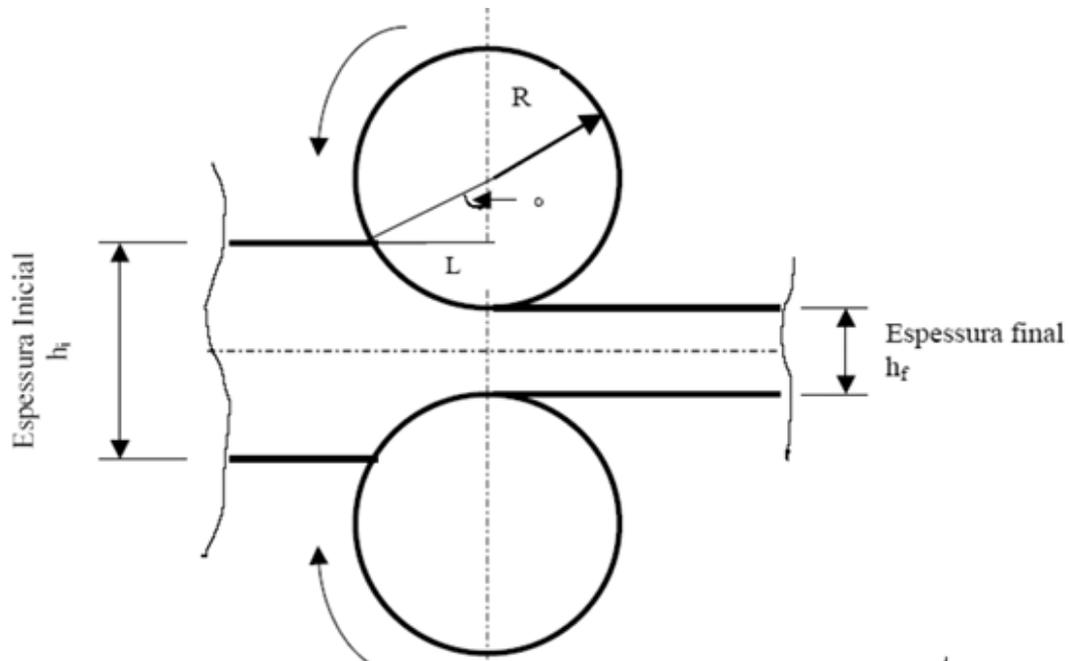
## 1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA

A empresa objeto do estudo é uma usina siderúrgica com atuação nacional e internacional, responsável por reciclar sucata metálica e transformá-la em aço. Tem como principais clientes, integrantes da cadeia do setor de construção civil, automobilístico e agrícola. A empresa é classificada como uma usina semi-integrada, dividida em setores produtivos e de apoio. Os setores produtivos de fato produzem o aço e são divididos em aciaria, laminações, trefilas, fábrica de pregos e produtos prontos. Todos esses setores recebem suporte, que são divididos em manutenção, utilidades, administrativos e recursos humanos.

O processo de laminação é conhecido por ser um processo de conformação mecânica, onde ocorre a deformação de um metal através da passagem entre dois cilindros rotatórios que giram em sentidos opostos. A Figura 1 demonstra como força de atrito exercida entre o material que está sendo trabalhado e os cilindros é o que provoca a deformação, onde o material tem a sua espessura reduzida de

acordo com a abertura existente entre os cilindros e o seu comprimento aumentado (Krelling, 2018).

Figura 1 - Processo de Laminação a quente



Fonte: Krelling (2018)

O material é reduzido até a espessura desejada por meio das sucessivas passadas entre os cilindros. Por meio do processo de laminação é possível obter produtos prontos para o cliente final (chapas, barras e perfis) e produtos semiacabados (placas) (Krelling, 2018).

O processo de laminação é formado por diversas operações, que são definidas de acordo com o mix e produto que será produzido. Dentre as operações básicas, estão:

- Reaquecimento: que visa manter as peças na temperatura necessária para manter as propriedades do material durante o processo;
- Laminador: momento em que ocorre a deformação do metal nos cilindros;
- Desbaste: processo em que o material adquire o formato necessário, conforme mix de produtos a serem produzidos;

- Acabador: é aplicável em apenas alguns mix de produtos, pois garante o formato final do produto. As cantoneiras são exemplos de materiais que necessitam passar por esse processo, devido ao seu formato peculiar;
- Tratamento térmico: também é um processo aplicado apenas em alguns mix de produtos, pois ele garante algumas propriedades mecânicas e de resistência ao produto. O tratamento consiste em um resfriamento rápido do material, pois ele chega nessa etapa com uma temperatura elevada;
- Corte: nessa etapa é realizado o corte dos materiais, de acordo com as especificações exigidas pelos clientes ou de acordo com a aplicação final;
- Resfriamento: momento em que o material passa por uma calha de resfriamento, onde ele consegue chegar a uma temperatura ideal para embalagem e posterior transporte;
- Embalagem: formação de feixes, de acordo com a solicitação dos clientes e posterior transporte.

O processo de laminação possui uma série de variáveis que são inter-relacionadas. Na empresa objeto de estudo, a eficiência do processo é avaliada com base no histórico e na análise de alguns indicadores (por exemplo, perda metálica, consumo de gás natural, consumo de energia elétrica, entre outros), os quais evidenciam as disparidades que influenciam na tomada de decisão. O procedimento adotado pela empresa avalia unicamente indicadores isolados, como por exemplo o custo de produção, o consumo de energéticos e interrupções de manutenção. Porém nesse formato isolado, as unidades avaliadas não conseguem estabelecer uma relação entre as variáveis de modo a determinar a influência sobre a eficiência do processo como um todo, assim dificultando a tomada de decisão, bem como o processo de melhoria (Brasil, 2018).

A ausência de uma análise abrangente da produtividade e eficiência pode conduzir a organização a tomar decisões equivocadas, tais como: 1) alocar recursos de menor prioridade de forma desnecessária; 2) deixar de investir em recursos essenciais; e 3) investir no aumento da capacidade produtiva sem

considerar as limitações (gargalos) e a capacidade máxima dos recursos já disponíveis (Piran et al., 2018).

Adicionalmente, a revisão sistemática da literatura (RSL) realizada (detalhada na próxima seção) encontrou poucos estudos de análise de performance e eficiência no processo de laminação. Os estudos encontrados foram realizados em diversos setores industriais, porém apenas três contemplam a utilização de NDEA em áreas do setor siderúrgico. Todos os demais estudos encontrados utilizam o OEE como métrica para fazer a mensuração da performance de equipamentos. No entanto, Muchiri e Pintelon (2008), salientam que essa métrica por si só não fornece todas as informações necessárias para que gestores possam melhorar os seus desempenhos produtivos. As métricas que foram identificadas ao longo da pesquisa são voltadas para avaliar os equipamentos ou a eficiência do processo produtivo como um todo, medindo a relação de produtos acabados que saem desses sistemas pelas entradas de insumos nesses mesmos sistemas, porém sem avaliar os subprocessos que ficam entre o início e o fim (Paris, 2016; Piran et al., 2020).

Diante do contexto apresentado, percebe-se que há oportunidades para o desenvolvimento de trabalho para avaliar a eficiência do processo de produção de laminação como um todo, bem como realizar a avaliação de seus subprocessos através da utilização de um modelo NDEA. Além disso, não foram encontradas aplicações do modelo no setor siderúrgico que utilizassem o *benchmarking* interno para buscar avaliar a *performance* do sistema ao longo do tempo. Adicionalmente, a literatura mostra escassez de estudos que avaliam os fatores que afetaram a eficiência ao longo do tempo. Desta forma, o objeto de estudo desta dissertação é a eficiência em rede de um sistema produtivo de laminação de barras de aço a partir do *benchmarking* interno.

Ainda perante o contexto apresentado, a presente pesquisa visa responder a seguinte questão de pesquisa: qual é a eficiência do processo de laminação de aço, levando em consideração as suas operações em rede com a utilização do modelo Network DEA (NDEA) por meio do *benchmarking interno*?

Na seção seguinte será descrito o objetivo geral seguido pelos objetivos específicos propostos pelo presente trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos desta pesquisa, estes estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### 1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar a eficiência em rede do processo de laminação de aço de uma empresa fabricante de barras e perfis, utilizando o Network DEA (NDEA) por meio do *benchmarking* interno.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos presentes nesta pesquisa são:

- a) Efetuar uma análise crítica dos estudos que avaliam a eficiência por meio do NDEA, em empresas de manufatura.
- b) Avaliar as contribuições de cada um dos processos que compõem a rede em relação a eficiência de cada um dos processos com a eficiência global.
- c) Analisar os incidentes críticos que afetaram a eficiência do processo ao longo do tempo.

Na próxima seção são apresentados os argumentos que justificam a elaboração da presente pesquisa.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Para justificar a importância desta pesquisa do ponto de vista teórico foi realizada uma revisão sistemática da literatura, buscando avaliar o estado da arte em relação ao tema de pesquisa. De acordo com Morandi; Camargo (2015), a revisão sistemática da literatura é uma importante etapa na condução de pesquisas, cujo objetivo é auxiliar no desenvolvimento da teoria para estabelecer evidências que colaborem na resolução de problemas. Ela auxilia na condução de estudos secundários para mapear, encontrar, avaliar criticamente, consolidar

e agregar com os resultados de estudos primários relevantes que estão relacionados com a questão de pesquisa, assim corroborando com a identificação de lacunas a serem preenchidas, resultando em uma síntese.

Para realização da revisão sistemática da literatura, foi realizada uma busca de artigos nas principais bases de dados nacionais e internacionais. A *SCIELO* foi a base nacional utilizada na pesquisa e, as bases internacionais utilizadas foram *SCOPUS*, *EBSCO* e *SCIENCE DIRECT*.

Inicialmente, a RSL foi conduzida com o intuito de identificar trabalhos que utilizassem a NDEA especificamente em uma laminação de aço, porém a busca não obteve êxito. Então, a busca foi ampliada para utilização de NDEA em sistemas de manufatura específicos da indústria siderúrgica. Contudo, essa busca obteve pouco sucesso, tendo encontrado poucos estudos relevantes que abordassem essa temática específica.

Posteriormente, optou-se por realizar uma revisão mais abrangente, expandindo o escopo da pesquisa para além da indústria siderúrgica. O objetivo agora era explorar a aplicação do NDEA em sistemas e processos produtivos de forma mais ampla. Essa abordagem visava reunir uma variedade mais diversificada de informações sobre o uso do NDEA, ampliando as perspectivas e potencialmente aumentando as chances de encontrar estudos pertinentes para a pesquisa em questão.

Foram encontrados apenas 354 estudos envolvendo a aplicação de NDEA em indústrias ou manufaturas. O Quadro 1 apresenta as palavras chaves e critérios definidos para a busca dos artigos enquanto os trabalhos que foram localizados na pesquisa são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Critérios de pesquisa

Base	Pesquisa							Campo
Scielo	Laminação	OR	Indústria	OR	Manufatura	AND	Network DEA	Todos os índices
SCOPUS	Lamination		Industry		Manufacturing		Abstract, Title, keywords	
EBSCO								AB Resumo
Science Direct								

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 1 demonstra que até 2018, apenas 37,3% dos estudos sobre o tema haviam sido publicados, atingindo o ápice de publicações entre os anos de 2019 e 2023. Foram localizados 354 trabalhos nas bases de dados utilizando apenas os termos de busca, sem aplicar quaisquer critérios de seleção. De acordo com Morandi; Camargo (2015), realizar uma revisão sistemática da literatura oferece vantagens se comparada a outras técnicas e estudos, sendo que a redução do viés de pesquisa pode ser citada como uma das vantagens.

Tabela 1 - Evolução das publicações sobre Network DEA em sistemas e manufaturas

Período	Scielo	Scopus	EbscoHost	Science Direct	Total	% Relativo
2003	-	-	-	1	1	0,28%
2004	-	-	-	-	0	0,00%
2005	-	-	-	-	0	0,00%
2006	-	-	-	-	0	0,00%
2007	-	-	-	-	0	0,00%
2008	-	1	-	-	1	0,28%
2009	-	4	-	1	5	1,41%
2010	-	3	-	2	5	1,41%
2011	-	2	1	-	3	0,85%
2012	-	5	-	3	8	2,26%
2013	-	7	1	3	11	3,11%
2014	-	11	3	4	18	5,08%
2015	-	6	3	5	14	3,95%
2016	-	9	3	7	19	5,37%
2017	-	13	1	10	24	6,78%
2018	2	7	2	12	23	6,50%
2019	-	18	7	13	38	10,73%
2020	-	28	8	14	50	14,12%
2021	-	28	10	19	57	16,10%
2022	1	24	6	25	56	15,82%
2023	-	15	1	5	21	5,93%
					<b>354</b>	

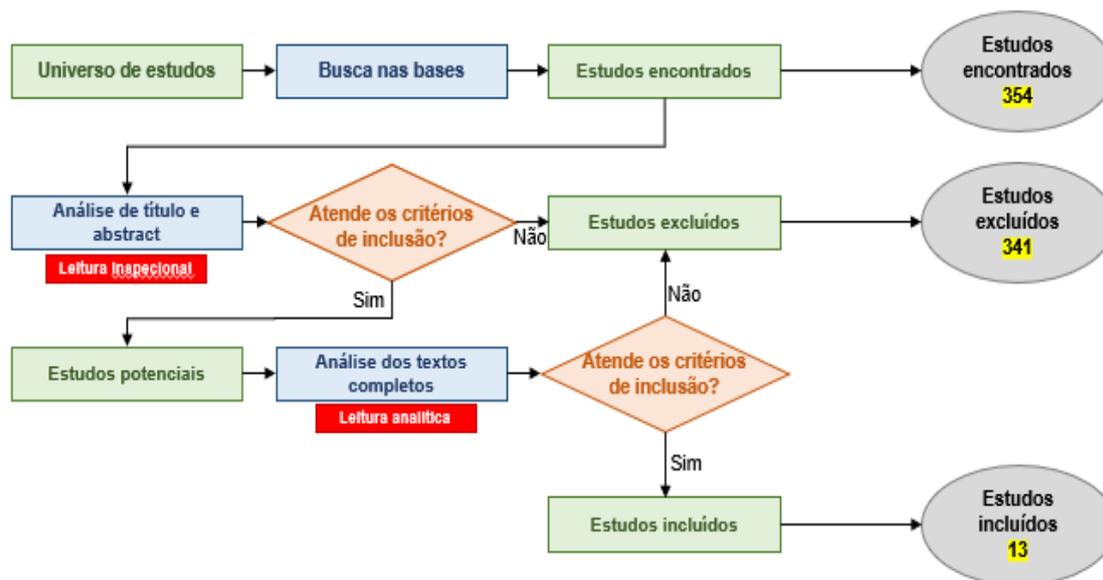
Fonte: Elaborado pela autora

Para que seja possível encontrar estudos que sejam relevantes e possam contribuir com o tema de pesquisa, se faz necessário definir uma estratégia de pesquisa. Para o presente trabalho, os seguintes critérios de seleção foram definidos:

- Trabalhos que estejam no idioma português ou inglês;
- Trabalhos que permitam o acesso ao seu conteúdo completo;
- Trabalhos que possuam as palavras utilizadas nos critérios de buscas em seu conteúdo.

A Figura 2 apresenta o processo para a busca e elegibilidade da presente pesquisa.

Figura 2 - Busca e elegibilidade da pesquisa



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

Inicialmente foi realizada uma leitura inspeccional, com a finalidade de selecionar as publicações que iriam apoiar na sustentação do presente trabalho. De acordo com Marques (2017), a leitura inspeccional é considerada uma sondagem sistemática, cujo objetivo principal é avaliar se a publicação deve ser lida integralmente ou não. Após, foi realizada uma leitura analítica no estudo completo, avaliando os três estágios que compõem a leitura analítica: i) descoberta do conteúdo; ii) interpretação do conteúdo, e; iii) crítica do conteúdo. A Tabela 2 apresenta os estudos incluídos no presente trabalho.

Quadro 2 - Estudos incluídos na pesquisa

Título	Autor	Ano
Dynamic network DEA: An illustration	Bogetoft, P.; Färe, R.; Grosskopf, S.; Hayes, K.; Taylor, L.	2009
An empirical analysis on regional technical efficiency of Chinese steel sector based on network DEA method	Yang, W.; Shao, Y.; Qiao, H.; Wang, S.	2014
Integrated ahp and network dea for assessing the efficiency of iranian handmade carpet industry	Omid, A.; Zegordi, S.H.	2015

Overall Efficiency and its Decomposition in a Two-Stage Network DEA Model	Yang, Guo-Liang; Song, Yao-Yao; Xu, Dong-Ling; Yang, Jian-Bo	2017
Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry	Wu, Huaqing; Lv, Kui; Liang, Liang; Hu, Hanhui	2017
Regional technical efficiency of Chinese Iron and steel industry based on bootstrap network data envelopment analysis	Yang, Wei; Shi, Jinfeng; Qiao, Han; Shao, Yanmin; Wang, Shouyang	2017
DEA for nonhomogeneous mixed networks.	Barat, Mona; Tohidi, Ghasem; Sanei, Masoud	2019
Competitiveness evaluation methodology for aviation industry sustainability using network DEA	Song, K.H.; Choi, S.; Han, I.H.	2020
Research on the regional differences and influencing factors of the innovation efficiency of china's high-tech industries: Based on a shared inputs two-stage network DEA	Chen, H.; Lin, H.; Zou, W.	2020
Evaluation of the operating performance of Taiwanese machine tool industry with the dynamic network DEA model.	Lu, Ching-Cheng; Dan, Wu; Chen, Xiang; Tseng, Chih-Kuo; Chou, Kuo-Wei	2021
Two-stage network DEA with shared resources: Illustrating the drawbacks and measuring the overall efficiency	Khoveyni, Mohammad; Eslami, Robabeh;	2022
Centralized resource allocation in two-stage production systems: a network DEA approach	Yadollahi, Amir Hossein; Kazemi Matin, Reza	2022
A new modeling approach for undesirable factors in efficiency evaluation of cement industry with four stages structure based on piecewise linear NDEA model	Roudabr, N.; Najafi, S.E.; Moghaddas, Z.; Sobhani, F.M.	2022

Fonte: Elaborado pela autora com base nos trabalhos citados

Os critérios definidos para inclusão de uma publicação no presente trabalho são: i) possuir texto em inglês; ii) adequação das publicações ao foco do presente trabalho, iii) adequação a questão de revisão. Os critérios de inclusão e exclusão são apresentados de modo detalhado no Anexo A - protocolo para revisão sistemática. Morandi e Camargo (2015) salientam que a adequação a questão de revisão está conectada ao fato de atender rigorosamente o método proposto na elaboração do estudo, onde se avalia a relação existente entre a abordagem do tema de pesquisa e a abordagem da publicação localizada na revisão sistemática.

A utilização do NDEA para avaliação dos processos em manufaturas e indústrias é o tema central nas publicações encontradas. Este tema é discutido por Barat et al., (2017), Chen et al., (2020), Lu et al., (2019), Omid et al., (2015), Roudabr et al., (2022), Wu et al., (2017), Yadollahi et al., (2022), Yang et al., (2017) e Yang et al., (2014). Os demais estudos incluídos na presente

dissertação, conforme apresentado na Tabela 2, apresentam aplicações do NDEA, porém não consideram os sistemas de manufaturas.

Diante do contexto do objeto de estudo, Yang et al., (2014) e Wu et al., (2017) apresentam estudos realizados em indústrias siderúrgicas, onde avaliam a eficiência da produção aço, fazendo o uso do NDEA e o comparando com o DEA tradicional. Por sua vez os estudos desenvolvidos por Yang et al., (2017) utilizam apenas o NDEA como método de avaliação, porém ambos avaliam empresas siderúrgicas distintas, buscando provar qual a região possui o grupo de indústrias mais eficientes.

Por sua vez, o estudo de Roudabr et al., (2022) aplica o modelo da Função da Distância Direcional (DDF) aliado ao NDEA, para que seja possível avaliar os *outputs* indesejados do processo. O estudo de Omid et al., (2015) utiliza o NDEA aliado à APH como método para atribuição de pesos às variáveis. Porém nenhum dos estudos incluídos na presente dissertação apresentam uma aplicação real do NDEA por meio do *Benchmarking* interno, o que torna uma lacuna de pesquisa, visto que o mercado siderúrgico brasileiro necessita possuir uma indústria eficiente e competitiva para enfrentar a concorrência internacional (Netto, 2017).

Cabe ressaltar que os estudos incluídos desempenham um papel fundamental na elaboração desta pesquisa, fornecendo dados essenciais para a compreensão e construção das redes. Além disso, auxiliam na classificação dos *inputs* e *outputs*. Durante o processo de revisão da literatura, fica evidenciado a necessidade permanente de realizar medições de desempenho de seus processos e manterem critérios claros estabelecidos com o intuito de sustentarem seus índices de performance e conseqüentemente a sua competitividade (Buckley, Pass, Prescott, 1990).

Em processos que possuem características exclusivas ou que possuem acesso restrito de dados não é possível realizar uma análise de eficiência sob a ótica do *benchmarking* externo. Nestes casos, o uso do *benchmarking* interno torna-se uma solução viável e atrativa (PIRAN et al., 2021). Ao longo das pesquisas não foram encontrados estudos, cuja aplicação do NDEA ocorresse a partir do *benchmarking* interno.

Em relação a justificativa empresarial, pode-se considerar que a usina objeto de estudo possui duas áreas denominadas laminações, onde a laminação

A é responsável pela produção de fio máquina e a laminação B é responsável pela produção de barras e perfis. A Laminação B é considerada estratégica para o negócio, visto que a maior receita líquida de vendas é oriunda desta área, pois após o processamento do produto, ele dispensa ser trabalhado em outras áreas e é entregue diretamente ao cliente final, situação diferente do que ocorre na Laminação A.

O processo ocorre de forma contínua, sendo assim, qualquer interrupção no processo implica diretamente em perda de eficiência, ocasionando atrasos no atendimento do programa de produção e conseqüentemente afetando o cliente final. Por questões estratégicas do negócio, alguns itens produzidos no processo citado necessitam ser transferidos para outras unidades, onde os atrasos também impactam a cadeia como um todo e geram custos adicionais, impactando diretamente no retorno financeiro.

Possuir dados que permitam uma análise comparativa entre cenários com diferentes volumes produção, auxilia os gestores no momento de elaborar quais as estratégias de operação serão necessárias, além de corroborar na compreensão e identificação das características presentes no processo e que possam impactar no bom andamento dele. Realizar uma análise das características que possam influenciar no comportamento da eficiência permite que os gestores possam prever a necessidade de esforços adicionais, ou seja, permite que possa ocorrer um planejamento dos recursos necessários para concretização da produção programada, sem que ocorra intercorrências.

Outro ponto favorável a realização do trabalho, é a contribuição que ele fornece por apresentar técnicas conhecidas (por exemplo a DEA) e que não são utilizadas na empresa objeto de estudo. O uso destas técnicas possibilita contribuir na identificação dos pontos de ineficiência, que são indesejáveis, bem como, contribuir na identificação dos alvos e *benchmarking* que corroboram na melhoria do processo. Além disso, a utilização de modelos que podem avaliar fatores diversos, em dois estágios, possibilita aos gestores uma ferramenta valiosa para auxiliar no processo de tomada de decisão.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo é realizada uma contextualização do tema, abordando os principais aspectos relacionados à avaliação da performance operacional e da medição de desempenho de sistemas produtivos. Também são descritos o problema de pesquisa, objetivo geral, os objetivos específicos, justificativa do trabalho e a estruturação dele.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente ao tema de pesquisa, onde são abordados os principais tópicos alinhados com o objeto do presente trabalho. O terceiro capítulo apresenta a metodologia de pesquisa, que é dividida em delineamento da pesquisa, método de trabalho, procedimento de coleta de dados e procedimentos de análise de dados.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos através do modelo Network DEA, tanto nos estágios da rede, quanto a eficiência global do sistema. O capítulo cinco contempla a discussão dos resultados e busca evidenciar as contribuições da pesquisa sob o ponto de vista da teoria e da empresa.

E por fim, o sexto capítulo apresentada as conclusões e considerações finais do estudo, bem como as sugestões para trabalhos futuros. A seguir, são apresentadas as referências, cujo objetivo é aprimorar o conhecimento teórico embasado em estudos publicados.

## 2.REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentado o referencial teórico do trabalho com conceitos sobre produtividade, eficiência, Análise Envoltória de Dados (DEA) e Network DEA.

### 2.1 CONCEITUANDO A DIFERENÇA ENTRE PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA

A eficiência e a produtividade são importantes indicadores (medidas de desempenho) que as empresas utilizam para avaliar a sua performance (Lovell, 1993). Por vezes, o conceito dos termos produtividade e eficiência são confundidos, mas ambos apresentam diferenças significativas, também são vistos com muita frequência na literatura e nos meios de comunicação (Coelli et al., 2005; Piran, Lacerda e Camargo, 2018).

De acordo com Charnes et al., (1978), produtividade é a relação entre os recursos utilizados e os resultados que foram gerados em um sistema ou processo. A eficiência faz a comparação de tudo o que foi produzido, levando em consideração a utilização de tais recursos, com o que poderia ter sido produzido utilizando os mesmos recursos (Soares De Mello et al., 2005; Cummins; Weiss, 2013).

Para Macedo (2012), o conceito de produtividade não se restringe apenas às áreas de manufatura de uma empresa, todavia abrange todas as áreas em que ocorre transformação de insumos em produtos. A produtividade é dada pela relação entre o total de entradas e saídas de um sistema em um determinado espaço de tempo, que é representado pela Equação 1 (Diewert, 1992).

$$Produtividade = \frac{saídas}{entradas} \tag{1}$$

Em relação à eficiência, é possível representar de forma matemática a eficiência como um indicador de desempenho, efetuando o cálculo da divisão entre o valor desse indicador e seu valor máximo teórico, onde o resultado obtido sempre será um valor entre 0 e 1, que em porcentagem representa de 0% a 100%, conforme representado pela Equação 2 (Mariano, 2007).

$$Eficiência = \frac{I}{I_{m\acute{a}x}}$$

(2)

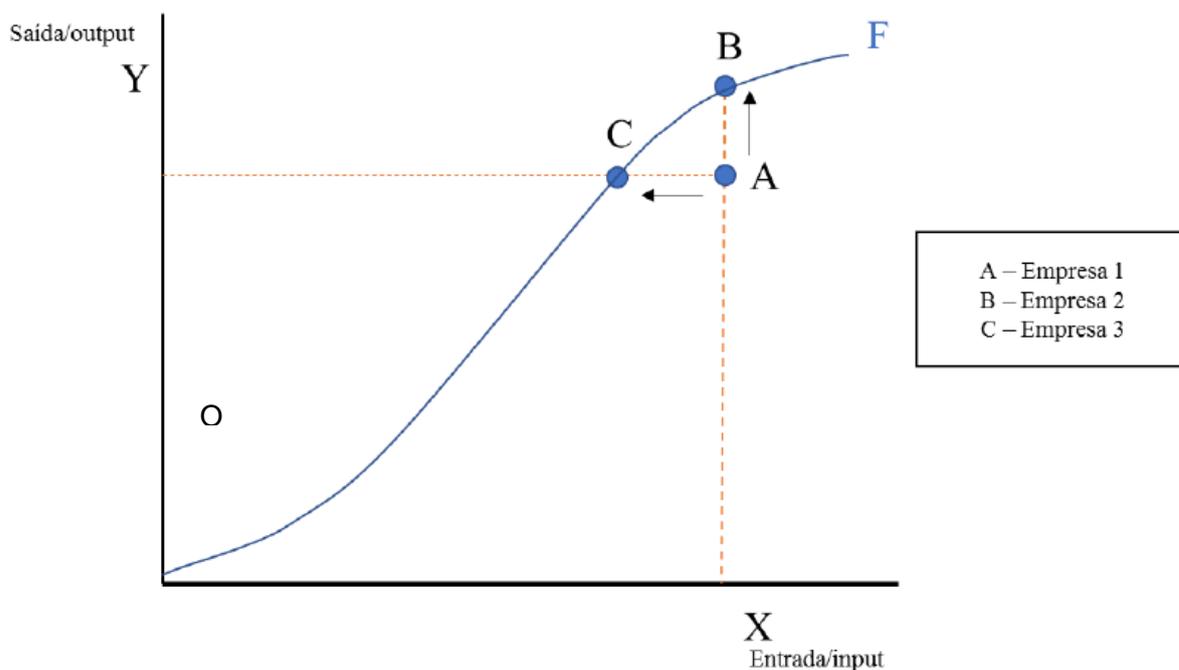
Onde:

I: Indicador de desempenho atual;

I<sub>máx</sub>: Máximo valor que pode ser alcançado nesse indicador.

Para demonstrar a diferença entre produtividade e eficiência, de uma forma simplificada, Coelli et al., (2005), mostra um processo produtivo, considerando apenas uma entrada ( $X$ ) e uma única saída ( $Y$ ), representado na Figura 3.

Figura 3 - Fronteiras da produção e eficiência padrão



Fonte: Coelli et al., (2005)

Observando a Figura 3, é possível entender a diferença entre os termos, pois a linha curvada (OF) representa a fronteira de produção com uma entrada ( $X$ ) e uma saída ( $Y$ ). As empresas que se encontram sobre a linha F são consideradas eficientes, por outro lado, as que operam fora dessa demarcação, são consideradas ineficientes. Como exemplo, pode-se destacar o ponto A, que é considerado ineficiente, pois existe a possibilidade de aumentar a

produtividade até o ponto B sem alterar a quantidade de entradas (*inputs*). ou até o ponto B reduzindo os inputs (Piran, Lacerda e Camargo, 2018). Diante disso, para que a empresa representada no ponto A seja considerada eficiente, ou seja, estar sobre a linha F, é necessário reduzir as entradas (*inputs*) no processo ou aumentar as saídas (*outputs*).

## 2.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA

Os trabalhos realizados por Farrell (1957) deram início aos estudos sobre eficiência, quando foi analisado o modo em que as empresas utilizavam suas entradas para produzir seus produtos (saídas). Ao mesmo tempo, propôs uma representação da produção por meio de uma função homogênea, chamada de fronteira eficiente, onde uma isoquanta (definição segundo Varian (1997) curva, “cujos pontos indicam todas as combinações dos fatores produtivos, que geram o mesmo nível de produção”) unitária representava todas as informações importantes para a realização do cálculo de eficiência (De Paris, 2016; Souza, 2014).

De acordo com Mariano et al., (2006), a eficiência de um processo pode ser entendida como um índice que faz a avaliação da forma que a empresa utilizou os seus produtos e insumos (*inputs*) para o alcance da produtividade máxima (*outputs*), onde obtém-se o resultado através da divisão de um indicador de desempenho e seu correspondente máximo. Como mencionado anteriormente, o resultado do cálculo de eficiência sempre terá um resultado entre zero e um.

Nos casos em que a eficiência atingir um valor igual a um, significa que a DMU (*Decision Making Units*) é eficiente e, para resultados inferiores a um, a unidade é considerada ineficiente (Paris, 2016). Ainda explorando o conceito de eficiência, o Quadro 3 apresenta as classificações de eficiência.

Quadro 3 - Classificação de eficiência

<b>Eficiência</b>	<b>Conceito</b>
Eficiência de escala	É quando uma DMU está sendo produzida em uma escala de tamanho ótimo, assim aumentando a margem de lucro de uma empresa (MARIANO et al., 2006).
Eficiência técnica	Está relacionada com a capacidade de produzir uma quantidade de produtos, utilizando a menor quantidade de insumos em relação aos demais processos observados (PIRAN et al. 2018 apud CUMMINS & WEISS, 2013).
Eficiência alocativa	Tem por finalidade minimizar os custos de produção, analisando as entradas ( <i>inputs</i> ) e saídas ( <i>outputs</i> ) (FARRELL, 1957).
Eficiência econômica	É formada através da combinação da eficiência técnica e alocativa (COOPER et al., 2007).

Fonte: elaborado pela autora.

Em relação à natureza de dados, a eficiência pode ser classificada em:

- **Paramétrica:** os métodos paramétricos estão relacionados aos dados que utilizam escala de intervalo ou de razão, supondo uma correlação entre insumos utilizados e produção (Ferreira; Gomes, 2009);
- **Não paramétrica:** determinam curvas de produção através de programação matemática, não tendo necessidade de estabelecer uma relação funcional entre insumos e produtos (Pena, 2008).

O presente trabalho utilizará a Análise Envoltória de Dados (DEA), que é um método não paramétrico para realizar a avaliação dos sistemas produtivos de bens e serviços.

### 2.3 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Farrel (1957) deu início aos estudos em empresas que possuíam múltiplas entradas e saídas, identificando a necessidade de melhores métodos para realizar uma análise adequada da eficiência dessas operações. Então, em 1978, em decorrência dessas necessidades, Charnes et al., (1978) propuseram a utilização de uma técnica denominada Análise Envoltória de Dados (DEA), cujo objetivo era avaliar os resultados de um programa de acompanhamento de crianças carentes de escolas públicas.

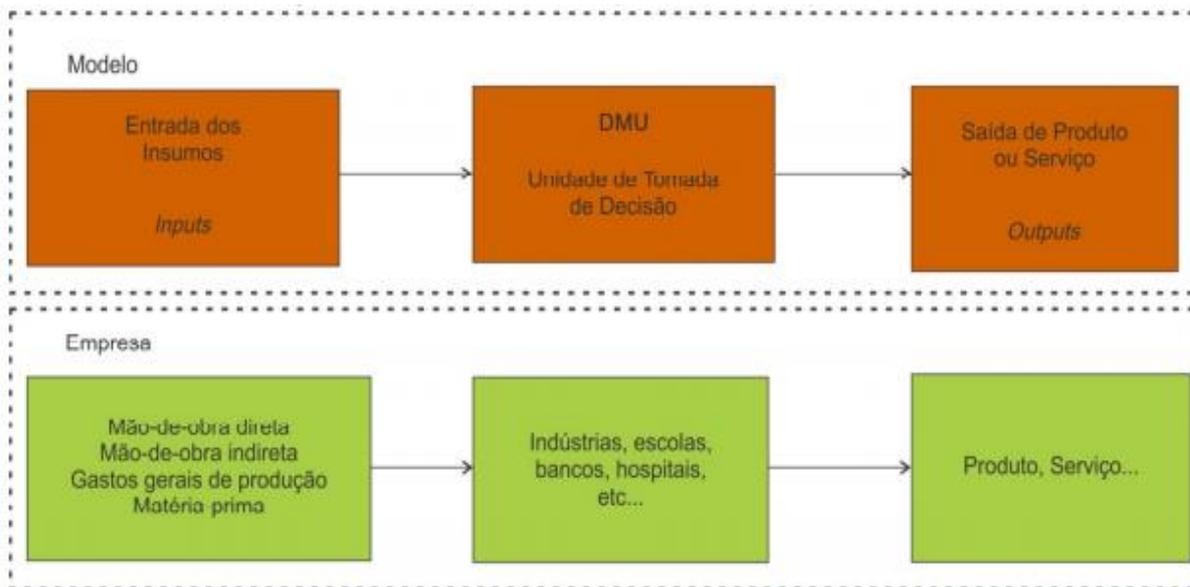
A avaliação ocorreu através da comparação do desempenho de alunos que participavam do programa, com um grupo de alunos que não estava

participando. A performance desse programa foi medida através do desempenho dos alunos em termos de saídas (outputs) definidos, por exemplo, habilidade psicomotora e melhoria de autoestima, e em entradas (inputs) como horas de auxílio por parte dos professores e das mães dos estudantes (Paris, 2016; Marques, 2017). Charnes et al., (1978), realizou uma adaptação do trabalho de Farrel (1957) para formular a sua técnica, visto que o trabalho original não contemplava os requisitos necessários para ter aplicabilidade à produção de um grande volume de entradas e saídas, sendo limitado a um único produto.

A Análise Envoltória de Dados é concebida através de uma programação matemática, não paramétrica, que vem chamando a atenção de diversas empresas e pesquisadores devido ao seu alto potencial de aplicação. A avaliação da eficiência é usada para realizar uma análise de desempenho das unidades tomadoras de decisões (Decision Making Units), em operações que contenham múltiplas entradas (inputs) e saídas (outputs) (KASSAI, 2002). A unidade tomadora de decisão (DMU) pode ser definida como uma linha de produção, uma área administrativa, departamentos, sistemas produtivos e até algum equipamento que esteja sendo submetido a uma avaliação de eficiência (Silva, 2018).

As DMU's são extremamente importantes para a utilização do DEA, sendo que a eficiência relativa de cada DMU é calculada pela razão da soma ponderada dos outputs pela soma ponderada dos inputs (Piran, Lacerda e Camargo, 2018). A Figura 4 apresenta a combinação dos inputs e outputs com as DMU's (unidade tomadora de decisão) utilizadas na Análise Envoltória de Dados (DEA).

Figura 4 - Conexão entre Input, Output e DMU – DEA



Fonte: Piran, Lacerda e Camargo (2018)

Existem DMU's eficientes e ineficientes em um processo, cuja identificação acontece através da fronteira de eficiência. A representação dessa fronteira de eficiência ocorre através de uma curva de produção máxima, onde as DMU's eficientes mostram-se na curva, enquanto as DMU's ineficientes ficam abaixo da referida curva. Devido à análise realizada, é possível identificar as DMU's ineficientes e buscar alternativas para torná-las eficientes (Mariano et al., 2006; Paris, 2016). Nesse caso, para a DMU avaliada como ineficiente, a DEA faz a identificação de uma série de referências abrangidas por uma DMU eficiente, tornando-a um exemplo a ser seguido em busca de melhoria, processo esse que recebe o nome de *benchmarking* (Piran, Lacerda e Camargo, 2018).

O *benchmarking* pode ser definido como um processo sistemático e contínuo para a avaliação de serviços, produtos e processos em organizações que são reconhecidas pelas melhores práticas, tendo como objetivo a busca por melhorias. Também pode-se buscar parâmetros e, com base neles, estabelecer metas nas indústrias e organizações reconhecidas ou, ainda, em relação aos principais concorrentes (Piran, 2023; Marques, 2023).

Desenvolvida por Charles et al., (1978), a técnica do DEA foi baseada nas pesquisas iniciais de Farrel (1957) e teve como primeiro modelo desenvolvido o CCR, referenciando-se às iniciais de seus criadores, e ficou conhecida como CRS (Constant Returns to Scale). O segundo modelo desenvolvido recebeu o

nome de BCC, sendo a abreviação dos nomes de seus desenvolvedores, Banke, Charnes e Cooper (1984), que ficou conhecida como VRS (Variables Returns to Scale) (Silva, 2018; Paris, 2016).

No entanto, os estudos tradicionais em DEA consideram os sistemas como um todo ao medir a eficiência, ignorando a operação dos processos individuais dentro do sistema (KAO, 2009). De acordo com Farë e Grosskopf (2000), o sistema é tratado como uma caixa preta, onde as entradas são transformadas em saídas para medir a eficiência relativa. Para Mirhedayatian, Azadi e Saen (2014), os modelos tradicionais de DEA são adequados e suficientes quando o objetivo é identificar DMUs ineficientes e avaliar o grau de sua ineficiência. No entanto, nos modelos clássicos, os processos internos envolvendo as DMUs são desconsiderados. Assim, o processo real de transformação não é explicitamente modelado (Farë; Grosskopf, 2000), o que significa que o desempenho dos processos não é levado em conta. Segundo Kao (2009), essa abordagem não permite obter informações sobre o próprio processo produtivo da DMU. Kao e Hwang (2008) destacam que ignorar as operações dos processos componentes pode levar a resultados enganosos.

## 2.4 NETWORK DEA

Färe e Grosskopf (2000) estenderam o conhecimento em relação aos modelos DEA clássicos e propuseram o modelo Network DEA ou "NDEA" para estudar o desempenho de uma DMU, observando os processos que a compõem e identificando as causas de possíveis ganhos de eficiência. Isso permite fornecer informações valiosas para o tomador de decisão (Kao, 2014; Hsieh; Ling, 2010).

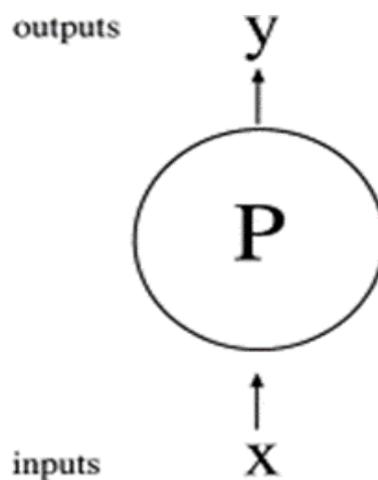
De acordo com Gomes Júnior et al., (2014), o modelo inicial de Network DEA foi desenvolvido por Färe e Grosskopf (2000) com o objetivo de desvendar a "caixa preta" que não é explorada nos modelos clássicos da DEA. No entanto, esse modelo tinha a limitação de considerar os estágios independentes, não levando em conta a interação entre os nós.

Quando se avalia a eficiência de uma organização multidivisional, existem duas abordagens possíveis: agregação e separação. A abordagem de

agregação negligencia os vínculos entre as atividades internas, o que impede a avaliação do impacto de uma divisão ineficiente específica na eficiência geral da unidade. Por outro lado, a abordagem de separação analisa a eficiência de cada divisão individualmente, mas não considera a continuidade dos vínculos entre as divisões (Tone; Tsutsui, 2008).

Para um melhor entendimento, pode-se realizar comparações do NDEA em relação ao modelo tradicional DEA, onde as entradas são denominadas por  $x = (x_1, \dots, x_n)$  e as saídas por  $y = (y_1, \dots, y_m)$ , cujo modelo simples e estático, frequentemente chamado de “caixa preta”, é ilustrado pela Figura 5, na qual as entradas  $x$  são utilizadas no processo de produção  $P$  para gerar a saída  $y$ . Pode-se modelar  $P$ , no caso mais simples, por uma função de produção ou como um modelo DEA em casos mais complexos. Independentemente de como  $P$  é modelado, não há informações sobre o que está acontecendo dentro do processo de produção  $P$ . Apenas a transformação das entradas  $x$  em saídas  $y$  é modelada (Färe et al., 2000).

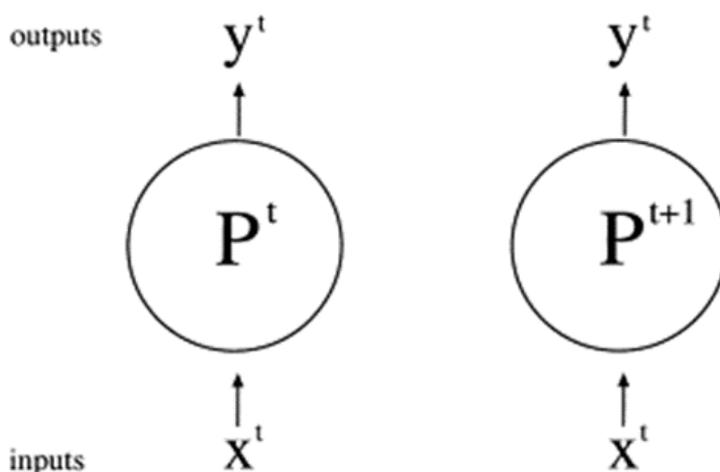
Figura 5 - Modelo tradicional



Fonte: Färe et al., (2000)

O modelo tradicional também pode ser usado para medir o desempenho ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 6, onde o modelo considera a tecnologia e os insumos como fixos e exógenos em cada período, no entanto, mudanças técnicas podem ocorrer ao longo do tempo, ocasionando mudanças significativas nos resultados de eficiência (Färe et al., 1994).

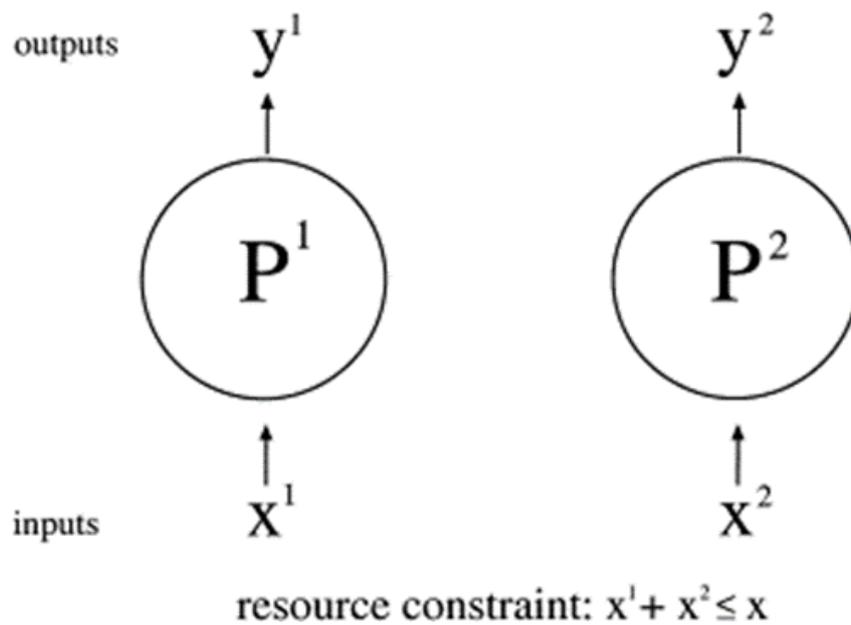
Figura 6 - Modelo tradicional ao longo do tempo



Fonte: Färe et al., (2000)

A Figura 7 apresenta um modelo que introduz a "ligação/relação" entre processos característicos dos modelos de rede, onde existe dois processos de produção,  $P_1$  e  $P_2$ , cada um gerando um vetor de saída  $y_1$  e  $y_2$ , respectivamente. Além disso, ambos os processos utilizam a mesma fonte de insumos  $x$ . Nesse caso, é analisada a alocação de  $x$  para  $P_1$  e  $P_2$ . Especificamente, se  $x_1$  for utilizado por  $P_1$  e  $x_2$  por  $P_2$ , então a soma desses valores não pode exceder o valor de  $x$ . Färe et al., (2000) ainda compara o modelo a uma plantação, onde  $y_1$  representa a produção de soja e  $y_2$  representa milho. A terra que receberá as plantações representa o  $x$  que pode ser alocada para a produção de  $y_1$  e  $y_2$ , sob a restrição de que o uso total dos insumos não ultrapasse os recursos fornecidos por  $x$ . Esse modelo pode ser utilizado para determinar a alocação ideal (maximização de produção, maximização de receita ou maximização de lucro) da terra para cultivos.

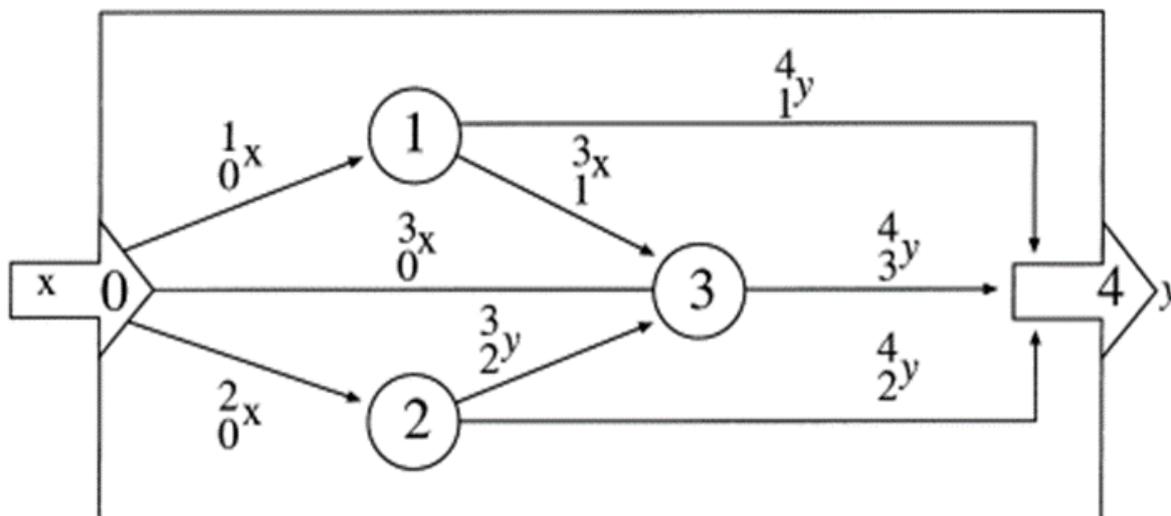
Figura 7 - Modelo com compartilhamento de recursos



Fonte: Färe et al., (2000)

A Figura 8 apresenta o modelo em rede, cujo objetivo é analisar o interior dessa caixa preta, avaliando os subprocessos e bens intermediários, que são os dois novos conceitos necessários para modelar uma rede. No processo representado pela Figura 9, são encontrados três subprocessos, sendo o 1, 2 e 3 e apenas uma entrada, denominada 0 e uma única saída final, chamada de 4. Esse modelo pode ser aplicado aos estudos de eficiências dinâmicas, em sua aplicação, a produção agregada é alocada entre consumo (os outputs finais) e investimento (o output intermediário). Eles resolvem o modelo para encontrar o caminho ótimo de consumo e investimento, que maximiza o consumo agregado descontado ao longo do horizonte de tempo (Färe et al., 2000).

Figura 8 - Modelo Network DEA



Fonte: Färe et al., (2000)

Fizsman (2010) explica o modelo Network DEA da seguinte forma: redes (networks) são sistemas compostos por dois ou mais processos interligados, seja em série ou em paralelo (esses são os principais tipos de rede utilizados). O modelo network faz parte de uma família de modelos DEA que impõe restrições lineares a cada subprocesso analisado. O modelo Network DEA representa os fluxos de relação entre as variáveis e gera um escore de eficiência total, além de um escore específico para cada dimensão ou processo dentro de cada DMU (escore divisional).

Os primeiros trabalhos que utilizaram o NDEA procuravam resolver um modelo DEA para cada etapa de forma independente, sem levar em consideração a continuidade das relações entre os nós. Esses trabalhos incluem Seiford e Zhu (1999), Zhu (2000), Sexton e Lewis (2003), Chilingirian e Sherman (2004), Narasimhan et al., (2004) e Soares de Mello et al., (2006).

A literatura sobre DEA está em constante evolução. Após a proposta do modelo NDEA radial por Färe e Grosskopf (2000), Lewis e Sexton (2004) apresentaram uma estrutura de múltiplos estágios para o NDEA. Em seguida, Tone e Tsutsui (2009) introduziram o modelo não radial SBM-NDEA, que utiliza medidas de folga para avaliar a eficiência. O modelo SBM-NDEA revela tanto as folgas nas entradas quanto nas saídas. Além disso, Kao (2009) considerou as inter-relações entre os processos por meio do NDEA-CCR relacional (multiplicativo). Este modelo varia de acordo com a estrutura da rede do

problema em questão. No entanto, não foi identificado na literatura um modelo NDEA considerando a comparação de um mesmo sistema ao longo do tempo, que é a abordagem inerente do benchmarking interno longitudinal.

O modelo NDEA mede a eficiência global do sistema e a eficiência dos processos/estágios, levando em conta as inter-relações entre eles e identificando as fontes de ineficiência do sistema. A eficiência do sistema representa o desempenho agregado dos processos componentes e pode ser calculada como o produto dos dois processos considerados. É importante ressaltar que o modelo também pode ser aplicado a um maior número de processos (Santos, 2017).

É importante ressaltar que, ao contrário dos modelos tradicionais, no modelo de rede os pesos são atribuídos de forma independente, sem a interferência do próprio modelo. Nesse caso, a atribuição é baseada na importância de cada estágio. Conforme destacado por Gomes Júnior et al., (2014), para que uma unidade seja considerada eficiente nos modelos de NDEA, ela deve ser eficiente em cada estágio individualmente. Portanto, é possível que não exista uma DMU totalmente eficiente.

De acordo com o modelo de NDEA, cada subprocesso pode ter diferentes variáveis de entrada (inputs) e de saída (outputs) exógenas. No entanto, os estágios internos de uma DMU estão conectados por meio de variáveis intermediárias que são endógenas (Gomes Júnior et al., 2014).

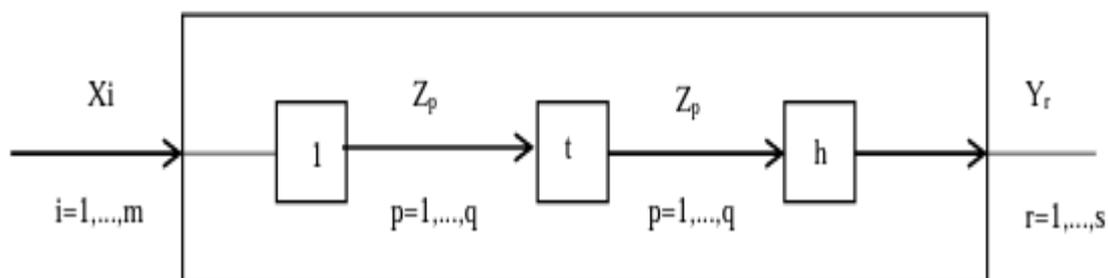
Kao (2014) explica que, ao considerar a estrutura interna do sistema, as entradas podem ser utilizadas por todos os processos e as saídas de cada processo podem ser produtos do sistema ou produtos intermediários a serem utilizados como entradas por outros processos. Isso significa que, no NDEA, uma variável pode atuar como saída em um estágio e como entrada em outro estágio, por exemplo. Dessa forma, o NDEA evita a necessidade de decidir se uma variável é exclusivamente uma entrada ou uma saída em todo o processo.

Existem duas estruturas básicas para um sistema em rede: a estrutura em série e a estrutura em paralelo. Para cada uma dessas estruturas, a eficiência (ou ineficiência) do sistema pode ser decomposta nas eficiências (ou ineficiências) dos processos componentes (Kao, 2009). No modelo relacional em série proposto por Kao (2009), cada etapa na sequência possui uma estrutura composta por processos. Nesse modelo, a eficiência do sistema é o produto das

eficiências dos processos. Destaca-se que este modelo é utilizado nesta pesquisa.

A Figura 09 ilustra a estrutura em rede em série, onde as entradas  $x_j$  são fornecidas ao estágio 1, que produz produtos intermediários  $Z_p$ . Esses produtos intermediários são então utilizados como entradas para o próximo estágio, resultando na produção dos produtos  $y_r$ .

Figura 9 - Estrutura de rede em série



Fonte: Färe et al., (2000)

O cálculo da eficiência do sistema da DMU  $k$  em uma estrutura em série com  $h$  processos, em que  $Z_p$  representa os produtos intermediários,  $x_j$  os inputs e  $y_r$  os outputs, é realizado através do modelo generalizado proposto por Kao e Hwang (2008):

$$E_k = \max \sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rk} \quad (03)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ik} = 1 \quad (04)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij} \leq 0, j = 1, \dots, n \quad (05)$$

$$\sum_{p=1}^q w_p^{(1)} z_{pj}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, j = 1, \dots, n \quad (06)$$

$$\sum_{p=1}^q w_p^{(t)} z_{p \cdot j}^{(t)} - \sum_{p=1}^q w_p^{(t-1)} z_{p \cdot j}^{(t-1)} \leq 0, \quad (07)$$

$$t = 2, \dots, h - 1, j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{r \cdot j} - \sum_{p=1}^q w_p^{(h-1)} z_{p \cdot j}^{(h-1)} \leq 0, j = 1, \dots, n \quad (08)$$

$$u_r, v_i, w_p^{(t)} \geq \varepsilon \quad r = 1, \dots, s, \quad (09)$$

$$i = 1, \dots, m, p = 1, \dots, q, \quad t = 1, \dots, h - 1$$

Onde:

$u_r$  = Peso aplicado ao *output*  $r$

$v_i$  = Peso aplicado ao *input*  $i$

$w_p$  = Peso aplicado à variável intermediária  $p$

$X_{ij}$  = Quantidade do *input*  $i$  na DMU  $j$

$Y_{rj}$  = Quantidade do *output*  $r$  na DMU  $j$

$Z_{pj}$  = Quantidade da variável  $p$  na DMU  $j$

$Y_{r0}$  = Quantidade do *output*  $r$  na DMU em análise

$u$  = Variável de retorno à escala do numerador

$v$  = Variável de retorno à escala do denominador

$j$  = Quantidade de DMU's

$m$  = Quantidade de *inputs*

$s$  = Quantidade de *outputs*

$q$  = Quantidade de variáveis intermediárias

Os produtos intermediários do processo  $t$  são tanto as saídas do processo  $t$  quanto as entradas do processo  $t + 1$ . No último processo  $h$ , os produtos intermediários correspondem às saídas do sistema (Kao, 2009). As

restrições representadas pela equação 05 são do sistema, enquanto as restrições das Equações 06, 07 e 08 são dos processos individuais. Segundo Kao (2009), o sistema de restrição é redundante e poderia ser omitido. Portanto, o número de restrições é igual ao número de DMUs multiplicado pelo número de processos no sistema. Assim, uma DMU é considerada eficiente somente se todos os seus processos forem eficientes. Sendo assim, a eficiência de cada processo será dada pelas equações (10, 11, 12) onde  $ur^*$ ,  $vi^*$  e  $w_p(t)^*$  são os multiplicadores ótimos.

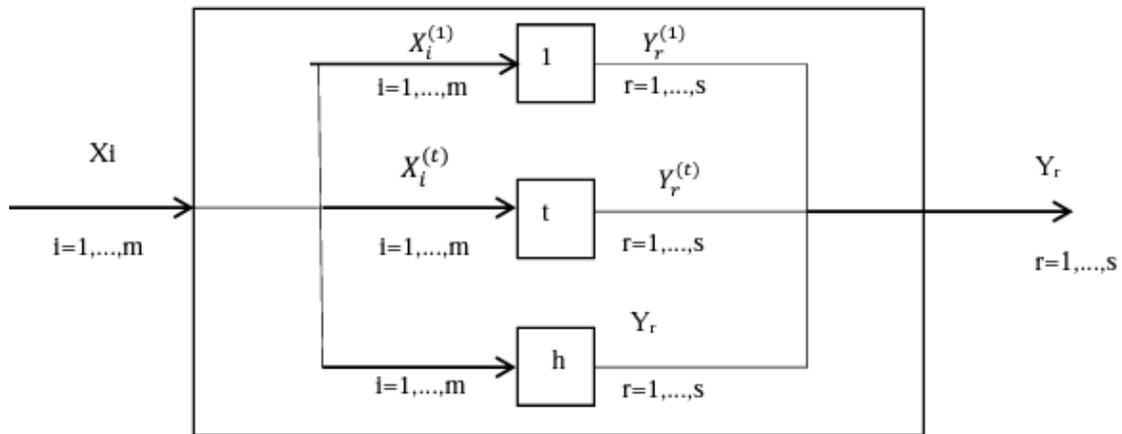
$$E_k^{(1)} = \frac{\sum_{p=1}^q w_p^{(1)} z_{pk}^{(1)}}{\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik}} \quad (10)$$

$$E_k^{(t)} = \frac{\sum_{p=1}^q w_p^{(1)} z_{pk}^{(1)}}{\sum_{i=1}^m w_p^{(t-1)} z_{pk}^{(t-1)}}, t = 2, \dots, h - 1 \quad (11)$$

$$E_k^{(h)} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r^* y_{rk}}{\sum_{p=1}^q w_p^{(h-1)} z_{pk}^{(h-1)}} \quad (12)$$

Embora menos comum na literatura, é possível configurar o modelo em rede de forma paralela, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Estrutura de rede em paralelo



Fonte: Kao (2009).

A eficiência do modelo acima, é calculada conforme a seguir:

$$E_k = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \quad (13)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} + s_k = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}^{(t)} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik}^{(t)} + s_k^{(t)} = 0, t = 1, \dots, h \quad (16)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, j = 1, \dots, n \neq k \quad (17)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^{(t)} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^{(t)} \leq 0, j = 1, \dots, n, j \neq k, t = 1, \dots, h \quad (18)$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon, r = 1, \dots, s, i = 1, \dots, m \quad (19)$$

A Equação 17 corresponde ao sistema, enquanto a Equação 18 representa a restrição do processo  $t$ . O somatório das restrições dos processos nas Equações 16 e 18 é equivalente às restrições do sistema nas Equações 15 e 17. Portanto, as restrições 15 e 17 podem ser omitidas.

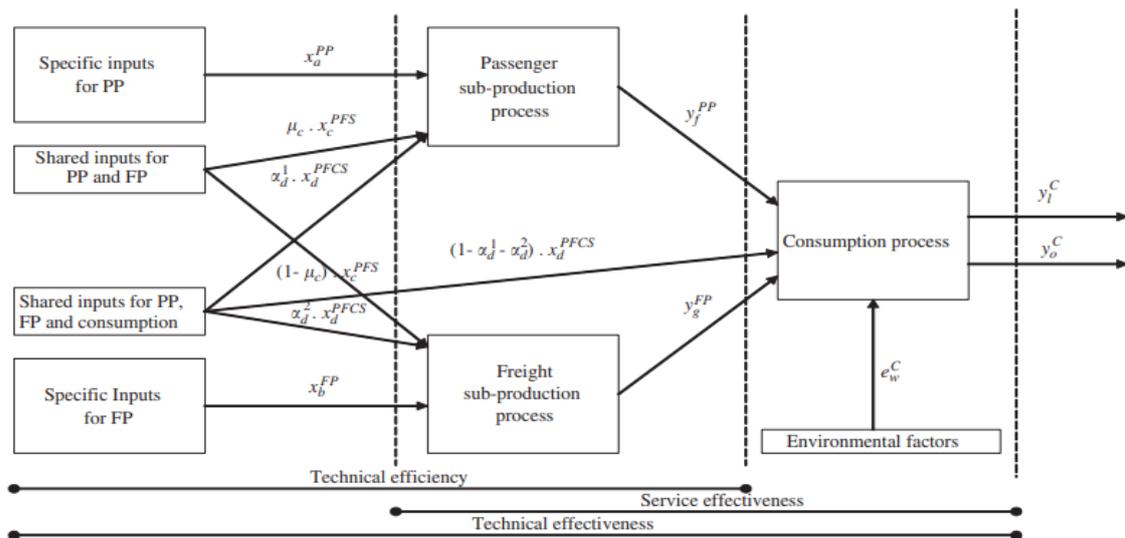
Em um sistema paralelo, todos os seus componentes devem ser processos eficientes para que o sistema seja eficiente. O número de restrições para o modelo NDEA paralelo é igual ao produto do número de DMUs pelo número de processos no sistema (Kao, 2009). Os sistemas em rede podem ter estruturas diversificadas e não se limitam apenas a configurações em série ou paralelo. Um sistema em rede pode ser representado por uma estrutura em série, na qual cada etapa da série é uma estrutura paralela composta por um conjunto de processos (Kao, 2009).

#### **2.4.1 Outros tipos de redes**

Conforme indicado por Kao (2009), os sistemas em rede são fundamentados em duas estruturas primárias: a configuração em série e a configuração em paralelo. No entanto, em sua mais recente publicação, Kao (2014) destaca a existência de variantes adicionais de redes, as quais são percebidas como extensões das formas primárias.

Existem sistemas de rede cujas estruturas não se encaixam estritamente nem como séries nem como paralelas, mas consistem em uma combinação das duas, denominada de redes mistas. Em um estudo conduzido por Yu e Lin (2008), as operações ferroviárias foram divididas em duas etapas: produção e consumo, sendo que a primeira foi subdividida em dois processos distintos, passageiros e carga. O objetivo era maximizar a soma ponderada dos parâmetros de distância em relação a um vetor de direção específico. O desempenho de 20 empresas ferroviárias ao redor do mundo foi avaliado nesse contexto. A Figura 11 apresenta o modelo apresentado no estudo.

Figura 11 - Exemplo de rede mista



Fonte: Yu e Lin (2008).

O objetivo dos estudos DEA de rede é revelar o funcionamento interno de um sistema, considerando as operações de seus componentes. Embora idealmente cada DMU deva ter o mesmo número de processos desempenhando funções correspondentes para garantir uma comparação equitativa, é possível avaliar a eficiência do sistema e dos processos mesmo sem essa correspondência direta, desde que os mesmos insumos gerem os mesmos resultados. Estruturas hierárquicas podem conter vários níveis, mas os artigos existentes geralmente discutem apenas dois níveis. Quando não há interação entre a sede e as unidades subordinadas em um único nível, o sistema pode ser considerado como paralelo (Kao, 2014).

Cook e Green (2005) abordaram um sistema hierárquico de múltiplas camadas, fundamentado na concepção previamente apresentada por Cook et al. (1998). Nesse sistema, a sede é constituída por várias divisões, cada uma das quais possui diversas subdivisões. Os autores utilizaram como exemplo um estudo envolvendo 10 usinas canadenses, totalizando 40 unidades de energia, para ilustrar o funcionamento de uma dessas camadas.

Segundo Kao (2014), as estruturas dinâmicas envolvem a repetição de um sistema de período único conectado por transições, com a estrutura de período único podendo ser qualquer um dos tipos de rede já mencionados. Em termos estruturais, a estrutura dinâmica se assemelha à de série, exceto pelo

fato de ser mais abrangente, permitindo que cada período tenha uma estrutura de rede distinta. Do ponto de vista físico, a estrutura dinâmica é uma forma especial de estrutura em série, uma vez que os insumos, produtos e produtos intermediários (transições) permanecem os mesmos em todos os períodos. (Kao, 2014).

#### **2.4.2 Estudos relacionados com a utilização de Network DEA**

De acordo com Oliveira (2008), é necessário aplicar três etapas básicas para executar a aplicação de DEA: a) definição e seleção das DMUs; b) definição e seleção dos *inputs* e *outputs*; c) escolha do modelo de aplicação. Sendo assim, pode-se utilizar o mesmo embasamento para a aplicação do NDEA, contudo no modelo em rede utiliza-se uma estrutura com múltiplos estágios, sendo possível avaliar a eficiência global do sistema e a eficiência dos processos internos, levando em consideração a relação destes processos internos, assim revelando suas fontes de ineficiência (Santos, 2017). Deste modo, o Quadro 4 apresenta uma análise da literatura que demonstra como os pesquisadores têm definido as etapas de modelagem do NDEA, Tabela esta que visa apoiar a definição do modelo da presente dissertação.

Quadro 4 - Lista de estudos incluídos na pesquisa

<b>Título</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Aplicação</b>	<b>DMU</b>	<b>Inputs / Outputs (1º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (2º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (3º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (4º estágio)</b>
An empirical analysis on regional technical efficiency of Chinese steel sector based on network DEA method	Yang et al., (2014)	Setor siderúrgico chinês	Diferentes regiões que compõem o setor siderúrgico chinês	Capital investido para compra de ativo; Mão de obra total.	Ferro-gusa produzido	Aço bruto; Aço acabado.	-
Integrated ahp and network dea for assessing the efficiency of iranian handmade carpet industry	Omid et al., (2015)	Indústria de tapetes artesanais	15 categorias de tapetes artesanais	Matéria-prima; Remunerações; Outras despesas.	Tapetes perfeitos	Lucros vendas internas; Lucros vendas externas.	-
Overall Efficiency and its Decomposition in a Two-Stage Network DEA Model	Yang et al., (2017)	Setor siderúrgico chinês	15 indústrias chinesas	Ligas; Sucata de aço; Eletricidade; Tempo real de fundição;	Gás; Tarugo; Eletricidade.	Aço qualificado.	-

<b>Título</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Aplicação</b>	<b>DMU</b>	<b>Inputs / Outputs (1º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (2º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (3º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (4º estágio)</b>
Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry	Wu et al., (2017)	Sustentabilidade na produção de aço	30 siderúrgicas chinesas	Consumo de energia; Consumo de água doce; Consumo de minério de ferro;	Ferro-gusa; Aço bruto; Aço acabado; Águas residuais; Colaboradores para proteção do meio ambiente; Custo para tratamento de águas residuais e esgoto.	Água residual descartada; Consumo de água reutilizável.	-
Regional technical efficiency of Chinese Iron and steel industry based on bootstrap network data envelopment analysis	Yang et al., (2017)	Setor siderúrgico chinês	26 províncias chinesas	Investimento em ativos fixos; Colaboradores;	Ferro-gusa;	Aço bruto; Aço acabado.	-
DEA for nonhomogeneous mixed networks.	Barat et al., (2017)	Indústria petroquímica	20 fábricas petroquímicas	Ureia; Amônia; Enxofre.	Melamina; Carbonato; Ácido sulfúrico	Melamina Cristal; Sulfato de amônia.	-

<b>Título</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Aplicação</b>	<b>DMU</b>	<b>Inputs / Outputs (1º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (2º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (3º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (4º estágio)</b>
Competitiveness evaluation methodology for aviation industry sustainability using network DEA	Song et al., (2020)	Indústria aeronáutica	Mercado de transporte aéreo nacional	Número de rotas; Número de aeroportos; População; PIB; Atração turística	Receita por km; Toneladas-qm de carga;	Valor agregado da aviação.	-
Research on the regional differences and influencing factors of the innovation efficiency of china's high-tech industries: Based on a shared inputs two-stage network DEA	Chen et al., (2020)	Eficiência da inovação das indústrias de alta tecnologia chinesas.	29 províncias chinesas	Inovação	Tecnologia científica;	Industrialização tecnológica científica.	Inovação.
Evaluation of the operating performance of Taiwanese machine tool industry with the dynamic network DEA model.	Lu et al., (2019)	Indústria de máquinas em Taiwan	8 empresas	Ativo permanente; Número de colaboradores; Despesas de P & D.	Receita operacional; Resultado não operacional.	Valor de Marketing; Lucro por ação.	-

<b>Título</b>	<b>Autor/Ano</b>	<b>Aplicação</b>	<b>DMU</b>	<b>Inputs / Outputs (1º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (2º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (3º estágio)</b>	<b>Inputs / Outputs (4º estágio)</b>
Two-stage network DEA with shared resources: Illustrating the drawbacks and measuring the overall efficiency	Khoveyni et al., (2022)	Cadeia de Suprimentos de Manufatura	20 cadeias de suprimentos de manufatura	Custo de fabricação; Tempo de fabricação.	Lucro da fábrica; Produtos da fábrica para CD; Taxa de preenchimento; Custo de gerenciamento da fábrica; Custo de gerenciamento do CD; Número médio de pedidos pendentes.	Lucro	-
Centralized resource allocation in two-stage production systems: a network DEA approach	Yadollahi et al., (2022)	Setor bancário (aplicação empírica)	8 bancos chineses	Ativos fixos; Custo de funcionamento; Salário de pessoal; Reserva de capital	Adiantamento a clientes; Retorno de investimento	Depósitos	-

Título	Autor/Ano	Aplicação	DMU	Inputs / Outputs (1º estágio)	Inputs / Outputs (2º estágio)	Inputs / Outputs (3º estágio)	Inputs / Outputs (4º estágio)
A new modeling approach for undesirable factors in efficiency evaluation of cement industry with four stages structure based on piecewise linear NDEA model	Khoveyni et al., (2022)	Indústrias de cimentos iranianas	42 empresas de cimento	Estágio 1: Extração de matérias-primas e pré-homogeneização  Inputs: Matérias-primas (como calcário, argila, areia, minério de ferro), energia elétrica, água. Outputs: Matérias-primas preparadas para o próximo estágio.	Estágio 2: Moagem e pré-aquecimento  Inputs: Matérias-primas preparadas do estágio anterior, combustível (carvão, óleo, gás), energia elétrica. Outputs: Cimento cru moído, gases residuais.	Estágio 3: Clinkerização  Inputs: Cimento cru moído, combustível, energia elétrica. Outputs: Clinker (material granulado resultante da calcinação do cimento cru), gases residuais.	Estágio 4: Moagem de clinker e embalagem.  Inputs: clinker, aditivos (se necessário), energia elétrica. Outputs: Cimento finalizado (em forma de pó ou outros formatos), resíduos sólidos.

Fonte: Elaborado pela autora com base nos trabalhos citados

Dentre os estudos selecionados, apenas quatro estudos contemplam a análise em manufaturas de produção de aço, porém contemplam a cadeia como um todo, não analisando em específico o processo de laminação. Os estudos em questão contemplam processos abrangentes, onde o trabalho de Yang et al., (2014) apresenta uma comparação entre o DEA convencional e o NDEA e, para modelar a rede do NDEA, considera a fabricação do ferro-gusa como produto intermediário e a produção do aço bruto como produto final, esse artigo apresenta três estágios, onde utiliza capital investido para compra de ativo e mão de obra total como *inputs* no primeiro estágio, obtendo o ferro-gusa produzido com *output* do segundo estágio e *input* do terceiro estágio, que por sua vez, considera como *outputs* o aço bruto produzido e o aço finalizado.

O trabalho de Yang et al., (2017) também apresenta uma comparação entre o modelo convencional DEA e o NDEA, sendo aplicado aos processos de fundição e fabricação de tarugos. Esse artigo apresenta três estágios, onde utiliza o tempo real de fundição, a quantidade de ligas, sucatas de aço e eletricidade utilizados no processo como *inputs* no primeiro estágio, onde obtém-se o tarugo como *output* e conseqüentemente ele entra como *input* no terceiro estágio, junto com o gás e eletricidade consumidos no processo subsequente, obtendo o aço qualificado como produto.

O trabalho de Wu et al., (2017) avalia a sustentabilidade durante a produção do aço, onde utiliza os dados de recursos empregados no forjamento do aço, bem como a destinação dos resíduos gerados ao longo da produção. Esse artigo apresenta três estágios, onde utiliza consumo de energia, consumo de água doce e consumo de minério de ferro como *inputs* no primeiro estágio, já no segundo estágio, considera ferro-gusa, aço bruto, aço acabado como *outputs* do estágio atual e *inputs* dos próximos estágios, junto com águas residuais, colaboradores para proteção do meio ambiente, custo para tratamento de águas residuais e esgoto. E por fim, obtém-se como *outputs* do terceiro estágio a água residual descartada e o consumo de água reutilizável.

E por fim, um terceiro trabalho de Yang et al., (2017) faz uma avaliação da eficiência técnica de vinte e seis empresas, porém avalia as regiões que elas estão instaladas, para avaliar se há diferenças significativas entre elas. O artigo apresenta três estágios, onde utiliza o investimento em ativos fixos e o número de colaboradores como *inputs* no primeiro estágio, obtendo o ferro-gusa como *output*

no segundo estágio, onde mesmo também é considerado como *input* ao terceiro estágio, este por sua vez obtém aço bruto e aço acabado como *output* de seu processo.

Os demais estudos encontrados analisam manufaturas em ramos distintos, dentre eles, pode-se citar o trabalho conduzido por Omid et al., (2015) que foca na produção de tapetes, utilizando como DMU as quinze categorias distintas de tapetes artesanais de uma única indústria chinesa. Este artigo apresenta três estágios, sendo a matéria-prima, as remunerações e as outras despesas consideradas como *inputs* no primeiro estágio, onde através da produção se obtém tapetes perfeitos como *outputs* no segundo estágio e, que são utilizados como *inputs* no terceiro estágio. Após o terceiro estágio obtém-se os lucros vendas internas e os lucros vendas externas como *outputs* deste estágio.

Por sua vez, o trabalho de Lu et al., (2019) apresenta uma aplicação para avaliar a eficiência técnica de oito empresas fabricantes de máquinas em Taiwan. O artigo apresenta três estágios, onde utiliza o ativo permanente, número de colaboradores e as despesas de P & D como *inputs* no primeiro estágio, a partir do processo inicial, obtém-se a receita operacional e o resultado não operacional como *outputs*, que também são considerados como *inputs* no estágio posterior. Como *outputs* finais, tem-se o valor de *Marketing* e o lucro por ação.

O trabalho de Barat et al., (2017) expõe uma avaliação de eficiência de vinte indústrias petroquímicas. Ele apresenta três estágios, onde utiliza as quantidades de ureia, amônia e enxofre utilizados no processo como *inputs* no primeiro estágio, a partir do processo inicial, obtém-se a melamina, o carbonato e o ácido sulfúrico, que também servem como *inputs* para o terceiro estágio e como *outputs* totais do processo se obtém a melamina Cristal e o sulfato de amônia.

O estudo de Roudabr et al., (2022) apresenta uma análise de eficiência utilizando o NDEA para avaliar 42 empresas de fabricação de cimento. O artigo apresenta quatro estágios, onde são separados nos seguintes tópicos:

- Estágio 1: contempla o processo de extração de matérias-primas e pré-homogeneização, utiliza como *inputs* matérias-primas (como calcário, argila, areia, minério de ferro), energia elétrica, água. E obtém-se como *outputs* a matérias-primas preparadas para o próximo estágio;

- Estágio 2: contempla o processo de moagem e pré-aquecimento, utiliza como *inputs* as matérias-primas preparadas do estágio anterior, combustível (carvão, óleo, gás), energia elétrica. E através do processo, obtém-se como *outputs* o cimento cru moído e gases residuais;
- Estágio 3: contempla o processo de clinkerização, que faz uso como *inputs* o cimento cru moído, combustível e energia elétrica. E se obtém como *outputs* o Clinker (material granulado resultante da calcinação do cimento cru) e gases residuais;
- Estágio 4: contempla o processo de moagem do clinker obtido no processo anterior e embalagem, que faz uso como *inputs* o clinker, alguns aditivos quando houver a necessidade e energia elétrica. E como *outputs* o cimento finalizado, seja ele em forma de pó ou outros formatos e os resíduos sólidos gerados no processo.

Outro estudo incluído na presente pesquisa é o trabalho de Song et al., (2020) onde expõe uma avaliação sobre a indústria aeronáutica, utilizando como DMU o mercado de transporte aéreo nacional, nesse caso, utilizando os seguintes países como DMU: Argentina, Austrália, Áustria, Bélgica, Brasil, Canadá, Chile, China, Hong Kong, Colômbia, República Checa, Egito, Etiópia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Índia, Indonésia, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Jordânia, Quênia, Letônia, Líbano, Luxemburgo, Malásia, Malta, Coreia, México, Marrocos, Holanda, Nova Zelândia, Nigéria, Panamá, Peru, Filipinas, Polônia, Portugal, Romênia, Rússia, Ruanda, Arábia Saudita, Cingapura, África do Sul, Espanha, Suíça, Tailândia, Peru, Emirados Árabes, Reino Unido e Estados Unidos. O artigo apresenta três estágios, onde utiliza como *inputs* no primeiro estágio o número de rotas, o número de aeroportos, a população do país, o PIB e as atrações turísticas do mesmo. A partir daí, se obtém a receita por km como *output* no segundo estágio, onde é utilizado *output* no terceiro estágio junto com as toneladas-qm de carga. Após todos os estágios, atinge-se como *output* final o valor agregado da aviação.

Com o objetivo de complementar a presente dissertação, também foi incluído o estudo de Yadollahi et al., (2022), que foi realizado, de modo empírico, em oito bancos chineses, para avaliar a eficiência deles, utilizando o NDEA. O

estudo apresenta dois estágios e, utiliza os ativos fixos, o custo de funcionamento, o salário de pessoal e a reserva de capital como *inputs*. Após o estágio em questão, obtém-se o número de adiantamento realizados aos clientes e o retorno de investimento, que também são utilizados como *inputs* no estágio seguinte. Como *output* final, tem-se a quantidade de depósitos efetuados.

Por fim, também foi incluído o estudo de Khoveyni et al., (2022), que busca analisar uma rede de suprimentos de manufatura, composta por vinte cadeias de Suprimentos. O artigo possui dois estágios e utiliza como *inputs* no estágio inicial o custo e o tempo de fabricação, que geram como *outputs* o lucro da fábrica, os produtos da fábrica para o centro de distribuição, a taxa de preenchimento, os custos de gerenciamento da fábrica, os custos de gerenciamento do centro de distribuição e o número médio de pedidos pendentes, ambos também são utilizados como *inputs* para o segundo estágio, assim gerando o lucro total como *output* final do estudo. Ambos os estudos foram incluídos, permitem avaliar a utilização do modelo NDEA com variáveis envolvendo lucro, custos de pessoal e serviços, como por exemplo, bancos, manufaturas e empresas de tecnologia.

A etapa de elaboração do NDEA é considerada um dos aspectos mais críticos em pesquisas que empregam a análise envoltória de dados como técnica para avaliar a eficiência de processos. Nesse contexto, reconhece-se a importância de revisar a literatura e examinar as definições adotadas em estudos anteriores, a fim de embasar a definição do modelo a ser utilizado na presente dissertação. Essa revisão da literatura e seleção criteriosa das definições anteriores podem oferecer suporte significativo para orientar a construção do modelo analítico apropriado para a pesquisa em questão (Piran, 2015).

### 3.PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Uma pesquisa consiste em uma investigação sistemática que busca primordialmente o aprimoramento ou a criação de teorias, e, em certas circunstâncias, visa solucionar problemas (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015). De acordo com Silva (2005), o objetivo de uma pesquisa científica consiste em testar uma hipótese científica relacionada a um problema científico particular. Para que uma pesquisa seja reconhecida como sólida e possivelmente relevante, tanto pelo meio acadêmico como pela sociedade em geral, é necessário que ela demonstre ter sido conduzida com rigor, podendo ser debatida e posteriormente verificada (Lacerda et al., 2013). Diante disso, Barnes (2001) reforça que a escolha de um método adequado é crucial para alcançar o sucesso em qualquer projeto de pesquisa.

Na pesquisa científica, o método de pesquisa busca propor uma premissa de como o conhecimento é construído, cuja condução seja por motivações teóricas para avançar na ciência ou usado como pesquisa prática para ajudar na solução de problemas profissionais (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015). A relevância metodológica de um projeto pode ser explicada pela necessidade de encontrar a melhor metodologia para abordar as questões da pesquisa e assegurar uma base científica adequada (Miguel, 2007).

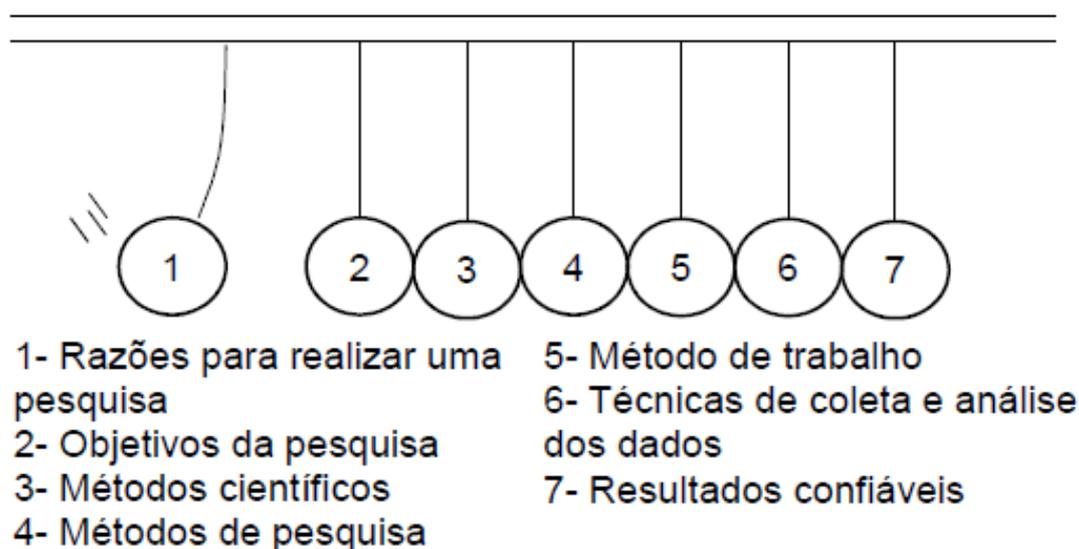
Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos metodológicos para a identificação das variáveis sistemicamente prevalentes que impactam a eficiência técnica do processo de laminação. Primeiramente, são discutidas as decisões metodológicas que embasam a pesquisa. Em seguida, descreve-se o método de trabalho utilizado para alcançar o objetivo da pesquisa. Na seção subsequente, será detalhado o delineamento da pesquisa.

#### 3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A etapa de elaboração ou organização dos instrumentos de investigação desempenha um papel crucial no planejamento da pesquisa (Marconi; Lakatos, 2003). Portanto, o planejamento deve ser cuidadosamente elaborado visando facilitar a análise e interpretação dos resultados, sendo o rigor e o controle fatores essenciais (Marconi; Lakatos, 2003). É fundamental que esses

procedimentos metodológicos sejam comunicados de maneira simples, clara, objetiva, concisa e coerente (Marconi; Lakatos, 2003). A Figura 12 representa a estratégia para a condução de pesquisas científicas (Dresch; Lacerda; Antunes Jr., 2015).

Figura 12 - Pêndulo representativo da condução de pesquisas científicas



Fonte: Dresch; Lacerda; Antunes Jr. (2015)

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta as principais motivações e objetivos desta pesquisa. Nessa etapa, destacou-se a relevância do tema proposto para este estudo, os principais desafios relacionados às métricas de avaliação de desempenho dos equipamentos e à eficiência do processo, bem como as justificativas para o desenvolvimento desta pesquisa. Além disso, ressaltou-se a importância das medidas de eficiência para as empresas e os potenciais contribuições deste trabalho para o meio acadêmico.

Na revisão sistemática realizada (detalhada na seção 1.3 e com o protocolo incluso no Anexo A), não foram localizadas pesquisas que possam solucionar o problema apontado, sendo assim, a proposta desta pesquisa é realizar a aplicação prática do modelo avançado de DEA em um processo de laminação, pois enquanto o DEA tradicional trata esse processo de fabricação em dois estágios como uma caixa preta, ignorando os conflitos internos e a cooperação entre vários estágios de fabricação, o modelo NDEA de dois

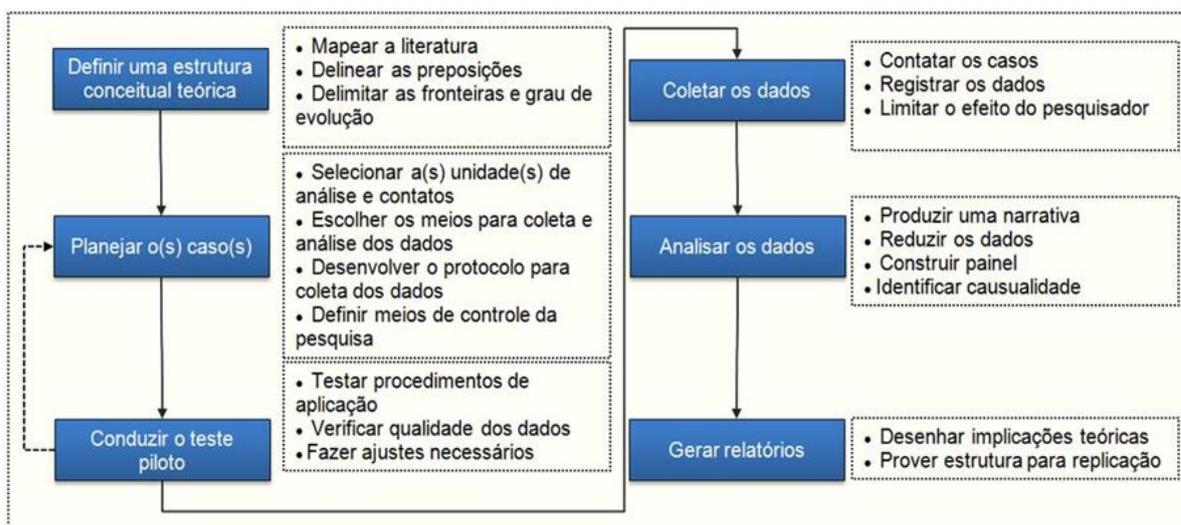
estágios busca apresentar os resultados bons e indesejáveis do processo de fabricação.

Quanto à natureza, pode-se classificar esta pesquisa como aplicada, pois a finalidade é solucionar questões e problemas identificados na sociedade em que os pesquisadores estão inseridos, visando aplicação em uma situação específica (Silva, 2005). Em relação ao tipo de abordagem, pode-se classificar esta pesquisa como quantitativa. De acordo com Dalfovo, Lana e Silveira (2008), a pesquisa quantitativa visa utilizar a quantificação na coleta e no tratamento de informações, empregando técnicas estatísticas, com o objetivo de obter resultados que minimizem distorções de análise e interpretação, proporcionando uma maior confiabilidade.

Neste trabalho será realizado um estudo de caso aplicando o NDEA para medir a eficiência de um processo de laminação de barras e perfis. De acordo com Yin (2005), os estudos de caso são empregados quando o objetivo é compreender fenômenos sociais complexos, uma vez que possibilitam uma investigação que preserva as características holísticas e significativas dos eventos da vida real. Pode-se salientar que o estudo de caso é uma abordagem empírica adotada para conduzir a pesquisa e possibilita a análise de um ou mais objetos observados, resultando no aprofundamento do conhecimento do pesquisador sobre o fenômeno em questão (Miguel, 2007; Eisenhardt , Graebner, 2007).

Outro aspecto importante a ser considerado é apresentado por Eisenhardt (1989), onde a autora afirma que o estudo de caso tem como objetivo, entre outros, testar a teoria existente. Portanto, este trabalho busca testar a teoria que atribui benefícios à utilização do modelo NDEA para a avaliação de eficiência em processos produtivos. Para que seja possível alcançar os objetivos propostos através da utilização do estudo de caso, se faz necessário cumprir as etapas indispensáveis ao longo da condução da pesquisa. As etapas citadas por Miguel et al., (2012) são detalhas na Figura 13.

Figura 13 - Etapas para condução do estudo de caso



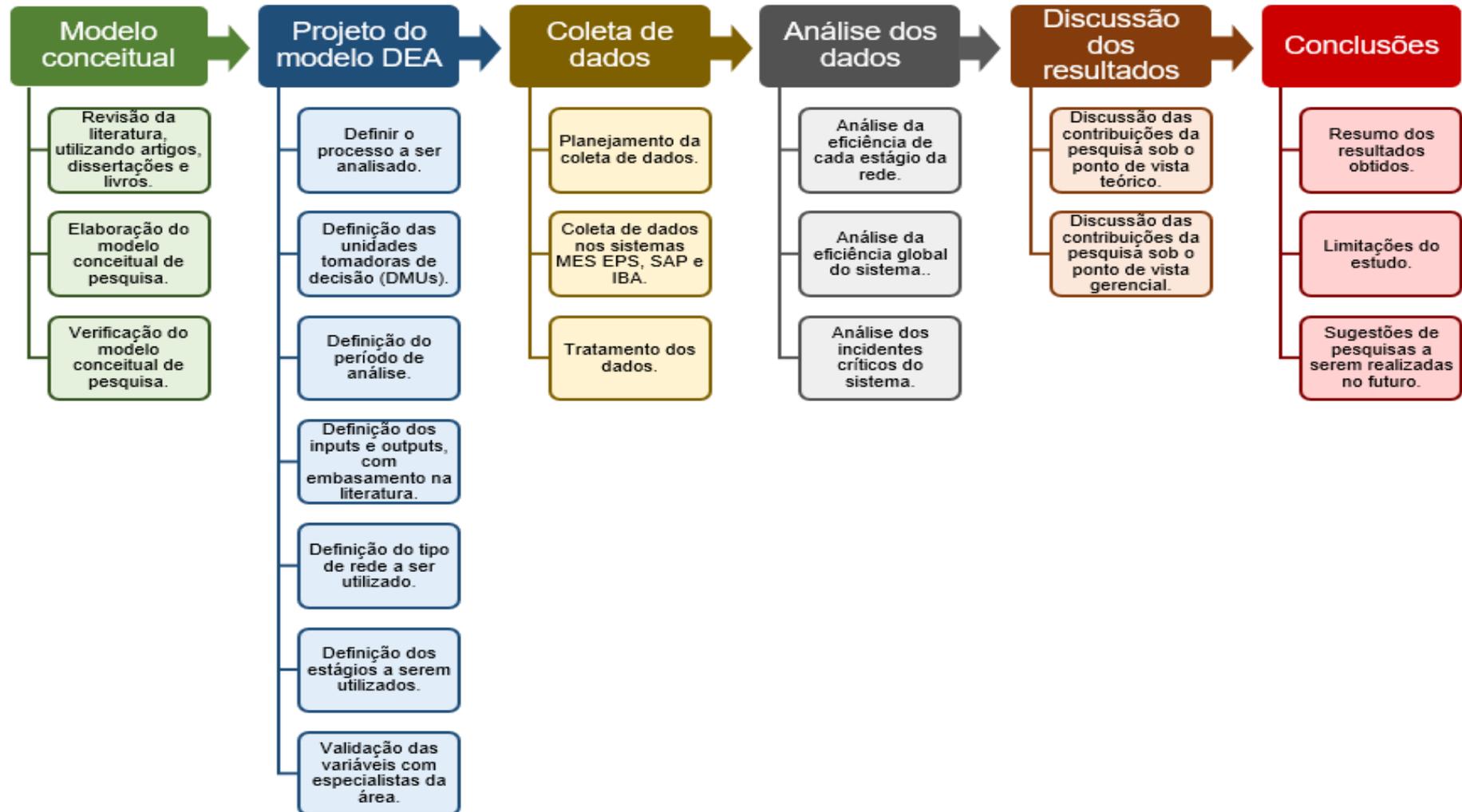
Fonte: Miguel et al., (2012)

Após compreender a classificação da pesquisa e suas principais características, será apresentado, na seção 3.2, o método de trabalho utilizado no desenvolvimento deste estudo, descrevendo suas etapas e procedimentos operacionais.

### 3.2 MÉTODO DE TRABALHO

As etapas do método de trabalho da presente pesquisa são desenhadas conforme sugestão de Cauchick Miguel et al., (2012), conforme apresentadas na Figura 14. Foram realizadas alterações no método de trabalho desta pesquisa para adequá-lo às suas necessidades e particularidades, acrescentando novas etapas que contemplam a utilização de Network DEA. O método está dividido em seis etapas: i) estrutura conceitual; ii) planejamento do caso; iii) coleta dos dados; iv) análise dos dados; v) discussão dos resultados e vi) conclusão. A Figura 14 apresenta as etapas definidas do método de trabalho desta dissertação.

Figura 14 - Método de trabalho



Fonte: Elaborado pela autora

Na primeira etapa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de construir uma base teórica sólida sobre o tema. Essa busca envolveu a procura por artigos, dissertações e trabalhos que abordassem conceitos relacionados sobre a utilização de Network DEA em indústrias e manufaturas. Nessa busca, procurou-se por trabalhos que explorassem tópicos como indústrias, manufaturas, medidas de eficiência, definições de Network DEA. Os resultados da RSL realizada estão apresentados na seção 1.3 desta dissertação.

Na segunda etapa, foi realizado o desenvolvimento da projeção do modelo Network DEA. Nessa fase, as unidades tomadoras de decisão (DMUs) foram definidas, o período de análise foi estabelecido e os inputs e outputs foram determinados. Neste momento, também se formou um grupo focal, composto pelos especialistas da área para apoiar ao longo do estudo. As variáveis selecionadas foram relacionadas e validadas por esse grupo de especialistas da área de manutenção e operação, na qual as variáveis receberam os ajustes necessários, adequando-as aos dados existentes nas bases de dados da referida empresa. Os especialistas que compõem o grupo focal são apresentados na seção 3.3. desta dissertação.

A terceira etapa envolveu a coleta de dados de forma planejada, utilizando informações disponibilizadas pela empresa. Nessa etapa, houve uma verificação adicional junto aos especialistas da área. Os dados foram tratados e analisados conforme descrito na seção de Coleta de Dados. Na quarta etapa, ocorre a aplicação do Network DEA utilizando os dados coletados, onde serão identificadas as eficiências das DMUs utilizadas, sendo possível realizar uma comparação entre as DMUs eficientes e ineficientes. Nesta etapa, utilizou-se o software Microsoft Excel. Após a obtenção dos resultados, eles foram submetidos à aprovação do grupo de especialistas, onde foram analisados e discutidos. A análise dos dados ocorrerá a partir da análise dos incidentes críticos, onde serão avaliados os diários de bordo, e-mails de programação, relatórios de interrupção, entre outros. Considera-se a quarta etapa como sendo uma das mais importantes da pesquisa, pois os resultados encontrados apontam as ineficiências do sistema, assim garantindo subsídios para orientar a tomada de decisão por parte da alta administração, bem como auxiliar na proposição de melhorias para melhorar a eficiência do processo.

A discussão dos resultados ocorre na quinta etapa da pesquisa, na qual busca-se encontrar as causas das ineficiências apontadas na etapa anterior, através das principais diferenças evidenciadas entre DMUs eficientes e ineficientes. Neste momento também são avaliadas quais informações são capazes de contribuir para que ocorra a formação de conhecimento teórico que tem possibilidade de ser expandida e conseqüentemente ser aplicada em diversos tipos de processos produtivos, em diversos modelos de negócios e empresas manufatureiras. As conclusões da pesquisa são apresentadas na sexta etapa do método de trabalho. Neste capítulo, os resultados obtidos são sintetizados e apresentados junto às limitações da pesquisa, bem como sugestões de pesquisas futuras no tema objeto desta pesquisa.

### 3.3 PROJETO DO MODELO NDEA

A pesquisa foi conduzida em uma empresa do setor siderúrgico, localizada no estado do Rio Grande do Sul. A primeira etapa do trabalho na empresa consistiu na seleção de um grupo focal, composto por especialistas internos da empresa, sendo das de manutenção e operação, para auxiliar na definição da operação a ser analisada, na análise das variáveis do modelo, na coleta de dados e na análise dos resultados. A participação dos profissionais da empresa é importante para garantir a adequação dos modelos NDEA, conforme mencionado por Senra et al., (2007). Para esse fim, foram escolhidos um engenheiro mecânico, que é especialista em manutenção de laminadores, um engenheiro de processo, um engenheiro de produção, um operador responsável pelo comando central e um assistente técnico em automação, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Grupo focal de especialistas

<b>Cargo</b>	<b>Tempo de empresa</b>	<b>Formação</b>
Engenheiro mecânico (especialista em manutenção de laminadores)	20 anos	Graduação em Engenharia mecânica; Especializações em hidráulica, processos siderúrgicos e engenharia de manutenção.
Engenheiro de processos	30 anos	Graduação em Engenharia mecânica; Especializações em processos de laminação, segurança do trabalho e gestão de negócios

<b>Cargo</b>	<b>Tempo de empresa</b>	<b>Formação</b>
Engenheiro de produção	15 anos	Graduação em Engenharia de Produção; Especialização em gestão de pessoas.
Operador responsável pelo comando central.	28 anos	Nível técnico; Cursos de especializações em processos de laminação. Benchmarking em outras empresas do grupo.
Assistente técnico em automação	18 anos	Graduação em Engenharia elétrica; Pós em automação industrial.

Fonte: Elaborado pela autora

A escolha desses profissionais baseou-se em sua experiência na empresa, em sua formação acadêmica, bem como, no conhecimento dos produtos, processos de produção e operações da organização. Esses especialistas foram selecionados devido à contribuição que poderiam oferecer em suas respectivas áreas de atuação, para a coleta e tratamento dos dados da pesquisa (Senra et al., 2007; Piran et al., 2021).

Após a realização da escolha dos profissionais, agendou-se um momento formal para que o objetivo da pesquisa pudesse ser apresentado a todos, assim explicando os principais conceitos do modelo conceitual DEA e as principais diferenças do modelo NDEA, de maneira que pudéssemos avaliar o que ocorre além das “caixas pretas” do DEA convencional.

### **3.3.1 Definição do processo a ser analisado**

A seleção da área produtiva a ser analisada foi realizada com base na complexidade dos processos executados e na possibilidade de analisar os seus dados através de um modelo em rede. Também se levou em consideração a facilidade na obtenção dos dados para realizar o modelamento do NDEA e ainda os seus dados atuais de eficiência, avaliados através de indicador próprio da empresa, que leva em consideração os custos operacionais, custos de manutenção, demandas de mercado e consumo energético.

Com a colaboração dos especialistas da empresa, foram analisadas as diferentes operações de produção presentes no processo produtivo, a fim de identificar qual delas seria adequada para a realização da pesquisa. Para esse propósito, foi selecionada uma operação de produção específica que envolve operadores, mantenedores, uma linha de produção automática, composta por

diversos equipamentos de alta complexidade, em uma empresa do setor siderúrgico localizada no estado do Rio Grande do Sul. A operação é a laminação de vergalhões e perfis.

O processo selecionado realiza a fabricação de vergalhões e perfis, que são amplamente aplicados na construção civil e no emprego de produtos alternativos da indústria metalmeccânica. A programação de fabricação atende as demandas de mercado, a produção de matéria prima (que ocorre no processo anterior – Aciaria), bem como leva em consideração quais os setups necessários para que a produção ocorra. A Figura 15 apresenta o fluxo principal do processo estudado.

Figura 15 - Fluxo do processo



Fonte: Elaborado pela autora

Inicialmente, o PCP faz a programação dos itens a serem produzidos no mês, em seguida encaminha as ordens de produção diretamente ao comando central da laminação de vergalhões e perfis. Nesta etapa, diariamente o operador do comando central solicita a separação dos tarugos que são adicionados ao forno de aquecimento e insere a receita de operação no sistema central, de acordo com o item a ser produzido naquele momento.

Em seguida, inicia-se o processo de laminação, onde o tarugo segue através de um caminho de rolos para o laminador, cujo tarugo passa por diversos módulos de laminação, até se tenha o formato desejado, na bitola desejada, conforme ordem de produção que está em execução. Após a finalização desta etapa, o tarugo passa a ser chamado de peças e é levado até o corte final, sempre através de caminhos de rolos.

Logo após o processo de corte, as peças são transportadas até o leito de resfriamento, para que possa resfriar e posteriormente ser encaminhada para montagem de feixes, pesagem final, identificação do material e envio ao setor de armazenagem. Todo o processo é automatizado, sendo comandado pelos operadores através das salas de comando.

### **3.3.2 Definição das unidades de tomada de decisão (DMU's)**

Inicialmente, planejou-se considerar as turmas operacionais (turnos de trabalho, dividido por escalas) como DMU, visto que não é possível realizar comparações entre unidades do grupo. Porém, após discussão com os especialistas mencionados no tópico anterior, verificou-se que as discrepâncias entre turnos seriam irrelevantes diante das diferenças que podem ocorrer durante a fabricação de famílias distintas de produto.

Como exemplo, pode-se citar que uma bitola que possua maior diâmetro ou geometria mais complexa, pode gerar mais sucata e conseqüentemente um tempo maior de interrupção no processo. Da mesma maneira que uma bitola com diâmetro muito pequeno também pode ocasionar uma interrupção maior no processo, devido ao setup maior. Essa realidade faz com que os DMU's tenham variações significativas, porém que não estejam totalmente ligadas aos colaboradores que estão operando os equipamentos, mas sim às suas características de projeto.

Sendo assim, para auxiliar na escolha das DMU's, buscou-se apoio na literatura. Dentre os estudos incluídos na presente dissertação, apenas o Yang et al., (2014) utiliza famílias de produtos, ou seja, o estudo analisa quinze categorias de tapetes artesanais. Dentre os demais artigos, Roudabr et al., (2022), Barat et al., (2017), Lu et al., (2019), Wu et al., (2017) e Yang et al., (2017) utilizam como DMU cada unidade fabril a ser comparada.

Por sua vez, Chen et al., (2020) e Song et al., (2020) utilizam como DMU em seus estudos, as regiões onde determinados grupos de indústrias estão inseridas. Khoveyni et al., (2022) considera como DMU em seu estudo cadeias completas de manufatura, considerando indústrias e centros de distribuição. Por questões de sigilo do grupo estudado nesta dissertação, não é possível estudar e analisar todas as siderúrgicas do grupo.

Assim, após a análise conduzida por Yang et al. (2014) e a aprovação do grupo de especialistas, ficou estabelecido que os dados ao longo do tempo de uma família de produtos fabricados na Laminação de vergalhões e perfis serão utilizados como DMUs. A família selecionada registrou o maior volume de produção no período em questão e foi a que mais contribuiu para o faturamento da usina. Para os cálculos da rede, optou-se por considerar o trimestre, dada a possibilidade de a família de produtos não ter tido produção em determinados meses específicos. Essa escolha é justificada pela expectativa de que, a partir da análise realizada, seja viável estender o estudo para todas as outras famílias produzidas. Assim, a DMU foi considerada o lote trimestral de uma determinada família de produtos produzidos pela empresa. Na próxima seção, serão delineados os procedimentos para a definição das variáveis do modelo DEA.

### **3.3.3 Definição do período de análise**

A definição do horizonte de análise é crucial, uma vez que esta pesquisa adota uma abordagem longitudinal. Para isso, um dos primeiros passos é estabelecer o período no qual é possível obter dados confiáveis da operação a ser analisada, através dos sistemas próprios do processo, como MES EPS, SIGE e SAP, pois esses registros constituem uma fonte significativa de dados para a pesquisa.

Na empresa estudada, a programação do mix a ser produzido é realizada de forma mensal, podendo ocorrer alterações ao longo do período, caso as demandas de mercado sofram alterações importantes. Um fator que viabiliza a análise de distintas situações de produção na operação investigada reside no fato de que a empresa fabricar produtos padrão e produtos sob encomenda, onde cada pedido produzido possui configurações distintas. Isso possibilita uma ampla variedade de cenários a serem considerados na análise.

Este estudo adotará o período compreendido entre janeiro de 2019 e dezembro de 2022 para a realização da pesquisa, totalizando quatro anos de dados de produção e consumos de insumos. Durante essa fase, foi viável obter os dados necessários para a condução do estudo. A abordagem específica para a preparação da coleta de dados será apresentada em seções subsequentes deste trabalho.

### 3.3.4 Definição das variáveis do modelo DEA (inputs e outputs)

De acordo com Kassai (2002), uma das etapas mais importantes na modelagem DEA e, conseqüentemente NDEA, é a definição dos inputs e outputs. A escolha dos dados utilizados na pesquisa desempenha um papel crucial, e é necessário o auxílio de um grupo de especialistas para garantir a relevância das variáveis para a análise do processo produtivo (Jain et al., 2011). No entanto, alguns autores, como Cook et al., (2014), argumentam que o método DEA não proporciona clareza quanto à inclusão das variáveis relevantes no modelo.

Dyson et al., (2001) destacam que, ao definir um conjunto de variáveis de entrada (input) e saída (output), é fundamental seguir pressupostos fundamentais, como: i) abranger a maior variedade possível de recursos utilizados no processo em análise; ii) capturar todos os níveis de atividades e o máximo de medidas de desempenho; iii) estabelecer um conjunto comum de variáveis para todas as unidades de análise; e iv) considerar variáveis ambientais, quando necessário.

Piran et al., (2018) afirmam que é fundamental determinar um conjunto adequado de entradas e saídas, pois isso contribui significativamente para a determinação de um modelo DEA mais apropriado para a pesquisa. Devido à importância das variáveis na modelagem DEA, muitos pesquisadores tendem a definir um grande número delas para garantir maior precisão no modelo (Adler, Yazhemsky, 2010). Essa abordagem pode levar a problemas de discriminação entre as variáveis, dificultando a diferenciação entre DMUs eficientes e ineficientes, assim tendo a possibilidade de comprometer os resultados (Piran et al., 2018). Diante disto, é importante construir um modelo que leve em consideração apenas as variáveis que são relevantes para a análise proposta (Wagner; Shimshak, 2007).

O processo de escolha das variáveis foi realizado em conjunto com o grupo de especialistas citado anteriormente. O Quadro 6 apresenta as variáveis escolhidas e as suas referências.

Quadro 6 - Lista de variáveis do modelo

Variável	Referências
Tarugo de aço	Omid et al., (2015) Roudabr et al., (2022) Yang et al., (2017)
Gás natural	Yang et al., (2017)
Energia elétrica	Roudabr et al., (2022) Wu et al., (2017) Yang et al., (2017)
Água	Roudabr et al., (2022) Wu et al., (2017)
Peças quentes	Roudabr et al., (2022) Wu et al., (2017)
Produto	Omid et al., (2015) Wu et al., (2017)
Sucata (-)	Yang et al., (2017)
Perda metálica (-)	Yang et al., (2017)

Fonte: Elaborado pela autora

A matéria prima principal utilizada no processo produtivo de perfis e vergalhões é o tarugo, que é aquecido e logo após laminado para dar origem ao aço acabado e seus produtos subsequentes. Nas pesquisas incluídas, o tarugo é considerando *input* no primeiro estágio (Omid et al., 2015; Roudabr et al., 2022; Yang et al., 2017).

O gás natural é utilizado para aquecimento dos fornos e é considerado como *input* inicial no primeiro estágio (Yang et al., 2017). A energia elétrica também é considerada como um *input* importante no processo produtivo, visto que ela é utilizada em todos os estágios e, conseqüentemente em todos os subprocessos (Roudabr et al., 2022; Wu et al., 2017; Yang et al., 2017). A água também é um *input* compartilhado entre os subprocessos, sendo responsável por realizar a refrigeração dos equipamentos de instrumentação do forno, bem como responsável por refrigerar a matéria prima enquanto ela passa pelo subprocesso de laminação. (Roudabr et al., 2022; Wu et al., 2017).

Após o processo de aquecimento, um *output* gerado após o subprocesso forno são as peças aquecidas, que precisam atingir uma temperatura estabelecida em padrão interno para que possa ser laminada no processo subsequente, sendo considerada como *input* no segundo estágio (Roudabr et

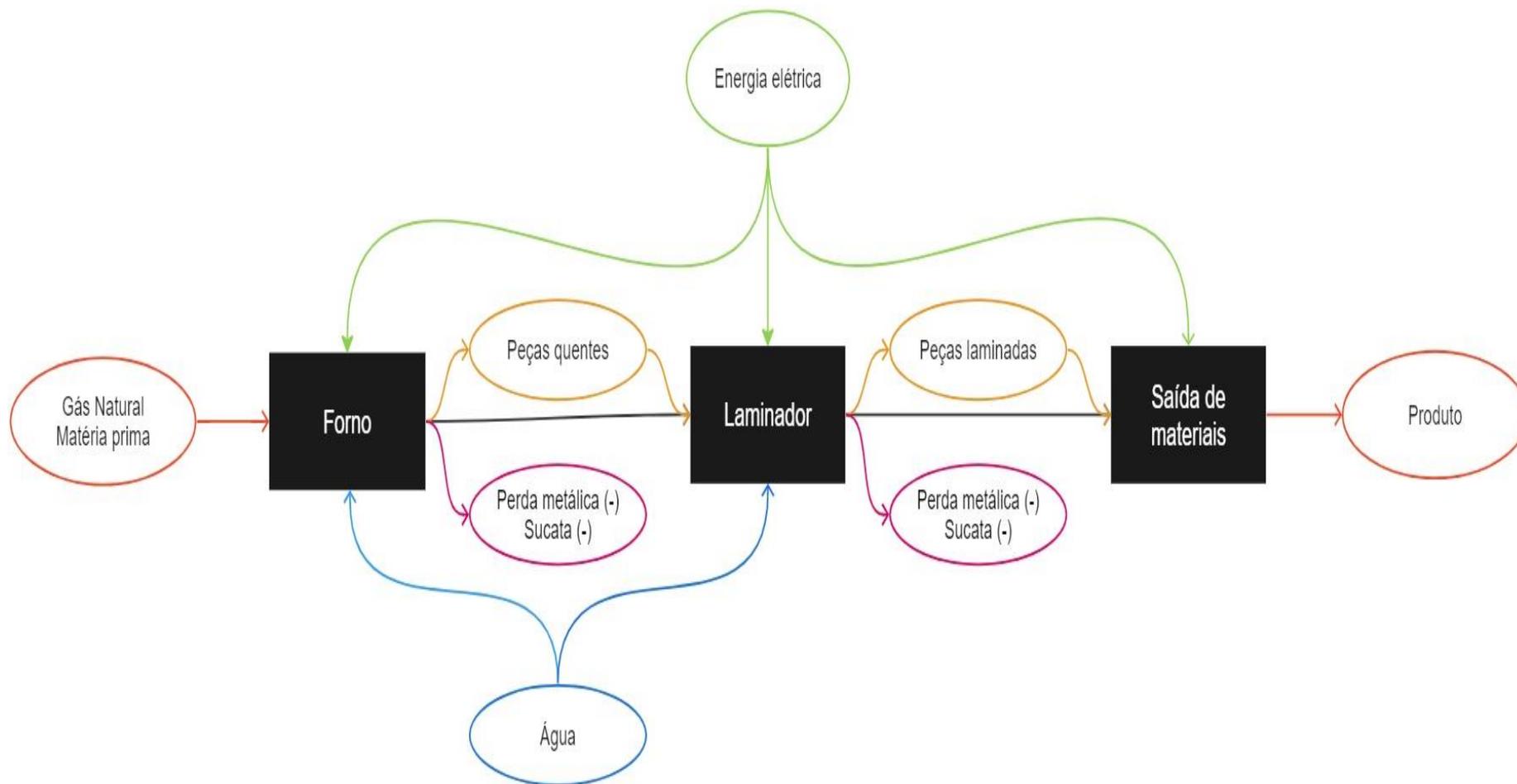
al., 2022; Wu et al., 2017). Outro *output* gerado no primeiro estágio é o tempo de interrupção operacional, onde este pode ser causado por problemas que necessitam o apoio da Manutenção ou causas operacionais (*setups*) (Khoveynl et al., 2022; Yang et al., 2017).

As variáveis foram elaboradas tendo em conta as características do processo estudado; por conseguinte, as referências de outros autores podem apenas representar as características básicas de cada variável, não necessariamente retratando a variável de forma exata como está escrita.

### **3.3.5 Definição do tipo de rede dos estágios a serem utilizados**

Diante da explicação do processo, pode-se dizer que para avaliar a eficiência dele, pode-se utilizar uma estrutura em rede. A Figura 16 apresenta a estrutura de rede proposta para a presente dissertação.

Figura 16 - Estrutura de rede



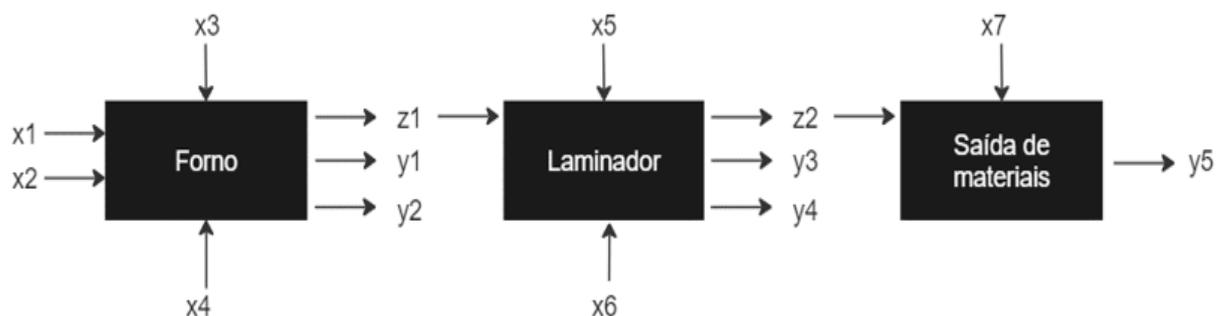
Fonte: Elaborado pela autora

A proposta de rede demonstrada pela Figura 16, apresenta os subprocessos da laminação de aço de vergalhões e perfis e seus respectivos compartilhamentos de variáveis, onde:

- Gás natural: é utilizada como *input* apenas para o Forno de Laminação, atua como fonte energética para funcionamento do subprocesso, que por sua vez é responsável por aquecer a matéria prima;
- Matéria prima: é utilizada como *input* apenas para o Forno de Laminação, onde é a base para obtenção de vergalhões e perfis;
- Energia elétrica: é utilizada como *input* no forno, laminador, resfriamento e saídas de produtos;
- Água: é utilizada como *input* no forno e no laminador, onde é responsável pelo resfriamento dos equipamentos;
- Peças quentes: é o *output* do subprocesso forno e o *input* do subprocesso laminador, onde a matéria prima será laminada e transformada em vergalhões ou perfis;
- Sucata: é considerado como output final do processo e é indesejada;
- Perda metálica: é considerado como output final do processo e é indesejada.
- Produto: é considerado como *output* final do processo,

A estrutura é caracterizada devido ao compartilhamento de variáveis, onde uma determinada variável pode servir como *input* para mais de um subprocesso. A proposta passou pelo processo de refinamento e de validação pelos especialistas de processo. A partir do modelo conceitual apresentado na Figura 16, elaborou-se a rede considerando a estrutura NDEA apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Rede NDEA



Fonte: Elaborado pela autora

A rede representada na Figura 17 exibe as variáveis de entrada, intermediárias e de saída, identificando o estágio de entrada de cada uma, assim como as variáveis que transitam de um estágio para o próximo. A descrição detalhada dessas variáveis é fornecida no quadro 7, apresentado a seguir.

Quadro 7 - Variáveis do modelo

Variável	Nome da variável	Entrada e/ou saída na rede	Tipo
x1	Gás natural	1º Estágio	<i>Input</i>
x2	Matéria prima	1º Estágio	<i>Input</i>
x3	Energia elétrica	1º Estágio	<i>Input</i>
x4	Água	1º Estágio	<i>Input</i>
x5	Energia elétrica	2º Estágio	<i>Input</i>
x6	Água	2º Estágio	<i>Input</i>
x7	Energia elétrica	3º Estágio	<i>Input</i>
z1	Peças quentes	2º Estágio	Variável intermediária
z2	Peças laminadas	3º Estágio	Variável intermediária
y1	Perda metálica	1º Estágio	<i>Ouput</i>
y2	Sucata	1º Estágio	<i>Ouput</i>
y3	Perda metálica	2º Estágio	<i>Ouput</i>
y4	Sucata	2º Estágio	<i>Ouput</i>
y5	Produto final	3º Estágio	<i>Ouput</i>

Fonte: Elaborado pela autora

### **3.3.6 Validação do modelo com os especialistas da empresa**

Depois da definição das variáveis, o modelo foi submetido novamente à avaliação dos especialistas, considerando a disponibilidade dos dados para sua composição. Ficou evidente que alguns deles poderiam ser obtidos através do sistema ERP utilizado pela empresa, outros diretamente do software de gestão de energéticos e ainda outros através do sistema de controle de produção. O item 3.4 desta dissertação apresentará um detalhamento mais aprofundado sobre a forma de coleta de cada um dos dados.

## **3.4 COLETA DE DADOS**

Nesta seção, serão expostos os procedimentos que serão adotados para a coleta dos dados a serem empregados nesta dissertação. Conforme mencionado por Miguel (2007), os dados serão obtidos por meio dos instrumentos previamente definidos no planejamento criado com o apoio da equipe de especialistas. O acesso da pesquisadora à empresa na qual o estudo de caso foi conduzido, bem como a obtenção dos dados essenciais para a pesquisa, foram devidamente autorizados pela referida empresa, em virtude de a pesquisadora estar vinculada a uma de suas unidades fabris e ter tido permissão para acessar o processo em que a pesquisa foi realizada. A empresa escolhida para o estudo está inserida no setor siderúrgico, sendo a área de interesse específica uma célula de laminação de vergalhões e perfis.

Após a definição das variáveis a serem utilizadas no modelo NDEA aplicado nesta pesquisa, em conjunto com o grupo de especialistas da empresa, foi desenvolvido um planejamento detalhado para a coleta dos dados relativos a cada variável do modelo. Esse grupo de especialistas foi composto por profissionais com sólida experiência na empresa e apresentados no Quadro 4. A colaboração desses profissionais foi essencial para obter o apoio necessário na coleta de dados para a pesquisa e aprimorar o modelo NDEA em questão.

O planejamento da coleta de dados foi realizado de forma minuciosa para cada variável, a fim de identificar a abordagem mais adequada para a coleta e a forma como os dados serão apresentados para análise. O Quadro 8

apresenta um resumo das metodologias definidas para a coleta dos dados relacionados a cada uma das variáveis do modelo e o sistema que será coletado.

Quadro 8 - Planejamento da coleta dos dados

Variável	Forma de cálculo	Sistema a ser coletado
Tarugo de aço	Soma da quantidade de toneladas utilizadas para produção de determinada família de produto.	MES EPS
Gás natural	Soma do volume de gás natural utilizado para produção de determinada família de produto.	SIGE
Energia elétrica	Soma da quantidade de energia elétrica utilizada para produção de determinada família de produto.	SIGE
Água	Soma do volume água bruta utilizada para produção de determinada família de produto.	Supervisório de Utilidades
Peças quentes	Soma da quantidade de toneladas utilizadas para produção de determinada família de produto, excluindo as possíveis sucatas e perda metálica.	MES EPS
Produto	Soma das peças boas produzidas em cada família de produto.	MES EPS
Sucata (-)	Soma, em toneladas, das peças perdidas por interrupção.	SAP
Perda metálica (-)	Soma, em toneladas, da matéria prima perdida por despontes inerentes à produção de cada família de produto.	SAP

Fonte: Elaborado pela autora

A quantidade de produção total é a soma das peças boas produzidas para família de produto, onde é definida através da ordem de programação, definida pelo PCP da empresa. Esse número pode variar de acordo com a bitola, o tamanho e a geometria das peças produzidas, onde peças com formatos geométricos complexos, exigem um tempo maior de *setup*, bem como geram uma quantidade maior de perda metálica, devido ao maior número de despontes realizados.

A sucata gerada a cada ordem de produção é oriunda do somatório, em toneladas, de peças perdidas através de necessidade de manutenção corretiva não planejada, para realização de lubrificação de equipamentos, paradas para ajustes de bitolas e paradas para realização de *setups*. Já a perda metálica ocorre devido aos cortes realizados no processo para despoje do aço laminado, esses cortes se fazem necessários devidos às deformações que o material sofre e, caso o corte não seja realizado, pode ocasionar interrupções de processo.

No caso da coleta de consumo de energia elétrica, ela é coletada do SIGE (Sistema de gestão de energéticos), porém existe um único medidor para o processo de laminação de vergalhões e perfis. Então, para que pudesse saber a quantidade de kWh consumidos em cada subprocesso, foi realizado um cálculo de potência instalada em cada subprocesso (forno, laminador, resfriamento e saídas), com o apoio do especialista e responsável pelas subestações da unidade. A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva das variáveis.

Tabela 2 - Estatística descritiva das variáveis

Tipo	Variável	Nome da variável	Estatística	Valor
<i>Input</i>	x1	Gás natural	Mínimo	42.020,60
			Máximo	85.285,79
			Média	64.267,71
			Desvio padrão	12.936,08
<i>Input</i>	x2	Matéria prima	Mínimo	419,54
			Máximo	1.908,20
			Média	1.245,78
			Desvio padrão	366,47
<i>Input</i>	x3	Energia elétrica	Mínimo	2.236,09
			Máximo	4.016,85
			Média	3.378,93
			Desvio padrão	556,16
<i>Input</i>	x4	Água	Mínimo	7.008,16
			Máximo	11.326,74
			Média	8.748,45
			Desvio padrão	1.282,34
<i>Input</i>	x5	Energia elétrica	Mínimo	97.269,97
			Máximo	174.732,94
			Média	146.983,47
			Desvio padrão	24.193,15
<i>Input</i>	x6	Água	Mínimo	13.015,15
			Máximo	21.035,37

Tipo	Variável	Nome da variável	Estatística	Valor
			Média	16.247,13
			Desvio padrão	2.381,50
Input	x7	Energia elétrica	Mínimo	12.298,50
			Máximo	22.092,67
			Média	18.584,12
			Desvio padrão	3.058,90
Variável intermediária	z1	Peças quentes	Mínimo	418,90
			Máximo	1.905,28
			Média	1.243,88
			Desvio padrão	365,91
Variável intermediária	z2	Peças laminadas	Mínimo	413,77
			Máximo	1.881,93
			Média	1.228,64
			Desvio padrão	361,43
Ouput	y1	Perda metálica	Mínimo	0,06
			Máximo	0,29
			Média	0,19
			Desvio padrão	0,06
Ouput	y2	Sucata	Mínimo	0,58
			Máximo	2,63
			Média	1,71
			Desvio padrão	0,50
Ouput	y3	Perda metálica	Mínimo	5,77
			Máximo	26,26
			Média	17,15
			Desvio padrão	5,04
Ouput	y4	Sucata	Mínimo	1,28
			Máximo	5,84
			Média	3,81
			Desvio padrão	1,12
Ouput	y5	Produto final	Mínimo	406,71
			Máximo	1.849,84
			Média	1.207,68
			Desvio padrão	355,26

Fonte: Elaborado pela autora

Para incorporar um *output* indesejável à rede, adotou-se o princípio do inverso aditivo ( $-y_{indesejável}$ ). Nesse sentido, foi identificado o maior valor observado nas variáveis indesejadas, em seguida, um valor superior foi definido como uma constante. Essa constante foi então, subtraída dos valores observados das variáveis indesejadas em todas as DMUs. Tal procedimento, amplamente difundido na literatura, oferece a vantagem de produzir resultados

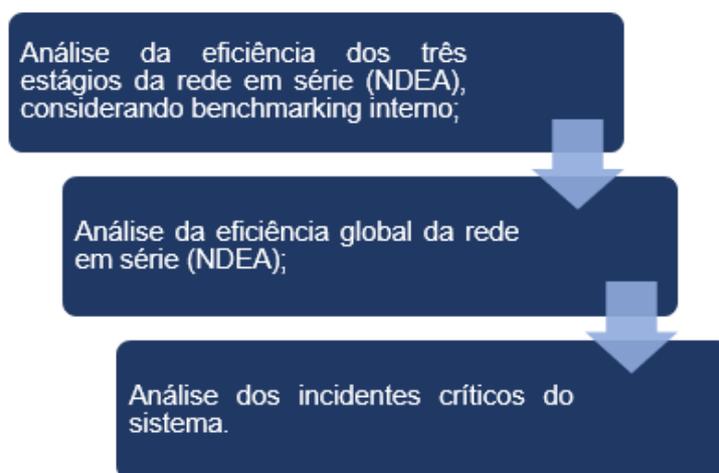
de fácil interpretação (Camanho; Zanella; Moutinho, 2023). Por fim, devido a diferença de escala entre variáveis, os dados foram normalizados, conforme sugerido por Sarkis (2007). Na seção 3.5 são apresentados os procedimentos para realização da análise dos dados.

### 3.5 ANÁLISE DOS DADOS

O objetivo primordial de uma análise de dados é a organização das informações, visando proporcionar respostas lógicas aos problemas apresentados na pesquisa (Gil, 2002). Conforme destacado por Teixeira (2003), a análise dos dados logo após a coleta é de extrema importância para que os pesquisadores possam compreendê-los adequadamente. Esse processo de análise compreende o exame, categorização, tabulação e verificação das evidências, levando em consideração as proposições iniciais do estudo (Yin, 2005).

No âmbito desta pesquisa, todos os dados coletados foram inseridos em planilhas eletrônicas e posteriormente organizados para representar os resultados obtidos durante a pesquisa. Após a organização inicial, será utilizado o aplicativo Excel, para apoiar na realização dos cálculos de eficiência para cada DMU do modelo NDEA. Os procedimentos planejados para realização da análise dos dados são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Procedimento para análise dos dados



Fonte: Elaborada pela autora

A partir dos dados obtidos através do cálculo da eficiência utilizando o modelo NDEA, considerando *benchmarking* interno, serão realizadas análises das DMUs que obtiverem os melhores resultados de eficiência, bem como aquelas que obtiverem os menores resultados, em cada estágio do processo. Também será realizada uma análise da eficiência global, a fim de avaliar as discrepâncias entre as eficiências e, ainda sugerir melhorias e/ou trabalhos futuros.

Por meio da análise do *benchmarking* interno, proporcionada pelo cálculo NDEA, esperasse que seja possível determinar os níveis de utilização dos recursos que resultarão em uma operação mais eficiente. Essas informações serão fundamentais para apoiar na identificação dos pontos em que a operação poderia ser ajustada a fim de alcançar níveis de eficiência melhores. As análises dos resultados obtidos com na presente pesquisa serão minuciosamente detalhadas na seção quatro deste trabalho, enquanto a seção cinco abordará a discussão desses resultados.

Incidentes críticos são eventos considerados significativos pelos participantes do processo (neste caso, o grupo de especialistas mencionado anteriormente), identificados por meio da análise de dados e classificados de forma indutiva (Niska, Hynynen, & Vesala, 2011; Kostano et al., 2019). No presente estudo, serão considerados incidentes críticos internos, todos os eventos referentes a ações relacionadas à gestão, sejam planejadas ou não, que influenciaram a eficiência do setor.

## 4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

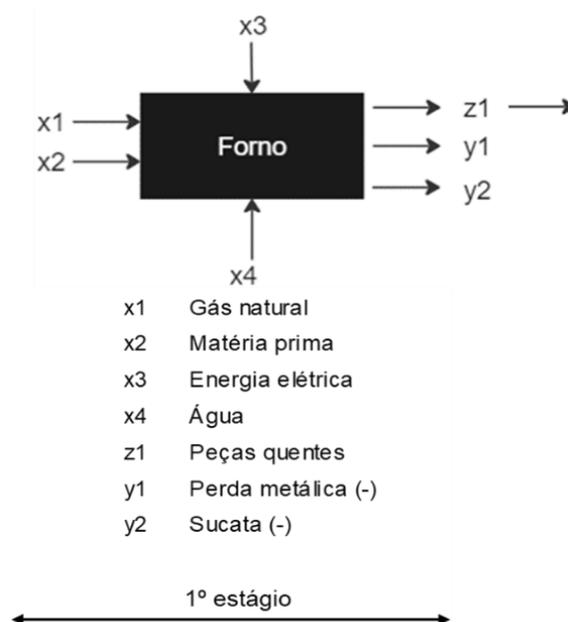
Neste capítulo, os resultados de eficiência são expostos, os quais foram obtidos após a coleta e processamento dos dados. Isso inclui a análise das eficiências individuais de cada estágio do modelo, assim como a eficiência global da rede.

Os resultados abrangem um período contínuo de quatro anos, abrangendo o intervalo de janeiro de 2019 a dezembro de 2022. Esse período compreende um total de 48 meses, onde foram analisados os trimestres, permitindo, assim, a consideração de 16 Unidades de Decisão (DMUs). Neste capítulo, também é conduzida uma comparação entre as eficiências dos estágios e a eficiência global da rede. Além disso, é realizada uma análise dos incidentes críticos para ajudar a explicar as discrepâncias nos escores de eficiência.

### 4.1 ANÁLISES DA EFICIÊNCIA DE CADA ESTÁGIO DO PROCESSO (REDE)

Inicialmente foi avaliada a eficiência de cada estágio do processo (rede). O processo de laminação de vergalhões e perfis está dividido em três estágios, sendo o primeiro relacionado à eficiência do forno de reaquecimento de tarugos. Este estágio consta com quatro *inputs*, uma variável intermediária e dois *outputs*, conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 - Primeiro estágio da rede



Fonte: Elaborado pela autora

Os escores de eficiência referentes ao primeiro estágio da rede estão apresentados na Tabela 3. Utilizando o modelo empregado, foram calculadas as eficiências para as Unidades de Decisão (DMUs) da rede, onde a eficiência média alcançada foi de 79,05%, com uma eficiência mínima de 68,05% e um desvio padrão de 0,0784.

Tabela 3 - Eficiências do primeiro estágio

Referência	DMU	Eficiência Estágio 1	% Eficiência
1ºTRI 2019	DMU 01	0,8289	82,89%
2ºTRI 2019	DMU 02	0,8813	88,13%
3ºTRI 2019	DMU 03	0,7935	79,35%
4ºTRI 2019	DMU 04	0,8093	80,93%
1ºTRI 2020	DMU 05	0,8823	88,23%
2ºTRI 2020	DMU 06	1,0000	100,00%
3ºTRI 2020	DMU 07	0,7916	79,16%
4ºTRI 2020	DMU 08	0,7422	74,22%
1ºTRI 2021	DMU 09	0,7620	76,20%
2ºTRI 2021	DMU 10	0,7479	74,79%
3ºTRI 2021	DMU 11	0,6805	68,05%
4ºTRI 2021	DMU 12	0,7362	73,62%
1ºTRI 2022	DMU 13	0,7774	77,74%

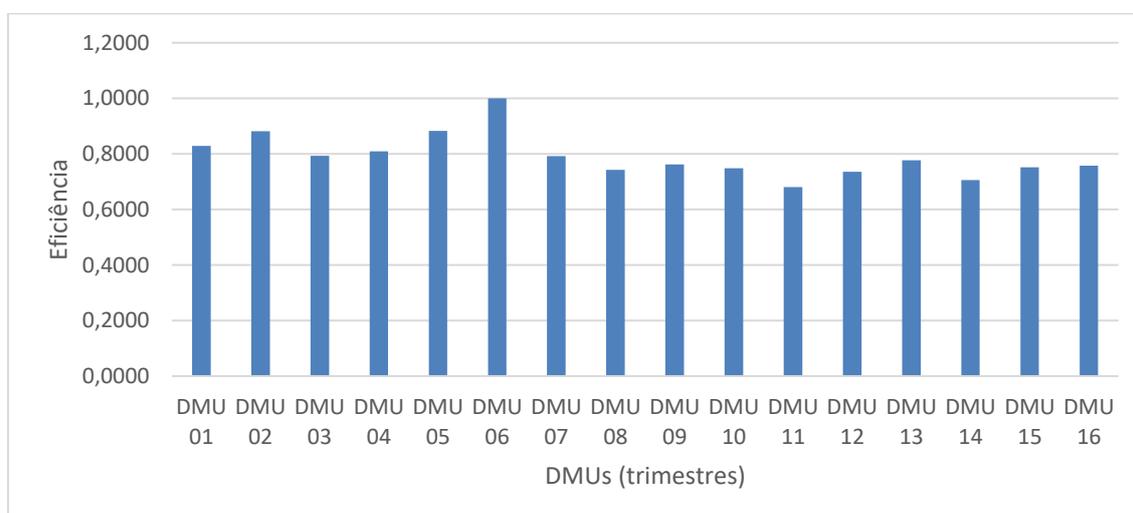
Referência	DMU	Eficiência Estágio 1	% Eficiência
2ºTRI 2022	DMU 14	0,7062	70,62%
3ºTRI 2022	DMU 15	0,7514	75,14%
4ºTRI 2022	DMU 16	0,7574	75,74%
	Média	0,7905	79,05%
	Desvio padrão	0,0784	-
	Mínimo	0,6805	68,05%
	Máximo	1,0000	100%

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar a Tabela 3, destaca-se que a DMU 06 (2º trimestre de 2020) demonstra o melhor desempenho de eficiência. Esta DMU se destacou ao longo de todo o período estudado, correspondendo a um período de histórico volume de produção na usina em análise.

Quanto às DMUs 11 (3º trimestre de 2021), 14 (2º trimestre de 2022) e 12 (4º trimestre de 2021), estas apresentaram os piores desempenhos durante o período examinado. Ao analisar os dados coletados, observa-se uma redução significativa nos volumes de produção (variável  $y_5$ ) nessas DMUs com menor eficiência. Para facilitar a compreensão das eficiências, os dados relativos à eficiência do primeiro estágio da rede foram representados graficamente (Gráfico 1), conforme apresentado na Tabela 8. Essa representação visual permite visualizar o padrão dos escores de eficiência ao longo do tempo.

Gráfico 1 - Eficiências do primeiro estágio



Fonte: Elaborado pela autora

Com o propósito de realizar uma investigação mais detalhada, foi conduzida uma análise das médias das eficiências do primeiro estágio, por trimestre, resultando na elaboração da Tabela 4. Os resultados apontam para uma variação das médias entre os trimestres, sendo que a média mais baixa está vinculada aos períodos correspondentes ao terceiro trimestre de cada ano, com média de 75,43%.

Tabela 4 - Eficiência média trimestral - 1ºE

<b>Trimestre</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
1º trimestres	0,8126	81,26%
2º trimestres	0,8339	83,39%
3º trimestres	0,7543	75,43%
4º trimestres	0,7613	76,13%

Fonte: Dados da pesquisa

Também foi computada a média das eficiências anuais, resultando na confecção da Tabela 5. Os resultados demonstram que a média varia entre os anos analisados, com a média mais baixa registrada em 2021 (73,17%) e a melhor média observada em 2020 (85,40%).

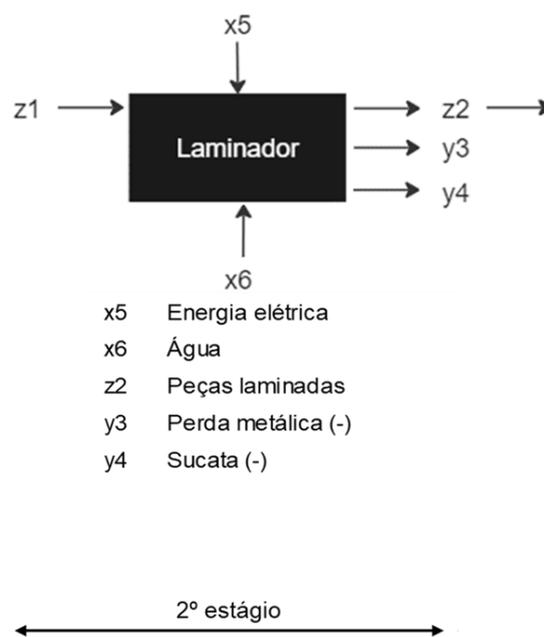
Tabela 5 - Eficiência média anual- 1ºE

<b>Ano</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
2019	0,8282	82,82%
2020	0,8540	85,40%
2021	0,7317	73,17%
2022	0,7481	74,81%

Fonte: Dados da pesquisa

Dando seguimento à análise, o processo de laminação de vergalhões e perfis está dividido em três estágios, sendo o segundo estágio relacionado à eficiência do laminador. Este estágio conta com dois *inputs*, duas variáveis intermediária, onde Z1 é *output* do primeiro estágio e *input* do segundo estágio. A rede ainda conta com dois *outputs*, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Segundo estágio da rede



Fonte: Elaborado pela autora

Os escores de eficiência referentes ao segundo estágio da rede estão informados na Tabela 6. Utilizando o modelo empregado, foram calculadas as eficiências para as DMUs da rede, onde a eficiência média alcançada foi de 75,30%, com uma eficiência mínima de 47,80% e um desvio padrão de 0,1517.

Tabela 6 - Eficiências do segundo estágio

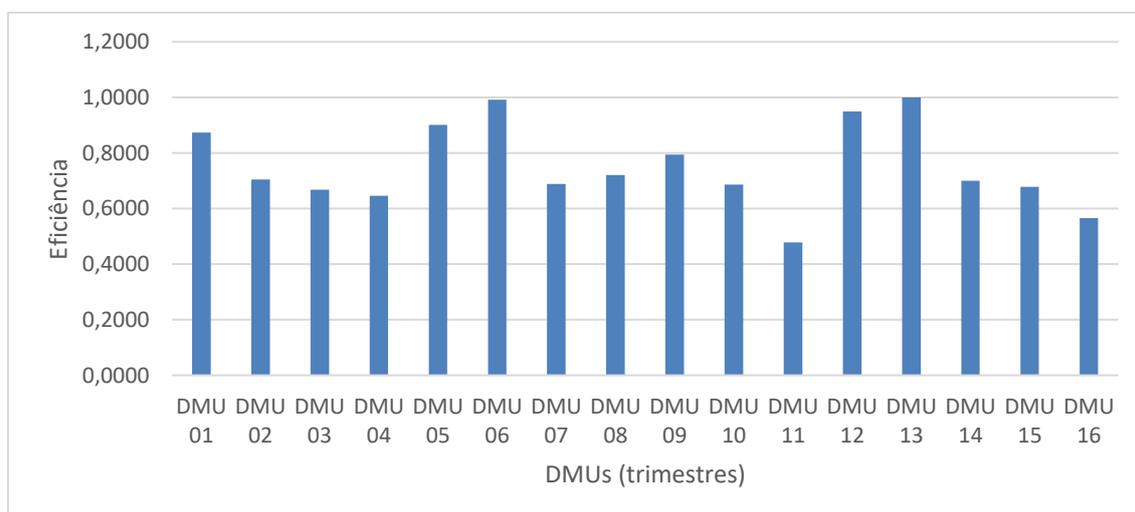
Referência	DMU	Eficiência Estágio 2	% Eficiência
1ºTRI 2019	DMU 01	0,8736	87,36%
2ºTRI 2019	DMU 02	0,7048	70,48%
3ºTRI 2019	DMU 03	0,6677	66,77%
4ºTRI 2019	DMU 04	0,6461	64,61%
1ºTRI 2020	DMU 05	0,9016	90,16%
2ºTRI 2020	DMU 06	0,9923	99,23%
3ºTRI 2020	DMU 07	0,6884	68,84%
4ºTRI 2020	DMU 08	0,7203	72,03%
1ºTRI 2021	DMU 09	0,7941	79,41%
2ºTRI 2021	DMU 10	0,6867	68,67%
3ºTRI 2021	DMU 11	0,4780	47,80%
4ºTRI 2021	DMU 12	0,9497	94,97%
1ºTRI 2022	DMU 13	1,0000	100,00%
2ºTRI 2022	DMU 14	0,7006	70,06%
3ºTRI 2022	DMU 15	0,6783	67,83%

Referência	DMU	Eficiência Estágio 2	% Eficiência
4ºTRI 2022	DMU 16	0,5657	56,57%
	Média	0,7530	75,30%
	Desvio padrão	0,1517	-
	Mínimo	0,4780	47,80%
	Máximo	1,0000	100%

Fonte: Dados da pesquisa

Ao examinar a Tabela 6, destaca-se que a DMU 13 (1º trimestre de 2022) evidencia o mais alto desempenho de eficiência nesta etapa. No que concerne às DMUs 11 (3º trimestre de 2021) e 16 (4º trimestre de 2022), estas demonstraram os piores desempenhos durante o período analisado. Uma análise dos dados coletados revela uma redução significativa nos volumes de produção (variável  $y_5$ ) nessas DMUs menos eficientes. Com o intuito de facilitar a compreensão das eficiências, os dados referentes à eficiência do segundo estágio da rede foram representados graficamente (Gráfico 2), conforme delineado na Tabela 6. Essa representação visual possibilita a observação do padrão dos escores de eficiência ao longo do tempo.

Gráfico 2 - Eficiências do segundo estágio



Fonte: Elaborado pela autora

Com o intuito de realizar uma investigação mais aprofundada, procedeu-se à análise das médias das eficiências do segundo estágio, por trimestre, culminando na elaboração da Tabela 7. Os resultados indicam uma variação nas

médias ao longo dos trimestres, sendo que a média mais baixa está associada aos períodos correspondentes ao terceiro trimestre de cada ano, com uma média de 62,81%.

Tabela 7 - Eficiência média trimestral - 2ºE

<b>Trimestre</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
1º trimestres	0,8923	89,23%
2º trimestres	0,7711	77,11%
3º trimestres	0,6281	62,81%
4º trimestres	0,7204	72,04%

Fonte: Dados da pesquisa

Adicionalmente, foram calculadas as médias das eficiências anuais, o que culminou na elaboração da Tabela 8. Os resultados evidenciam uma variação nas médias ao longo dos anos investigados, destacando-se uma média inferior registrada em 2019 (72,30%) e a mais elevada observada em 2020 (82,57%).

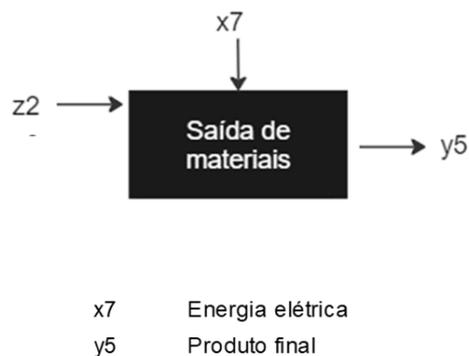
Tabela 8 - Eficiência média anual- 2ºE

<b>Ano</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
2019	0,7230	72,30%
2020	0,8257	82,57%
2021	0,7271	72,71%
2022	0,7361	73,61%

Fonte: Dados da pesquisa

Prosseguindo com a análise, o processo de laminação de vergalhões e perfis é subdividido em três estágios, sendo o terceiro estágio especificamente associado à eficiência da saída de materiais. Nesta etapa, um input é empregado juntamente com uma variável intermediária, onde *Z2* representa o *output* do segundo estágio e, simultaneamente, o input do terceiro estágio. Além disso, a rede também possui um *output*, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Terceiro estágio da rede



← 3º estágio →

Fonte: Elaborado pela autora

Os escores de eficiência correspondentes ao terceiro estágio da rede foram documentados na Tabela 9. Por meio do modelo adotado, as eficiências foram calculadas para as DMUs da rede, resultando em uma eficiência média de 68,36%. A eficiência mínima registrada foi de 47,02%, enquanto o desvio padrão foi de 0,1775.

Tabela 9 - Eficiências do terceiro estágio

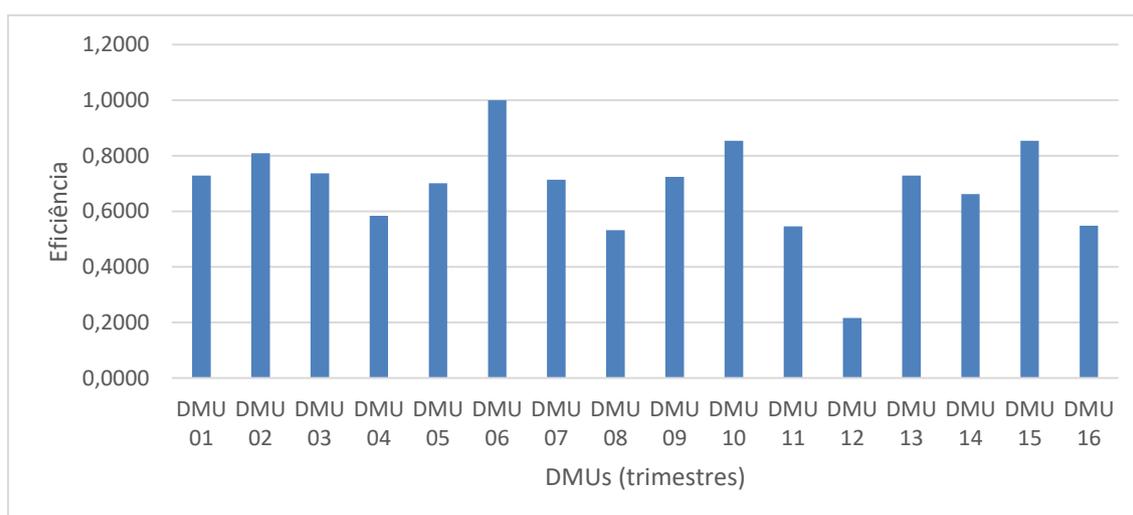
Referência	DMU	Eficiência Estágio 3	% Eficiência
1ºTRI 2019	DMU 01	0,7289	72,89%
2ºTRI 2019	DMU 02	0,8085	80,85%
3ºTRI 2019	DMU 03	0,7364	73,64%
4ºTRI 2019	DMU 04	0,5839	58,39%
1ºTRI 2020	DMU 05	0,7010	70,10%
2ºTRI 2020	DMU 06	1,0000	100,00%
3ºTRI 2020	DMU 07	0,7136	71,36%
4ºTRI 2020	DMU 08	0,5320	53,20%
1ºTRI 2021	DMU 09	0,7237	72,37%
2ºTRI 2021	DMU 10	0,8543	85,43%
3ºTRI 2021	DMU 11	0,5462	54,62%
4ºTRI 2021	DMU 12	0,2163	21,63%
1ºTRI 2022	DMU 13	0,7281	72,81%

Referência	DMU	Eficiência Estágio 3	% Eficiência
2ºTRI 2022	DMU 14	0,6620	66,20%
3ºTRI 2022	DMU 15	0,8539	85,39%
4ºTRI 2022	DMU 16	0,5485	54,85%
	Média	0,6836	68,36%
	Desvio padrão	0,1775	-
	Mínimo	0,2163	21,63%
	Máximo	1,0000	100%

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar a Tabela 9, destaca-se que a DMU 06 (2º trimestre de 2020) exibe o mais elevado desempenho de eficiência nesta etapa. No que diz respeito à DMU 12 (4º trimestre de 2021), esta demonstra o pior desempenho durante o período examinado. Uma análise dos dados coletados revela uma redução significativa nos volumes de produção (variável  $y_5$ ) nessas DMUs menos eficientes. Com o objetivo de facilitar a compreensão das eficiências, os dados relativos à eficiência do terceiro estágio da rede foram representados graficamente (Gráfico 3), conforme delineado na Tabela 9. Essa representação visual possibilita a observação do padrão dos escores de eficiência ao longo do tempo.

Gráfico 3 - Eficiências do terceiro estágio



Fonte: Elaborado pela autora

Com o intuito de realizar uma investigação mais minuciosa, procedeu-se à análise das médias das eficiências do terceiro estágio, por trimestre, culminando na elaboração da Tabela 10. Os resultados indicam uma variação nas médias entre os trimestres, destacando-se que a média mais baixa está associada aos períodos correspondentes ao quarto trimestre de cada ano, com uma média de 47,02%.

Tabela 10 - Eficiência média trimestral - 3ºE

<b>Trimestre</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
1º trimestres	0,7204	72,04%
2º trimestres	0,8312	83,12%
3º trimestres	0,7125	71,25%
4º trimestres	0,4702	47,02%

Fonte: Dados da pesquisa

Também foi computada a média das eficiências anuais, resultando na confecção da Tabela 11. Os resultados demonstram que a média varia entre os anos analisados, com a média mais baixa registrada em 2021 (58,51%) e a melhor média observada em 2020 (73,67%).

Tabela 11 - Eficiência média anual- 3ºE

<b>Ano</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
2019	0,7144	71,44%
2020	0,7367	73,67%
2021	0,5851	58,51%
2022	0,6981	69,81%

Fonte: Dados da pesquisa

#### 4.2 ANÁLISES DA EFICIÊNCIA GLOBAL DO SISTEMA

A Figura 22 apresenta a rede estabelecida para analisar o processo de laminação de vergalhões e perfis. A rede inclui catorze variáveis, organizadas em três estágios, e é utilizada para examinar os dados de dezesseis DMUs.



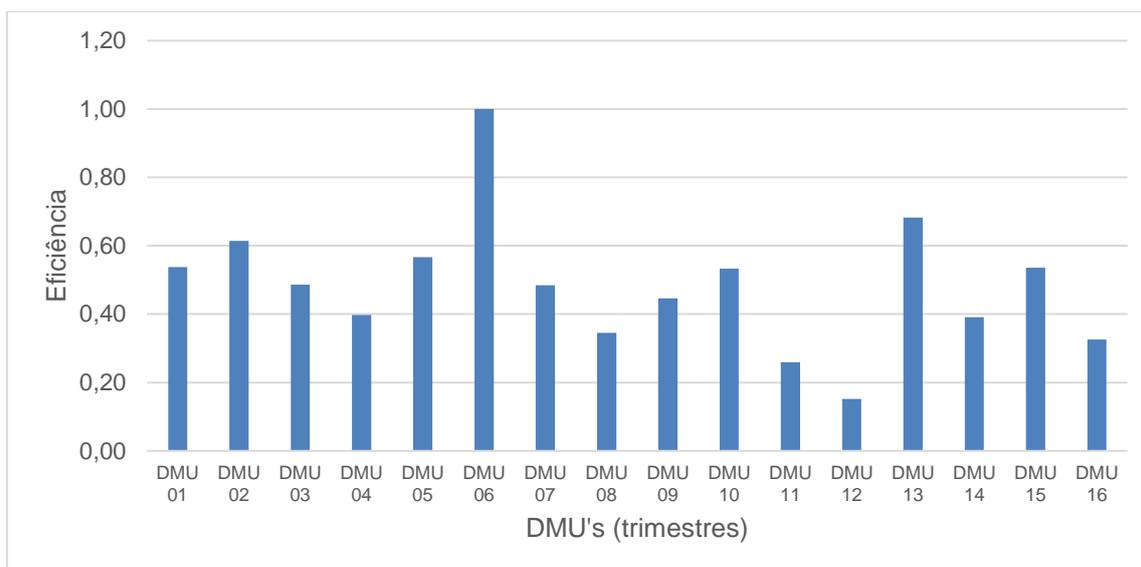
Referência	DMU	Eficiência Global	Eficiência Estágio 1	Eficiência Estágio 2	Eficiência Estágio 3
4ºTRI 2020	DMU 08	<b>28,44%</b>	74,22%	72,03%	53,20%
1ºTRI 2021	DMU 09	<b>43,79%</b>	76,20%	79,41%	72,37%
2ºTRI 2021	DMU 10	<b>43,88%</b>	74,79%	68,67%	85,43%
3ºTRI 2021	DMU 11	<b>17,77%</b>	68,05%	47,80%	54,62%
4ºTRI 2021	DMU 12	<b>15,12%</b>	73,62%	94,97%	21,63%
1ºTRI 2022	DMU 13	<b>56,61%</b>	77,74%	100,00%	72,81%
2ºTRI 2022	DMU 14	<b>32,76%</b>	70,62%	70,06%	66,20%
3ºTRI 2022	DMU 15	<b>43,52%</b>	75,14%	67,83%	85,39%
4ºTRI 2022	DMU 16	<b>23,50%</b>	75,74%	56,57%	54,85%
	Média	<b>41,99%</b>	79,05%	75,30%	68,36%
	Desvio padrão	<b>0,1990</b>	0,0784	0,1517	0,1775
	Mínimo	<b>15,12%</b>	68,05%	47,80%	21,63%
	Máximo	<b>99,23%</b>	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: Dados da pesquisa

Ao examinar a Tabela 12, é importante ressaltar que quanto mais elevado for o desempenho da Unidade de Decisão (DMU), maior será o escore da eficiência global calculado na Análise Envoltória de Dados em Rede (NDEA). Observa-se que a DMU 06 (2º trimestre de 2020) apresenta o melhor desempenho de eficiência. Notavelmente, essa DMU alcançou o desempenho mais significativo ao longo de todo o período analisado, correspondendo a um período de histórico volume de produção na usina objeto de estudo.

Quanto às DMUs 12 (4º trimestre de 2021), 11 (3º trimestre de 2021), 16 (4º trimestre de 2022) e 8 (4º trimestre de 2020), estas demonstraram os piores desempenhos durante o período analisado. Ao examinar os dados coletados, nota-se que nessas DMUs (8, 12 e 16), houve uma redução significativa nos volumes de produção (variável  $y_5$ ), causada pelas paradas habituais para manutenções corretivas e preventivas em todos os equipamentos. Já na DMU 11, a diminuição nos volumes de produção (variável  $y_5$ ), foi resultado de um alto nível de estoque durante o período. Para apoiar na compreensão das eficiências, buscou-se representar graficamente (Gráfico 4) os dados relativos à eficiência global da rede (conforme apresentado na Tabela 12). Essa representação visual permite observar o padrão dos escores de eficiência ao longo do tempo.

Gráfico 4 - Eficiência global



Fonte: Elaborado pela autora

Ao examinar o Gráfico 4, observa-se que o período apresenta grandes oscilações em seus escores de eficiência. Essas variações podem ser atribuídas a diversos fatores comuns na indústria produtiva, como flutuações de mercado, influências externas e ajustes nos processos. Essa situação destaca a importância de uma análise minuciosa para determinar as causas específicas das variações observadas (que serão abordadas na seção 4.3), além de fornecer insights à alta gerência para desenvolver estratégias adequadas.

Tabela 13 - Média das eficiências trimestrais

Trimestre	Média das eficiências	% Eficiências
1º trimestres	0,5223	52,23%
2º trimestres	0,5652	56,52%
3º trimestres	0,3480	34,80%
4º trimestres	0,2440	24,40%

Fonte: Dados da pesquisa

Para analisar a média das eficiências por trimestre, elaborou-se a Tabela 14. Os resultados indicam que a média varia entre os trimestres, sendo que a média mais baixa está associada aos períodos correspondentes ao quarto trimestre de cada ano, resultando em uma eficiência média de 24,40%.

Tabela 14 - Eficiência global média anual

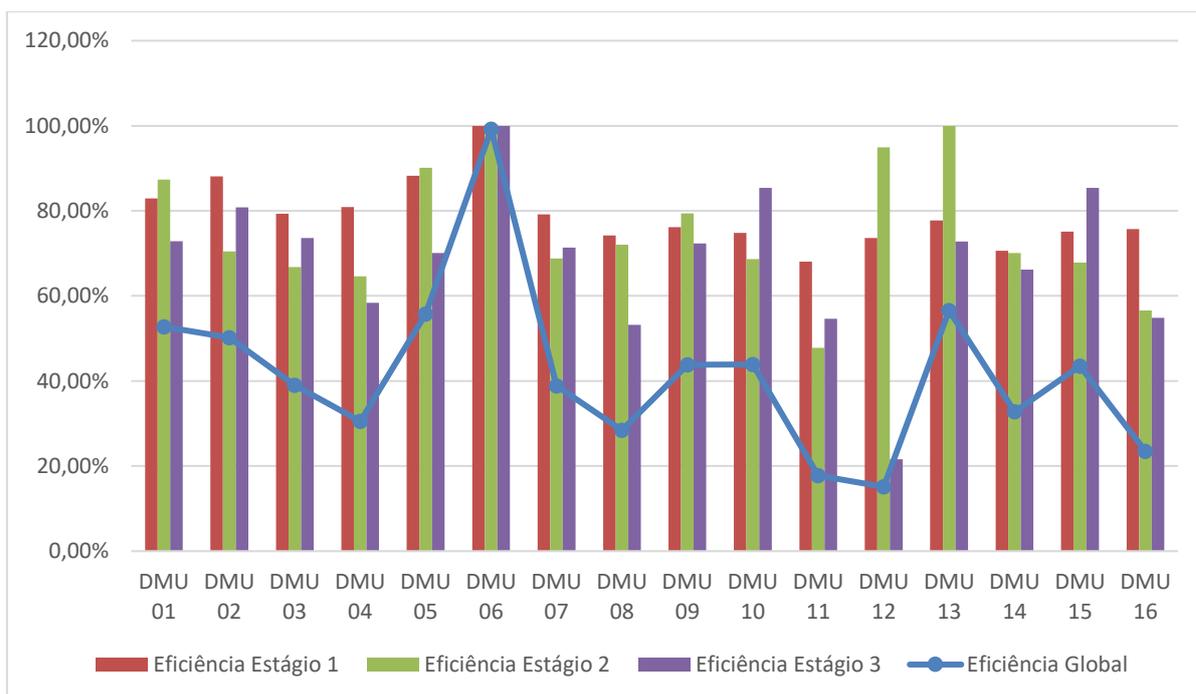
<b>Ano</b>	<b>Média das eficiências</b>	<b>% Eficiências</b>
2019	0,4313	43,13%
2020	0,5558	55,58%
2021	0,3014	30,14%
2022	0,3910	39,10%

Fonte: Dados da pesquisa

Para auxiliar nas análises, também foi calculada a média das eficiências anuais, resultando na elaboração da Tabela 14. Os resultados revelam que a média varia entre os anos analisados, com a média mais baixa registrada em 2021 (30,14%) e a melhor média observada em 2020 (55,58%).

A compreensão da contribuição de cada estágio para a eficiência global é de suma importância, pois permite identificar onde estão os principais pontos de melhoria ou gargalos no processo. Isso possibilita direcionar os esforços e recursos de forma mais eficaz, concentrando-os nos estágios que têm o maior impacto na eficiência geral do sistema. Dessa forma, entender qual estágio contribui mais com a eficiência global ajuda a otimizar o desempenho do processo como um todo, aumentando a produtividade, reduzindo custos e melhorando a qualidade dos resultados. O Gráfico 5 reforça a compreensão de como a eficiência de cada estágio pode influenciar a eficiência global.

Gráfico 5 – Análise integrada das eficiências



Fonte: Elaborado pela autora

Das dezesseis DMUs avaliadas, observa-se que em 56,25% delas a eficiência do terceiro estágio apresenta uma contribuição negativa para a eficiência global, indicando a necessidade de atenção na saída de materiais do laminador. Por outro lado, o segundo estágio contribui negativamente em 43,75% das DMUs.

Na Tabela 7, os pesos designados como  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$ ,  $v_5$ ,  $v_6$  e  $v_7$  correspondem às variáveis de entrada  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  e  $x_7$ , respectivamente. Enquanto isso, os pesos identificados como  $w_1$  e  $w_2$  são atribuídos às variáveis  $Z_1$  e  $Z_2$ , e os pesos  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$  e  $u_5$  referem-se às variáveis  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$ ,  $y_5$ , respectivamente. Ao calcular os pesos, notou-se valores na ordem de  $10^{-2}$  para as médias, com maiores pesos atribuídos às variáveis  $z_2$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  e  $x_7$ ,  $z_1$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  e  $y_3$ . Adicionalmente, não foram encontrados pesos zerados. A presença de pesos zerados pode indicar um impacto reduzido da variável no modelo. Em outras palavras, a remoção de uma variável com peso zero não teria um efeito significativo nas eficiências calculadas.

### 4.3 ANÁLISES DOS INCIDENTES CRÍTICOS DO SISTEMA

A utilização da técnica de incidentes críticos, aliada benchmarking interno, demonstra um grande potencial na análise dos efeitos de ações gerenciais ou intervenções realizadas ao longo do período (Piran et al., 2023). Os incidentes críticos podem ser categorizados como externos (ICE) e internos (ICI). Os incidentes externos (ICE) referem-se a eventos não controláveis que impactam nos resultados do sistema, enquanto os incidentes internos (ICI) são eventos ou ações controláveis realizadas pela gerência do sistema com o intuito de aprimorar a eficiência (Piran, Lacerda, Camanho & Silva, 2021).

Com base na análise das eficiências globais do sistema previamente apresentadas, procedeu-se à identificação e análise dos incidentes críticos. Após o levantamento dos ICs, espera-se obter: i) o histórico da eficiência global antes do evento, ii) a ocorrência do incidente e iii) os efeitos do incidente na eficiência da (Kostano et al., 2019). No próximo subtópico, os incidentes serão identificados.

#### 4.3.1 Identificação e análise dos Incidentes Críticos

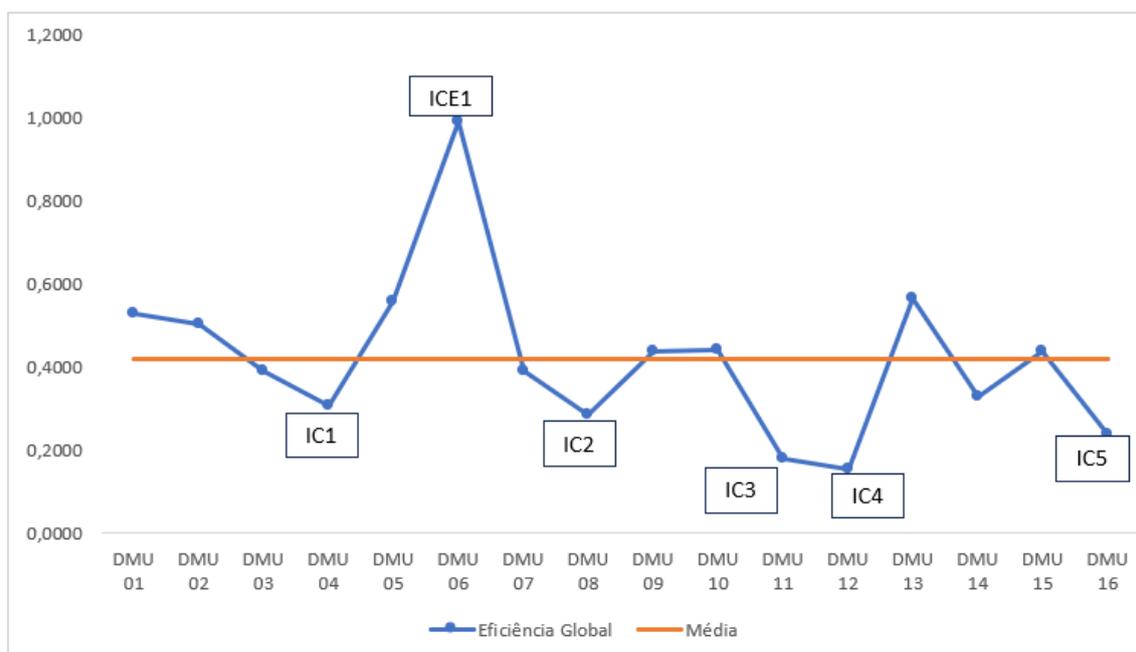
A avaliação dos incidentes críticos nos escores de eficiência global dos sistemas é uma prática importante, pois permite a identificação imediata de áreas problemáticas, como falhas em equipamentos, interrupções (sejam elas por fatores operacionais ou de manutenção) e erros humanos. Além disso, é fundamental compreender quais incidentes têm maior impacto na eficiência global para priorizar ações corretivas com base em sua urgência e potencial de impacto.

Esta abordagem não apenas possibilita melhorias contínuas no desempenho do sistema ou processo, aumentando sua eficiência e produtividade ao longo do tempo, mas também fortalece a competitividade e a sustentabilidade da organização. A identificação proativa das causas raiz dos incidentes críticos é essencial para prevenir futuros problemas

Com o propósito de identificar com precisão os eventos relevantes para a eficiência da laminação de vergalhões e perfis, o Gráfico 5 foi analisado em conjunto com o grupo de especialistas. Primeiramente, buscou-se validar o

comportamento da eficiência e, posteriormente, definir os incidentes. No total, foram identificados cinco incidentes críticos internos e um incidente crítico externo, conforme apresentado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Identificação incidentes críticos



Fonte: Elaborado pela autora

O Gráfico 6 apresenta os incidentes críticos identificados no gráfico da eficiência global, sendo que o incidente crítico externo ocorre na DMU 06 e os incidentes críticos internos estão alocados nas DMUs 04, 08, 11, 12 e 16.

Depois de realizar a identificação dos eventos que tiveram influência nos resultados de eficiência global, em colaboração com o grupo de especialistas e utilizando dados da empresa (como diários de bordo, e-mails de programação, relatórios de interrupção, entre outros), foi realizado o levantamento do histórico da eficiência do momento anterior ao evento, bem como a descrição e o impacto de cada evento. As informações foram então organizadas conforme mostrado no Quadro 9.

Quadro 9 - Resumo incidentes críticos

Incidente crítico	DMU	Trimestre	Histórico	Descrição do incidente crítico	Efeito da eficiência global
IC 1	DMU 04	4º TRI 2019	Parada de manutenção para intervenção em equipamento. Média de eficiência no período anterior: 47,34%	Parada de manutenção no período de 02 a 30 de dezembro. Não teve volume de produção.	Queda de aproximadamente 20% de eficiência no período.
IC 2	DMU 08	4º TRI 2020	Parada de manutenção no período. Média de eficiência no período anterior: 64,63%.	Parada de manutenção no período de 01 a 20 de dezembro. A volta da parada foi complicada, ocasionando muitas interrupções no processo.	Queda de aproximadamente 45% de eficiência no período.
IC 3	DMU 11	3º TRI 2021	Interrupção de manutenção por cinco dias. Média de eficiência no período anterior: 43,88%.	Parada do laminador (2º estágio) por 120 horas. Perda de mais de 20 toneladas de peças. Volume de produção entregue com 400 toneladas a menos que o programado	Queda de aproximadamente 25% de eficiência.
IC 4	DMU 12	4º TRI 2021	Interrupção de manutenção por quatro dias. Média de eficiência no período anterior: 17,77%.	Parada calha de refrigeração (3º estágio) por 96 horas.	Queda de aproximadamente 5% de eficiência.
IC 5	DMU 16	4º TRI 2022	Parada de manutenção para intervenção em equipamento. Média de eficiência no período anterior: 44,29%	Parada de manutenção no período de 01 a 29 de dezembro. Não teve volume de produção.	Queda de aproximadamente 18% de eficiência no período.
ICE 1	DMU 06	2º TRI 2020	Logo após o início da pandemia, a usina produziu valores históricos, visto que o mercado estava desabastecido devido à parada de toda indústria	Logo após o início da pandemia, a usina produziu valores históricos, visto que o mercado estava desabastecido devido à parada de toda indústria	Eficiência aumentou em 50% (considerando a média dos trimestres anteriores). O volume de produção foi 48% maior do que a média dos últimos cinco trimestres

Fonte: Elaborado pela autora

As paradas de manutenção são essenciais para garantir a operacionalidade, segurança e eficiência dos equipamentos e instalações industriais. Essas interrupções planejadas permitem realizar inspeções, reparos, substituições e ajustes necessários para prevenir falhas inesperadas, aumentar a vida útil dos equipamentos e garantir sua operação dentro dos padrões de segurança estabelecidos. Além disso, proporcionam oportunidades para implementar melhorias nos processos produtivos, incorporar novas tecnologias, realizar atualizações e otimizar o desempenho dos equipamentos, contribuindo para aumentar a produtividade, reduzir custos operacionais e minimizar o impacto de paradas não planejadas na produção.

Em resumo, as paradas de manutenção também desempenham um papel importante na conformidade com regulamentações ambientais e de segurança, garantindo a conformidade dos equipamentos com as normas estabelecidas. Tradicionalmente as paradas de manutenção, na usina objeto de estudo, ocorrem no último trimestre do ano, normalmente em dezembro, fato este que ocorre no IC1, IC2 e IC5. Nos ICs 1 e 5 ocorre uma parada de manutenção de 30 dias, onde não há produção de material. Já no IC2, ocorreu uma parada de manutenção menor, porém o retorno às atividades não ocorreu da maneira esperada, impactando negativamente nos indicadores da área e principalmente na eficiência.

Em relação aos ICs 3 e 4, ambos são referentes a interrupções corretivas de manutenção. A interrupção corretiva de manutenção se refere a uma ação de reparo ou manutenção realizada em resposta a uma falha ou problema inesperado em um equipamento ou sistema. Essa interrupção ocorre de forma não planejada e geralmente é necessária para corrigir uma situação que pode afetar a operacionalidade, segurança ou eficiência do equipamento.

A interrupção corretiva de manutenção é desencadeada pela identificação de uma falha ou problema durante a operação normal do equipamento e pode envolver a substituição de componentes, reparos emergenciais ou outras medidas para restaurar o funcionamento adequado do sistema. Essa forma de manutenção é frequentemente mais dispendiosa e pode resultar em tempo de inatividade não programado, afetando a produtividade e os custos operacionais.

No caso do IC3 houve uma falha no laminador, onde ela se estendeu por cinco dias, ocasionando em uma perda de 400 toneladas de produção, assim impactando diretamente na eficiência do setor. Já no IC4 houve uma falha no leito de resfriamento, processo este que é contemplado pelo terceiro estágio da rede; a falha foi sanada após quatro dias, também causando uma redução na eficiência da área.

O ICE1, que é o único incidente crítico causado por motivos externos, teve um impacto positivo na eficiência da área. Isso se deve ao fato de que houve um aumento de 48% no volume de produção em comparação com o planejado, resultando no estabelecimento de um novo recorde de volume produzido durante o período analisado na usina objeto de estudo. Este aumento significativo de produção ocorreu durante a pandemia do COVID-19, onde muitas indústrias enfrentaram desafios significativos, porém outras experimentaram um aumento inesperado na produção, como foi o caso da usina objeto de estudo.

A identificação dos incidentes críticos é um instrumento importante para apoiar nas decisões gerenciais, com base no histórico. Outro dado importante fornecido pelo NDEA é possibilidade de abrir a caixa preta da DMU, tendo a oportunidade de avaliar o subprocesso que demanda mais atenção e recursos.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação às contribuições teóricas, a pesquisa realizada contribui para o avanço do conhecimento sobre a aplicação da NDEA. Embora muitos benefícios estejam associados à utilização da NDEA, destaca-se a capacidade de visualizar internamente a DMU, permitindo uma análise detalhada dos subprocessos. Essa capacidade proporciona a oportunidade de desvendar os elementos internos da DMU, permitindo identificar quais subprocessos contribuem positiva ou negativamente para a eficiência.

Isso possibilita o desenvolvimento de planos de ação direcionados para a melhoria da eficiência tanto dos subprocessos quanto do sistema como um todo. Omid et al. (2015), reforça em sua pesquisa que a DEA convencional avalia a eficiência das DMUs com base apenas em entradas e saídas, ignorando parâmetros intermediários. Em contrapartida, a NDEA direciona sua atenção para parâmetros exógenos, endógenos e intermediários, com o objetivo de medir a eficiência não apenas das DMUs como um todo, mas também de todos os subprocessos associados a elas.

Durante o desenvolvimento do estudo, foi evidenciada uma lacuna significativa na literatura relacionada à aplicação prática da NDEA. Yang et al., (2014); Yadollahi et al., (2022) e Yang et al., (2017) evidenciam em seus estudos que o NDEA foi aplicado de maneira empírica, ambos sugerem que aplicação em trabalhos que utilizem *cases* reais, pois tal cenário apresenta implicações substanciais, uma vez que a ausência de estudos que efetivamente empregam a NDEA em situações reais limita a compreensão das possíveis limitações da técnica quando aplicada em grandes indústrias. Além disso, essa escassez de investigações práticas também impede a exploração abrangente e aprofundada dos benefícios associados à utilização da NDEA.

Outra contribuição importante evidencia que estudos abordem casos reais de aplicação da NDEA, a fim de fornecer *insights* valiosos para a teoria e a prática, bem como promover avanços significativos no campo da eficiência operacional e gestão de desempenho. Essa contribuição é reforçada por Khoveyni et al., (2022), pois afirma que a aplicação do NDEA auxilia os gerentes e demais tomadores de decisão na identificação das ineficiências de suas DMUs,

em todos os estágios, visando aprimorá-las e manter o foco na gestão de desempenho.

No seu estudo, Yadollahi et al. (2022) apenas expõem os índices de eficiência dos estágios do processo analisado. Em contrapartida, Lu et al. (2019) e Wu et al. (2017) fornecem os índices de eficiência de cada estágio do processo analisado, além de apresentarem os índices de eficiência global. O presente estudo também apresenta todos os índices de eficiência (tanto dos estágios quanto global), o que permite estabelecer uma relação entre eles e identificar quais subprocessos contribuem para a eficiência mais baixa do sistema.

A contribuição do NDEA associado ao *Benchmarking* interno está principalmente relacionada à avaliação e melhoria da eficiência da empresa. Ao empregar a NDEA em conjunto com o *benchmarking* interno, a empresa pode identificar áreas específicas em que estão abaixo do seu potencial máximo de eficiência, comparando-se com suas próprias melhores práticas ou desempenho histórico. Essa abordagem permite que empresa identifique oportunidades de melhorias internas, identificando padrões de eficiência e ineficiência em diferentes áreas operacionais. Isso pode incluir processos de produção, gestão de recursos, distribuição de produtos, entre outros.

No seu estudo, Roudabr et al. (2022) empregou a Análise Envoltória de Dados Não-Arbitrária (NDEA) para avaliar a eficiência de 42 empresas produtoras de cimento. Yang et al. (2017) conduziu dois estudos utilizando NDEA para avaliar empiricamente a eficiência de quinze indústrias chinesas, além de avaliar a eficiência de 26 províncias chinesas em outro estudo. Em outras palavras, ambos os autores realizaram avaliações de eficiência por meio de *Benchmarking* externo. Por sua vez, durante a fase de pesquisa para a condução do presente estudo, identificou-se essa lacuna e propôs-se a realizar a aplicação da NDEA por meio do *benchmarking* interno.

Ao usar a NDEA em conjunto com o *benchmarking* interno, a empresa tem a possibilidade de adotar uma abordagem de melhoria contínua, monitorando regularmente o desempenho e implementando ajustes conforme necessário para otimizar a eficiência operacional. Além das contribuições previamente mencionadas, o estudo também oferece contribuições práticas ao demonstrar a viabilidade da aplicação do *benchmarking* interno em áreas ou

setores nos quais não há disponibilidade de dados de concorrentes para a realização de benchmarking externo.

Nesse sentido, entende-se que o estudo é relevante para a teoria, pois apresenta evidências dos benefícios proporcionados pela utilização NDEA associada ao *benchmarking* interno. Durante a revisão bibliográfica, foi constatado um número reduzido de estudos que empregam a NDEA em contextos práticos, utilizando bancos de dados reais. Até o momento da publicação deste trabalho, nenhum estudo que aplicasse o modelamento NDEA utilizando *benchmarking* interno foi identificado nas bases de dados pesquisadas para este estudo. Além disso, não foram encontrados trabalhos que combinassem a técnica de análise de incidentes com a aplicação da NDEA usando benchmarking interno.

O estudo mostra contribuição para a empresa em que foi realizado, ao validar os benefícios da aplicação NDEA em conjunto com Benchmarking interno para analisar a eficiência de seus processos. Os especialistas da empresa, ao revisarem os resultados, reconheceram que as orientações propostas pela análise poderiam ser uma referência valiosa para desenvolver estratégias adicionais com o objetivo de melhorar a produtividade e a eficiência por meio de decisões fundamentadas.

Os especialistas dos processos observaram que os escores de eficiência gerados pela aplicação da NDEA podem facilitar a compreensão do desempenho das unidades e de seus subprocessos, oferecendo um contexto analítico mais simplificado. Atualmente, a empresa mantém um extenso conjunto de indicadores, os quais podem ser substituídos pelo cálculo de produtividade e eficiência por meio do NDEA. Além disso, destacaram que o acompanhamento contínuo do desempenho ao longo do tempo, utilizando o *Benchmarking* interno, proporciona uma base sólida para avaliar o impacto de iniciativas de melhoria nos processos e promover a objetividade na tomada de decisões.

Outro aspecto relevante para a empresa é a utilização da análise de incidentes críticos, pois ao avaliá-los, as empresas podem identificar áreas, processos ou subprocessos suscetíveis a falhas, problemas ou riscos. Isso permite que a gestão concentre seus esforços em fortalecer essas áreas e mitigar os riscos associados. Além disso, a análise dos incidentes críticos ajuda a identificar padrões ou tendências que podem resultar em problemas

recorrentes. Ao compreender as causas subjacentes desses incidentes, as organizações podem implementar medidas preventivas para evitar sua recorrência no futuro.

A avaliação dos incidentes críticos proporciona *insights* valiosos para a melhoria contínua dos processos e práticas organizacionais. Ao identificar áreas de aprimoramento e oportunidades de otimização, as organizações podem implementar mudanças positivas que aumentam a eficiência, a qualidade e a segurança de suas operações. Além disso, o processo de avaliação dos incidentes críticos promove o aprendizado organizacional, permitindo que as organizações reflitam sobre suas experiências e extraiam lições valiosas. Essas lições podem ser compartilhadas e incorporadas às práticas organizacionais, fortalecendo assim a capacidade da organização de lidar eficazmente com desafios futuros.

Por fim, o estudo proporciona uma contribuição para as indústrias, especialmente para as siderúrgicas, dada a complexidade e a diversidade de variáveis inerentes ao processo. Nesse contexto, é essencial contar com um método confiável para avaliar a eficiência de seus procedimentos e subsidiar o processo de tomada de decisões.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste estudo é avaliar a eficiência em rede, do processo de laminação de aço de uma empresa fabricante de barras e perfis, utilizando o Network DEA (NDEA) por meio do benchmarking interno. Para alcançar esse propósito, foi conduzido um estudo de caso em uma siderúrgica brasileira especializada na fabricação de vergalhões e perfis, no qual foi empregada a NDEA em conjunto com *Benchmarking* interno. A utilização da NDEA proporcionou uma abordagem eficaz para examinar o desempenho da eficiência na organização objeto de estudo.

Para alcançar o objetivo principal deste estudo, foi necessário estabelecer objetivos específicos, onde o primeiro deles consiste em efetuar uma análise crítica dos estudos que avaliam a eficiência por meio do NDEA, em empresas de manufatura. É importante ressaltar que os treze estudos incluídos na presente pesquisa oferecem insights relevantes para sua aplicação na indústria real, além de contribuírem para a seleção apropriada de variáveis e DMUs que compõem o modelo da rede.

Em resumo, a análise crítica dos estudos que empregam a NDEA em empresas de manufatura é essencial para maximizar o valor dessas análises e assegurar sua pertinência e aplicabilidade na prática empresarial. Ao abordar com rigor as limitações e considerações metodológicas, é possível utilizar essa abordagem de maneira eficaz para impulsionar a eficiência e competitividade das empresas em escala global.

Como segundo objetivo específico, observou-se a necessidade de avaliar as contribuições de cada um dos processos que compõem a rede em relação a eficiência de cada um dos processos com a eficiência global. Após a concretização do trabalho, se percebeu que avaliar as contribuições individuais de cada estágio do processo dentro de uma rede é fundamental para compreender como cada um deles impacta a eficiência global do sistema. Ao analisar a eficiência de cada processo em relação à eficiência global, é possível identificar áreas de melhoria e potencializar o desempenho do conjunto. Esta abordagem permite uma visão mais detalhada da operação, destacando quais subprocessos estão contribuindo positivamente ou negativamente para o resultado. Dessa forma, os gestores podem direcionar seus esforços para

otimizar os processos que têm o maior impacto na eficiência global, buscando assim melhorias significativas em toda a rede.

Para complementar a dissertação, revelou-se essencial realizar a análise dos incidentes críticos que influenciaram a eficiência global ao longo do período investigado. Esta análise proporcionou informações significativas sobre os desafios enfrentados e permitiu a identificação de padrões e tendências que podem subsidiar a implementação de ações preventivas e corretivas. Ao compreender a natureza e as causas subjacentes desses incidentes, a organização estará mais bem preparada para enfrentar futuros desafios e promover uma melhoria contínua em seus processos operacionais.

Do ponto de vista teórico, a presente pesquisa oferece contribuições para a teoria vigente sobre NDEA, especialmente devido à sua aplicação em um estudo de caso real. A contribuição inédita reside na introdução da aplicação da NDEA em conjunto com o Benchmarking interno, além da inclusão da análise de incidentes críticos, o que proporciona benefícios significativos para as empresas.

Do ponto de vista prático, por meio desta avaliação, torna-se possível demonstrar à alta gerência os efeitos que o desconhecimento das eficiências de seus subprocessos pode ter sobre a eficiência global do sistema, alertando-os sobre pontos críticos que requerem atenção, correções e melhorias para impulsionar o desempenho da empresa. Outro aspecto relevante é a confirmação de que é viável, por meio de um processo interno de benchmarking utilizando NDEA, promover melhorias significativas.

No entanto, apesar das contribuições mencionadas, este estudo enfrenta algumas limitações. No que diz respeito ao modelo NDEA, não foi possível realizar comparações entre usinas diferentes devido à necessidade de sigilo industrial. Portanto, foram realizados ajustes nos modelos, incluindo o uso de benchmarking interno. Outra limitação a ser considerada é a possibilidade de questionamento do modelo de NDEA, desenvolvido com o respaldo do time de especialistas, apesar de ser considerado robusto e ter sido validado por esse grupo. Conforme observado por Cook, Tone e Zhu (2014), em estudos que utilizam a análise envoltória de dados, não é possível garantir com certeza que todas as variáveis relevantes foram incluídas no modelo, embora seja imprescindível fazer esforços para incorporar todas aquelas que possuem relevância prática para a pesquisa.

Uma última limitação identificada diz respeito à necessidade de analisar o modelo em trimestres. Essa limitação surgiu devido à produção irregular da família escolhida para análise, que não ocorreu de forma mensal. Essa restrição no cronograma de análise pode ter impacto na precisão dos resultados, pois os trimestres podem não capturar variações significativas nos dados que ocorrem em períodos mais curtos, como meses individuais. Portanto, essa limitação pode afetar a capacidade do modelo de capturar variações sazonais ou eventos específicos que ocorrem em intervalos menores de tempo.

O presente estudo proporciona uma plataforma para delinear novas investigações relacionadas ao comportamento da eficiência por meio da combinação de NDEA e a técnica de avaliação de incidentes críticos, realizando uma análise comparativa entre as unidades da empresa e seus concorrentes, através do *Benchmarking* externo. Pesquisas subsequentes têm a oportunidade de conduzir análises mais abrangentes, considerando a avaliação de alvos e folgas, além de explorar a representação bidimensional do modelo NDEA, tanto com *Benchmarking* interno quanto externo.

## REFERÊNCIAS

ADAMIDES, E. D.; POMONIS, N. The co-evolution of product , production and supply chain decisions , and the emergence of manufacturing strategy. **Intern. Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 301–312, 2009.

BARAT, Mona et al. DEA for nonhomogeneous mixed networks. *Asia Pacific Management Review*. ., p. 161-166. 15 dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1029313216302408>. Acesso em: 07 jul. 2023.

BARNES, David. Research methods for the empirical investigation of the process of formation of operations strategy. **International Journal of Operations & Production Management**, v.21, n.8, p. 1076-1095, 2001.

BLACK, J. Temple. O projeto da fábrica com futuro. **Bookman**, 1998.

BOGETOFT, Peter et al. Dynamic network DEA: An illustration. *Journa Lof The Operation Research Soclet Yof Japan*. ., p. 147-162. 24 out. 2008.

BRASIL, João Eduardo Sampaio. **VARIÁVEIS SISTEMICAMENTE PREVALENTES PARA A EFICIÊNCIA TÉCNICA: AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO NO SETOR SIDERÚRGICO**. 2018. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018. Disponível em: [http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/7409/João%20Eduardo%20Sampaio\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/7409/João%20Eduardo%20Sampaio_.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 05 fev. 2023.

BUCKLEY, Peter J.; PASS, G. L.; PRESCOTT, Kate. Measures of international competitiveness: empirical findings from British manufacturing companies. **Journal of Marketing Management**, v. 6, n. 1, p. 1-13, 1990.

CAMANHO, A.S.; ZANELLA, A.; MOUTINHO, V. Benefit-of-the-Doubt Composite Indicators and Use of Weight Restrictions. In: *Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 692. Springer, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-29583-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-29583-6_6)

COLLATTO, Dalila Cisco et al. Autonomia na produção de frangos de corte: uma análise comparativa. *Revista Internacional de Gestão de Alimentos e Agronegócios*., p. 47-64. 21 set. 2018. Disponível em:

<https://www.wageningenacademic.com/doi/10.22434/IFAMR2017.0025>. Acesso em: 07 jul. 2023.

COOK, Wade D.; GREEN, Rodney H.. Evaluating power plant efficiency: a hierarchical model. *Computers & Operations Research*. Reino Unido, p. 813-823. 04 abr. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054803002697>. Acesso em: 19 fev. 2024.

CHEN, Huangxin et al. Research on the Regional Differences and Influencing Factors of the Innovation Efficiency of China's High-Tech Industries: Based on a Shared Inputs Two-Stage Network DEA. *Mdpi - Sustainability*. , p. 1-15. 17 abr. 2020.

CHILINGERIAN, J. A. e SHERMAN, H. D., Health care applications: From hospitals to physicians, from productive efficiency to quality frontiers em Cooper, W. W., Seiford, L. M. e Zhu, J. (Eds), *Handbook on data envelopment analysis*, Springer, Boston, 2004.

DALFOVO, Michael Samir; LANA, Rogério Adilson; SILVEIRA, Amélia. Métodos quantitativos e qualitativos: um resgate teórico. **Revista Interdisciplinar Científica Aplicada**, v. 2, n. 3, p. 1-13, 2008.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR., J. A. V. *Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. 1° ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

EISENHARDT, K. M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

EISENHARDT, Kathleen M.; GRAEBNER, Melissa E. Theory building from cases: Opportunities and challenges. **Academy of management journal**, v. 50, n. 1, p. 25-32, 2007.

FÄRE, Grosskopf RS, Lovell CAK. *Production frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

FÄRE, Rolf et al. Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*. Nova York, p. 35-49. mar. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012199000129>. Acesso em: 22 maio 2023.

FISCHMAN, Adalberto A., and Moises A. Zilber. "Utilização de indicadores de desempenho como instrumento de suporte à gestão estratégica." encontro da

ANPAD, XXIII, Anais (1999).

GRÖNROOS, C.; OJASALO, K. Service productivity Towards a conceptualization of the transformation of inputs into economic results in services. **Journal of Business Research**, v. 57, p. 414–423, 2004.

HUANG, Y.-H.; WU, L.-W.; CHEN, C.-H. Fracture prediction of electromagnetic silicon steel in reheating furnace. **Journal of Thermal Stresses**, v. 39, n. 5, p. 571–588, maio 2016.

KAO, C., HWANG, S.N. **Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan**. European Journal of Operational Research, v. 185, p. 418429, 2008.

KAO, C. **Efficiency measurement for parallel production systems**. European Journal of Operational Research, v. 196, ed. 3, p. 1107–1112, 2009.

KAPLAN, R. S.; COOPER, R. **Cost and effect**. Boston: Harvard Business School Press, 1998.

KAYDOS, Wilfred. Operational performance measurement increasing total productivity. **CRC press**, 1998.

KHOVEYNI, Mohammad et al. Two-stage network DEA with shared resources: Illustrating the drawbacks and measuring the overall efficiency. Knowledge-Based Systems., p. 1-18. 17 ago. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950705122003392>. Acesso em: 07 jul. 2023.

KOSTANO, K., JALLINOJA, P., VESALA, K. M., ARAÚJO-SOARES, V., SNIEHOTTA, F. F., & HANKONEN, N. (2019). Using the critical incident technique for qualitative process evaluation of interventions: the example of the “Let’s. Em Soc. Sci. Med (pp. 389-397).

KRELLING, Prof Msc Anael. Laminação. 2018. Instituto Federal Santa Catarina. Disponível em: <http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/Tecnologia%20em%20Mecatrônica/PFB64/3%20-%20Laminacao.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2023.

LACERDA, Daniel Pacheco et al. Design Science Research: um método de pesquisa para Engenharia de Produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LEWIS, H.F.; SEXTON, T.R. **Network DEA: efficiency analysis of organizations with complex internal structure**. Computers & Operations Research, v. 31, ed. 9, p. 1365–1410, 2004.

LIANG DONG, Z. J. Empirical Analysis and Countermeasures on the Efficiency of Industrial Input-Output in Science and Technology in Wuhan. International Conference on Product Innovation Management, 2011.

LU, Ching-Cheng et al. Evaluation of the operating performance of Taiwanese machine tool industry with the dynamic network DEA model. *Enterprise Information Systems.*, p. 87-104. 23 dez. 2019.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. Fundamentos de metodologia científica. [s.l.: s.n.].

MARQUES, R. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA E DAS INFLUÊNCIAS DO CLIENTE EM OPERAÇÕES DE SERVIÇOS. [s.l.] UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS, 2017.

MARQUES, Rafael et al. Exploring outsourcing service productivity from the buyer and supplier perspective: A case analysis in the fleet maintenance industry. *Operations Management Research*, v. 16, n. 2, p. 853-867, 2023.

MIGUEL, P. A. C. et al. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2° ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

MIRHEDAYATIAN, S. M.; AZADI, M.; SAEN, R. F. **A novel network data envelopment analysis model for evaluating green supply chain management.** *Int. J. Production Economics*, v. 147, p. 544 – 554, 2014.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Design Science Research: In: BOOKMAN (Ed.). Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. 1° ed. Porto Alegre: [s.n.]. p. 141–172.

MUCHIRI, Peter; PINTELON, Liliane. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 13, p. 3517-3535, 2008.

NARASIMHAN, R., TALLURI, S. e Das, A. (2004), Exploring flexibility and execution competencies of manufacturing firms, *Journal of Operations Management*, 22, 91-106.

NETTO, D. **O Brasil precisa de um setor siderúrgico eficiente e competitivo.** Disponível em: <<https://www.cartacapital.com.br/revista/940/o-bras>>. Acesso em: 25 jan. 2023.

NEVES, Cleonor et al. **Os dez maiores desafios da automação industrial: As perspectivas para o futuro.** In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. 2007.

Niska, M., Hynynen, S. T., & Vesala, K. (2011). Histórias de sucesso de empreendedores como perspectiva para o empreendedorismo e sua promoção. Em *Suupohjan seutukunnassa* (pp. 49-93).

OLIVEIRA, Iran Rodrigues de. **Utilização da análise envoltória de dados (DEA), no diagnóstico da eficiência de cultivo do camarão marinho.** 2008. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2008. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/handle/tede2/5000#preview-link0>. Acesso em: 05 mar. 2023.

OMID, Azadeh *et al.* Integrated AHP and network DEA for assessing the efficiency of Iranian handmade carpet industry/Integrated AHP and network DEA for assessing the efficiency of Iranian handmade carpet industry. **Decision Science Letters.** ., p. 477-486. 03 jun. 2015.

PARIS, Alaércio de. **OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS - OEE: NECESSÁRIO, MAS NÃO SUFICIENTE. UMA ANÁLISE INTEGRANDO O OEE E A DATA ENVELOPMENT ANALYSIS - DEA.** 2016. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016. Disponível em: [http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6036/Ala%C3%A9rcio+de+Paris\\_.pdf?sequence=1](http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6036/Ala%C3%A9rcio+de+Paris_.pdf?sequence=1). Acesso em: 05 fev. 2023.

PELEGRINI, ALEXANDRE VIEIRA. **O processo de modularização em embalagens orientado para a customização em massa: uma contribuição para a gestão do design.** Diss. Universidade Federal do Paraná, 2005.

PIRAN, Fabio Antonio Sartori. **Modularização de produtos e os efeitos sobre a eficiência técnica: uma avaliação em uma fabricante de ônibus.** 2015. 233 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4863>. Acesso em: 05 maio 2023.

PIRAN, Fabio Sartori *et al.* Análise e Gestão da eficiência - Aplicação em sistemas produtivos de bens e de serviços. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 227p.

PIRAN, Fabio Antonio Sartori *et al.* Overall equipment effectiveness: Required but not enough—An analysis integrating overall equipment effect and data envelopment analysis. *Global Journal of Flexible Systems Management*, v. 21, p. 191-206, 2020.

PIRAN, Fabio Sartori *et al.* **Internal benchmarking to assess the cost efficiency of a broiler production system combining data envelopment analysis and throughput accounting.** *International Journal of Production Economics*, v. 238, p. 108173, 2021.

PIRAN, F. S., LACERDA, D. P., CAMANHO, A. S., & SILVA, M. C. (2021). Internal benchmarking to assess the cost efficiency of a broiler production system combining data envelopment analysis and throughput accounting. *International Journal of Production Economics*.

PIRAN, Fabio Sartori et al. Internal Benchmarking for Efficiency Evaluations Using Data Envelopment Analysis: A Review of Applications and Directions for Future Research. *Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis: Theory and Empirical Applications*, p. 143-162, 2023.

RATHORE, A. et al. Performance management through strategic total productivity optimisation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, n. 9–10, p. 1020–1028, 2005.

ROUDABR, Nasim et al. A NEW MODELING APPROACH FOR UNDESIRABLE FACTORS IN EFFICIENCY EVALUATION OF CEMENT INDUSTRY WITH FOUR STAGES STRUCTURE BASED ON PIECEWISE LINEAR NDEA MODEL. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research.* ., p. 57-74. jan. 2022. Disponível em: <https://web.s.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=0424267X&AN=156264908&h=MRYDzYn9%2bbVIAhXNI8SuWO7vADyU19YeP7igugSpdcUhK5Y9pBIAOFD1WJ5JLyq44o4%2fjYMjmk e7KOaYuYdFg%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNo tAuth&crlhashurl=login.asp>

SANTOS, Jéssica Meirelles dos. **Avaliação da eficiência de parques tecnológicos do Brasil com a aplicação da análise envoltória de dados em rede - NDEA**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25670/1/JessicaMeirelesDosSantos\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25670/1/JessicaMeirelesDosSantos_DISSERT.pdf). Acesso em: 05 maio 2023.

SEIFORD, L. M. e ZHU, J. (1999), Profitability and marketability of the top 55 U.S. commercial banks, *Management Science*, 45(9), 1270-1288.

SENRA, Luis Felipe Aragão de Castro et al. **Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA**. *Pesquisa operaonal*, v.27, n.2, p. 191-207, 2007. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br.spolm/files/arq0049\\_0.pdf](https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br.spolm/files/arq0049_0.pdf) Acesso em 05 de maio de 2023.

SARKIS, Joe. Preparing your data for DEA. *Modeling data irregularities and structural complexities in data envelopment analysis*, p. 305-320, 2007.

SEXTON, T. R. e LEWIS, H. F. (2003), Two-stage DEA: An application to major league baseball, *Journal of Productivity Analysis*, 19, 227-249.

SIGGLE, E. India's trade policy reforms and industry competitiveness in the 1980s. **The World Economy**, v. 24, n. 2, p. 159–183, 2001.

SILVA, João Gilberto Corrêa Da. **Métodos de Pesquisa Científica**. Universidade Federal de Pelotas. Instituto de Física e Matemática. Pelotas, 2005.

SILVER, M.; BENNETT, A. Potential Productivity: Concepts and Application. **Omega**, v. 14, n. 6, p. 443–452, 1986.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B., GOMES, E. G., ANGULO-MEZA, L., SOARES DE MELLO, M. H. C. e SOARES DE MELLO, A. J. R. (2006), Engineering Post-Graduate Programmes: A Quality and Productivity Analysis, *Studies in Educational Evaluation*, 32, 136-152.

SONG, Ki Han et al. Competitiveness Evaluation Methodology for Aviation Industry Sustainability Using Network DEA. *Mdpi Sustainability*. Suíça, p. 1-16. dez. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10323>. Acesso em: 07 jul. 2023.

STEENHUIS, H.-J.; BRUIJN, E. J. DE. International shopfloor level productivity differences: an exploratory study. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 1, p. 42–55, 2006.

TEZZA, Rafael; BORNIA, Antonio Cezar; VEY, Ivan Henrique. Sistemas de medição de desempenho: uma revisão e classificação da literatura. *Gestão & Produção*, v. 17, n. 1, p. 75-93, 2010.

TONE, K.; TSUTSUI, M. Network **DEA: A slacks-based measure approach**. *European Journal of Operational Research*, v. 197, p. 243–252, 2009.

VIANA, Fernando Luiz E. et al. Indústria Siderúrgica. Caderno Setorial - Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - Etene. Fortaleza, maio 2023. Caderno Ano 8, p. 01-11. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1762>. Acesso em: 19 fev. 2024.

WU, Huaqing et al. Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry. *Omega*. , p. 38-47. Jan. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305048316000104>. Acesso em: 07 jul. 2023.

YADOLLAHI, Amir Hossein et al. CENTRALIZED RESOURCE ALLOCATION IN TWO-STAGE PRODUCTION SYSTEMS: A NETWORK DEA APPROACH. *Economic Computation And Economic Cybernetics Studies And Research*,. , p. 279-296. Mar. 2022. Disponível em: <https://web.p.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=0424267X&NA=159206051&h=YgE7Hfq2Xnuj%2f8CmRwBxagY10eFEQ1Bvhh2L4yP1bAip8H4PZ4ALrTLBA3fNiYNnq6TenVMPNkoR31CgzICLRq%3D%3d&crl=C&resultNs=AdminWebAuth&resultlocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26>

YANG, Guo?Liang et al. Overall Efficiency and its Decomposition in a Two?Stage Network DEA Model. *Journal Of Management Science And Engineering*. , p. 161-192. Set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096232019300320>. Acesso em: 07 jul. 2023.

YANG, Wei et al. Regional technical efficiency of Chinese Iron and steel industry based on bootstrap network data envelopment analysis. *Socio-Economic*

Planning Sciences. ., p. 14-24. Mar. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038012116301392>. Acesso em: 07 jul. 2023.

YANG, Wei; SHAO, Yanmin; QIAO, Han; WANG, Shouyang. An Empirical Analysis on Regional Technical Efficiency of Chinese Steel Sector Based on Network DEA Method. *Procedia Computer Science*. ., p. 615-624. 29 maio 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050914004852>. Acesso em: 07 jul. 2023.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos**. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

YU, Ming-Miin; LIN, Erwin Tj. Efficiency and effectiveness in railway performance using a multi-activity network DEA model. *Omega The International Journal Of Management Science*. Taiwan, p. 1005-1017. dez. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305048307000916>. Acesso em: 19 fev. 2024.

ZHU, J. (2000), Multi-factor performance measure model with an application to Fortune 500 companies, *European Journal of Operational Research*, 123(1), 105-124.

## ANEXO A – PROTOCOLO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA

<b>Framework conceitual:</b>	A laminação de barras e perfis é um processo importante na produção do aço, pois beneficia o aço bruto e transforma em produtos, que são destinados diretamente aos consumidores finais. Com base na complexidade e nos efeitos de interação das variáveis que influenciam a eficiência do processo laminação, o presente estudo propõe a realização de uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar, através do NDEA, as variáveis ineficientes do processo, visando desenvolver estratégias de otimização e melhorias.
<b>Contexto:</b>	Aplicação de NDEA no processo de laminação de barras e perfis
<b>Estratégia de revisão:</b>	Agregativa

Fonte de busca	Critérios e termos de busca							
Base de dados internacional	Palavra exata	Operador booleano	Palavra exata	Operador booleano	Palavra exata	Operador booleano	Palavra exata	Campo
Scopus	"Lamination"	OR	"Industry"	OR	"Manufacturing"	AND	"Network DEA"	TITLE-ABSTRACT-KEY
EbscoHost	"Lamination"	OR	"Industry"	OR	"Manufacturing"	AND	"Network DEA"	AB Resumo
Science Direct	"Lamination"	OR	"Industry"	OR	"Manufacturing"	AND	"Network DEA"	Abstract, Title, keywords
Base de dados nacional	Palavra exata	Operador booleano	Palavra exata	Operador booleano	Palavra exata	Operador booleano	Palavra exata	Campo
Scielo	"Laminação"	OU	Indústria	OU	Manufatura	E	"Network DEA"	Todos os índices

Critérios de refinamento da pesquisa	
<b>Artigos:</b>	Estudos publicados em periódicos revisados por pares e que possuam acesso ao conteúdo completo.
<b>Idiomas:</b>	Inglês ou Português
<b>Horizonte:</b>	Estudos publicados entre o período de 2000 a 2023

Critérios de inclusão e exclusão	
<b>Adequação a questão de revisão</b>	O objeto de estudo é, ou tem relação direta com aplicação de NDEA em processos de laminação, indústrias e ou manufaturas.
<b>Adequação ao foco da pesquisa</b>	O estudo analisado aborda a utilização de NDEA como método de avaliação da eficiência. Trabalhos que possuam as palavras utilizadas nos critérios de buscas em seu conteúdo.
<b>Qualidade da execução dos estudos</b>	O método apresentado é rigorosamente seguido de acordo com os padrões apropriados. Os argumentos apresentados são embasados em fundamentos sólidos. Os resultados têm a possibilidade de serem generalizados.
<b>Relevância para a pesquisa</b>	Fornecem variáveis passíveis de serem utilizadas na formulação da pesquisa. Fornecer informações para a construção do NDEA.