

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá**

**RODRIGO GIORNES TORRES**

**UMA ABORDAGEM INOVADORA PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA GERAL DO  
EQUIPAMENTO POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS EM REDE**

Guaratinguetá - SP  
2025



**RODRIGO GIORNES TORRES**

**UMA ABORDAGEM INOVADORA PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA GERAL DO  
EQUIPAMENTO POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS EM REDE**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Erica Ximenes Dias

Guaratinguetá - SP

2025

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T693a | <p>Torres, Rodrigo Giornes</p> <p>Uma Abordagem inovadora para avaliar a eficiência geral do equipamento por meio da análise envoltória de dados em rede / Rodrigo Giornes Torres - Guaratinguetá, 2025. 62 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 55-61</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva<br/>Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Erica Ximenes Dias</p> <p>1. Manutenção produtiva total. 2. Análise de envoltória de dados. 3. Processo decisório. I. Título.</p> <p>CDU 658.581(043)</p> |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## **IMPACTO POTENCIAL DA PESQUISA**

Esta pesquisa apresenta impacto científico e técnico ao propor o NDEA-OEE, um inédito indicador de desempenho industrial que integra a Análise Envoltória de Dados em rede (Network DEA) ao tradicional OEE (Eficiência Global dos Equipamentos). A originalidade e o ineditismo da proposta foram confirmados por análise bibliométrica nas bases Scopus e Web of Science, que não identificaram estudos anteriores com abordagem semelhante. Trata-se de um avanço metodológico que permite avaliar a eficiência de máquinas em múltiplos estágios interdependentes, oferecendo uma visão mais precisa e abrangente dos processos produtivos.

Sob a ótica econômica e da inovação, o DEA-OEE possibilita identificar gargalos, otimizar recursos e aumentar a produtividade com mais eficácia que métodos tradicionais. A abordagem favorece ganhos operacionais e competitividade. Futuramente, sua integração com sistemas como MES e ferramentas como Tableau poderá ampliar sua aplicação no contexto da Indústria 4.0.

No campo social e educacional, a pesquisa fortalece a cultura organizacional orientada à melhoria contínua e à tomada de decisão baseada em dados, promovendo a qualificação de profissionais e o desenvolvimento de competências técnicas e analíticas.

## **POTENTIAL IMPACT OF THE RESEARCH**

This research presents scientific and technical impact by proposing NDEA-OEE, an original industrial performance indicator that integrates Network Data Envelopment Analysis (Network DEA) with the traditional Overall Equipment Effectiveness (OEE). The originality and novelty of the proposal were confirmed through a bibliometric analysis in the Scopus and Web of Science databases, which found no prior studies with a similar approach. This represents a methodological advancement, enabling the evaluation of machine efficiency across multiple interdependent stages and providing a more accurate and comprehensive view of production processes.

From an economic and innovation perspective, DEA-OEE enables the identification of bottlenecks, resource optimization, and increased productivity more effectively than traditional methods. This approach supports operational gains and enhanced competitiveness. In the future, its integration with systems such as MES and tools like Tableau may expand its applicability within the context of Industry 4.0.

In the social and educational domains, the research strengthens an organizational culture focused on continuous improvement and data-driven decision-making, promoting the qualification of professionals and the development of technical and analytical competencies.

**RODRIGO GIORNES TORRES**

**Uma abordagem inovadora para avaliar a eficiência geral do equipamento por meio da análise envoltória de dados em rede.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção – Mestrado Profissional

Data da defesa: 06/05/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA**  
Data: 07/05/2025 16:18:15-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA**  
**Orientador - UNESP**

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS**  
Data: 07/05/2025 09:17:42-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS**  
**UNESP**

Documento assinado digitalmente  
 **RAFAEL DE CARVALHO MIRANDA**  
Data: 06/05/2025 17:54:00-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Prof. Dr. RAFAEL DE CARVALHO MIRANDA**  
**UNIFEI**

MAIO DE 2025

## **DADOS CURRICULARES**

### **RODRIGO GIORNES TORRES**

|                   |                                                                                                                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 23.05.1980 – Guaratinguetá / SP                                                                                                                                              |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Manoel Candido Torres<br>Rosa Maria Giornes Torres                                                                                                                           |
| <b>1998/2000</b>  | Curso de Graduação<br>Tecnólogo em Mecânica “Processos de produção” - Faculdade Integradas de Cruzeiro                                                                       |
| <b>2009/2011</b>  | Curso de Pós-Graduação Lato Sensu<br>Especialização em Logística com ênfase em Qualidade e Produtividade – Faculdade de Ciências Humanas de Cruzeiro.                        |
| <b>2009/2013</b>  | Curso de Graduação<br>Engenharia de Produção - Faculdade de Ciências Humanas do Estado de São Paulo                                                                          |
| <b>2019/2020</b>  | Curso de Pós-Graduação Lato Sensu<br>Especialização em Gestão da Produção – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Campus de Guaratinguetá               |
| <b>2023/2025</b>  | Curso de Pós-Graduação Strictu Sensu<br>Mestrado Profissional em Engenharia da Produção – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Campus de Guaratinguetá |

“Dedico este trabalho a minha família e, sobretudo a Deus”.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida, minha saúde, minha família, minha inteligência e meus amigos.

Com especial gratidão, manifesto meu apreço aos familiares, em particular à minha esposa Renata, e aos meus filhos Brenda e Pedro, pelo apoio e compreensão durante este desafio. Agradeço a paciência diante das minhas ausências e por acompanharem esta etapa crucial da minha trajetória.

Aos meus pais, Manoel e Rosa, já em memória, pelo exemplar legado de vida e apoio inestimável que sempre me proporcionaram.

Aos professores do mestrado pelo incentivo, orientação, paciência e cooperação, em especial ao Prof. Dr. Jorge Muniz Jr, ao Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins, a minha coorientadora Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Erica Ximenes Dias, ao meu orientador Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva, e à coordenadora do mestrado profissional Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Gislaine Cristina Batistela.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá pela infraestrutura que me possibilitou aprofundar meus estudos.

Aos amigos de mestrado, em especial os amigos de estrada e trabalhos, Marcelo Amaral, Renan Costa, Camila Sales e Isabela Ribeiro.

Em especial ao Sr. Marcio Garcia Rodrigues e ao Sr. Marcus Vinicius Puerta, por me proporcionar esta oportunidade de desenvolvimento acadêmico e profissional e pela confiança no meu trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”  
Simone de Beauvoir.

## RESUMO

O *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) permite a avaliação de perdas de desempenho e serve como base para identificar iniciativas de melhoria. No entanto, adotar vários sistemas de medição de OEE pode resultar em projetos de melhoria divergentes. Na verdade, empregar sistemas de medição inadequados pode levar ao tratamento de problemas errados. Portanto, é crucial compreender o OEE e suas variações para selecionar o sistema de medição mais adequado, direcionando os esforços de melhoria para os processos menos eficientes. Para medir a eficiência, uma alternativa interessante é usar modelos de *Data Envelopment Analysis* (DEA). Os modelos DEA clássicos são reconhecidos por trabalharem somente com um estágio, o que significa que possuem um conjunto de entradas exógenas e um conjunto separado de saídas exógenas. Alternativamente, os modelos *Network Data Envelopment Analysis* (NDEA) oferecem uma abordagem mais precisa ao considerar a análise de eficiência das Unidades de Tomada de Decisão (DMUs) em vários estágios, permitindo conjuntos de entradas exógenas, produtos intermediários endógenos e saídas exógenas. Neste estudo, foram analisadas sete máquinas operando em três turnos ao longo de quatro quinzenas, totalizando 84 DMUs para a instância inicial (Instância 1). A Instância 2 envolve uma análise de eficiência de todas as máquinas, considerando apenas o primeiro turno ao longo de um período de quatro quinzenas. A Instância 3 envolve uma análise de eficiência de todas as máquinas, considerando apenas o segundo turno ao longo de um período de quatro quinzenas. A Instância 4 envolve uma análise de eficiência de todas as máquinas, considerando apenas o terceiro turno ao longo de um período de quatro quinzenas. A Rede NDEA-OEE fornece à gerência uma compreensão mais completa do processo de produção, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria e a formulação de estratégias mais eficazes para otimizar o desempenho operacional e a competitividade da empresa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção produtiva total; Eficácia geral do equipamento; Análise envoltória de dados; Network DEA; NDEA-OEE; Eficiência operacional.

## ABSTRACT

The Overall Equipment Effectiveness (OEE) enables the assessment of performance losses and serves as a basis for identifying enhancement initiatives. However, adopting various OEE measurement systems may result in divergent improvement projects. In fact, employing inappropriate measurement systems can lead to addressing the wrong issues. Hence, it is crucial to comprehend OEE and its variations to select the most suitable measurement system, directing improvement efforts towards the least efficient processes. To measure efficiency, an interesting alternative is to use Data Envelopment Analysis (DEA) models. The classical DEA models are recognized as One-stage, meaning they possess a set of exogenous inputs and a separate set of exogenous outputs. Alternatively, Network DEA (NDEA) models offer a more precise approach by considering the efficiency analysis of Decision-Making Units (DMUs) across multiple stages, allowing for sets of exogenous inputs, endogenous intermediate products, and exogenous outputs. In this study, seven machines operating across three shifts over four fortnights were analyzed, amounting to 84 DMUs for the initial instance (Instance 1). Instance 2 involves an efficiency analysis of all machines, considering solely the first shift over a span of four fortnights. Instance 3 involves an efficiency analysis of all machines, considering solely the second shift over a span of four fortnights. Instance 4 involves an efficiency analysis of all machines, considering solely the third shift over a span of four fortnights. The Network NDEA-OEE provides management with a more complete understanding of the production process, enabling the identification of improvement opportunities and the formulation of more effective strategies for optimizing operational performance and the company's competitiveness.

**KEYWORDS:** Total productive maintenance; Overall equipment effectiveness; Data envelopment analysis; Network DEA; NDEA-OEE; Operational efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Visão geral das publicações sobre Eficácia Geral do Equipamento.....                            | 19 |
| Figura 2 - Produção científica anual e citação média de artigos no geral .....                             | 19 |
| Figura 3 - Análise sobre a eficácia geral do equipamento.....                                              | 20 |
| Figura 4 - Mapa Temático sobre Eficiência Geral do Equipamento. ....                                       | 20 |
| Figura 5 - Classificação da pesquisa. ....                                                                 | 23 |
| Figura 6 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....                                                        | 25 |
| Figura 7 - Estrutura geral dos modelos clássicos DEA (CCR e BCC).....                                      | 31 |
| Figura 8 - Um processo serial de dois estágios. ....                                                       | 32 |
| Figura 9 - Representação do modelo do problema de Análise de Eficiência NDEA - OEE com dois estágios. .... | 39 |
| Figura 10 - Vetor de eficiência para o estágio 1 da instância 1.....                                       | 40 |
| Figura 11 - Vetor de eficiência para o estágio 2 da instância 1.....                                       | 40 |
| Figura 12 - Vetor de eficiência para o estágio global da instância 1.....                                  | 41 |
| Figura 13 - Painel para cada estágio da máquina 1 a 4. ....                                                | 43 |
| Figura 14 - Painel para cada estágio da máquina 5 a 7.....                                                 | 43 |
| Figura 15 - Vetor de eficiência correspondente a cada estágio para a instância 2. ....                     | 44 |
| Figura 16 - Vetor de eficiência correspondente a cada estágio da instância 3 .....                         | 45 |
| Figura 17 - Vetor de eficiência correspondente a cada estágio da instância 4 .....                         | 47 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Artigos sobre “Eficácia Geral do Equipamento” e “Análise Envoltória de Dados” | 21 |
| Tabela 2 - Análise bibliométrica das publicações .....                                   | 22 |
| Tabela 3 - Matriz de entrada, intermediários e saída para a instância 1.....             | 39 |
| Tabela 4 - Análise de pesos de cada variável .....                                       | 49 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|           |                                                                     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| AM        | Additive Manufacturing                                              |
| DEA       | Data Envelopment Analysis                                           |
| DEA-BCC   | Data Envelopment Analysis - Banker, Charnes and Cooper              |
| DEA-CRS   | Data Envelopment Analysis - Constant Returns to Scale               |
| DEA-OEE   | Data Envelopment Analysis - Overall Equipment Effectiveness         |
| DEA-VRS   | Data Envelopment Analysis - Variable Returns to Scale               |
| DMU       | Decision Making Unit                                                |
| ISO       | International Organization for Standardization                      |
| KPI       | Key Performance Indicator                                           |
| MES       | Manufacturing Execution System                                      |
| NBS       | Nash Bargaining Solution                                            |
| NDEA      | Network Data Envelopment Analysis                                   |
| NDEA-OEE  | Network Data Envelopment Analysis - Overall Equipment Effectiveness |
| OEE       | Overall Equipment Effectiveness                                     |
| PCA       | Principal Component Analysis                                        |
| PPM       | Planned Preventive Maintenance                                      |
| SBM       | Slack-Based Model                                                   |
| SMED      | Single-Minute Exchange of Die                                       |
| TPM       | Total Productive Maintenance                                        |
| VBA-Excel | Visual Basic for Application - Excel                                |

## SUMÁRIO

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                        | <b>15</b> |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....                            | 15        |
| 1.2 OBJETIVOS.....                                               | 18        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....                 | 18        |
| 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....                                 | 23        |
| 1.5 MÉTODO DE PESQUISA E MATERIAIS UTILIZADOS.....               | 23        |
| 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                   | 25        |
| <b>2. REVISÃO TEÓRICA.....</b>                                   | <b>26</b> |
| 2.1 MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM).....                        | 26        |
| 2.2 EFICIENCIA GERAL DO EQUIPAMENTO (OEE).....                   | 27        |
| <b>3. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS EM REDES.....</b>              | <b>30</b> |
| <b>4. NDEA-OEE – MODELO PROPOSTO.....</b>                        | <b>35</b> |
| <b>5. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA.....</b>                 | <b>38</b> |
| 5.1 INSTÂNCIA 2.....                                             | 44        |
| 5.2 INSTÂNCIA 3.....                                             | 45        |
| 5.3 INSTÂNCIA 4.....                                             | 46        |
| 5.4 DEFINIÇÃO DE METAS E PRIORIZAÇÃO.....                        | 48        |
| <b>6. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....</b>                         | <b>50</b> |
| <b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b> | <b>53</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                          | <b>55</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

No cenário de negócios pós-pandemia, as empresas, especialmente as indústrias automotivas, enfrentam desafios constantes para aumentar sua competitividade e produtividade, enquanto buscam reduzir desperdícios e perdas nos processos produtivos. De acordo com Nallusamy (2018), essas dificuldades estão frequentemente relacionadas ao desempenho dos equipamentos, incluindo falhas mecânicas, necessidade de manutenção e problemas de qualidade, que resultam em retrabalho e rejeição de produtos.

Quando surgem problemas de capacidade, as empresas recorrem a medidas como o aumento da força de trabalho, a realização de horas extras e investimentos em novos equipamentos (Nallusamy, 2018). No entanto, o autor sugere que as organizações devem concentrar seus esforços na otimização do uso dos recursos existentes e na redução das perdas nos processos, destacando o uso de ferramentas Lean como uma alternativa viável.

Dessa maneira, em um ambiente de recursos escassos e elevada competitividade, a avaliação da eficiência das organizações torna-se crucial para sua sobrevivência e desempenho no mercado (Alam; González; Raman, 2023). A alocação eficiente de recursos e a análise contínua de eficiência são práticas essenciais adotadas por organizações de alto desempenho (Alam; González; Raman, 2023).

As empresas de produção em massa devem priorizar o aumento da eficiência tanto na utilização de equipamentos quanto de recursos humanos, além de aperfeiçoar o consumo de insumos (Pandhare *et al.*, 2024). Nesse contexto, a adoção da Eficácia Geral do Equipamento (OEE), um conceito derivado da Manutenção Produtiva Total (TPM), destaca-se como uma abordagem fundamental para enfrentar esses desafios (Silva *et al.*, 2021).

O OEE emerge como o parâmetro definitivo para avaliar a eficiência na manufatura, e em termos simplificados, ele reflete a proporção do tempo de produção que resulta em produtividade tangível (Nallusamy, 2016). Uma pontuação de OEE de 100% indica que a produção é composta exclusivamente por peças de alta qualidade, fabricadas na velocidade ideal e sem qualquer tempo de inatividade (Nakajima, 1989).

Na terminologia do OEE, isso se traduz em 100% de Qualidade (produzindo apenas peças boas), 100% de Desempenho (operando na velocidade máxima) e 100% de Disponibilidade (sem tempo de inatividade). A medição do OEE representa o ápice da metodologia de fabricação, permitindo a análise sistemática das perdas associadas, o que proporciona valiosos insights para

melhorias contínuas no processo de produção (Eswaramurthi e Mohanram, 2013). O OEE é, portanto, uma métrica essencial para identificar perdas, comparar progressos e aprimorar a produtividade dos equipamentos de fabricação, erradicando eficazmente as ineficiências (Ferko e Znidarsic, 2007).

Nesse cenário, o uso de ferramentas de gerenciamento de desempenho, como os Indicadores-Chave de Desempenho (Key Performance Indicator - KPIs), representa uma estratégia eficaz para alcançar vantagens econômicas, operacionais e ambientais (da Silva *et al.*, 2022; Ferraro *et al.*, 2023). De acordo com os autores, entre todos os KPIs, o OEE se destaca como um dos mais adequados para medir a utilização de ativos industriais.

O equipamento é um componente crítico de qualquer sistema de produção, influenciando diretamente a qualidade e o custo do produto, e desempenha um papel fundamental na produtividade geral de uma planta de manufatura. A utilização do OEE surge, portanto, como uma ferramenta essencial para identificar eficientemente gargalos na linha de produção, avaliando de forma abrangente três aspectos vitais: disponibilidade, desempenho e taxa de qualidade da produção (Zubair *et al.*, 2021).

O OEE permite a avaliação das perdas de desempenho e serve como base para identificar iniciativas de melhoria. No entanto, a adoção de diferentes sistemas de medição de OEE pode resultar em projetos de melhoria divergentes, uma vez que sistemas inadequados podem levar ao tratamento de problemas irrelevantes. Portanto, é essencial compreender as variações do OEE para selecionar o sistema de medição mais adequado, direcionando os esforços de melhoria para os processos menos eficientes (Kechaou *et al.*, 2024). O TPM e a manutenção preventiva planejada (PPM) compartilham o mesmo objetivo de implementação (Khalili *et al.*, 2023). Nesta dissertação, o foco está na avaliação da eficácia de máquinas de usinas de dosagem, comparando o OEE antes e após a implementação do PPM para evidenciar o impacto da manutenção planejada na eficácia das máquinas.

As mudanças tecnológicas estão transformando modelos de negócios, como redes de manufatura distribuídas, que se beneficiam da manufatura aditiva (Additive Manufacturing - AM) para transitar de uma produção centralizada para uma produção descentralizada (da Silva *et al.*, 2021; Mendonça *et al.*, 2022). Este trabalho propôs uma abordagem para a aplicação do OEE como uma abordagem de tomada de decisão em redes de manufatura distribuídas baseadas na manufatura aditiva, explorando as tecnologias da indústria 4.0 (Fatorachian e Kazemi, 2018; Ferreira *et al.*, 2020; Ghobakhloo *et al.*, 2023) aplicadas ao contexto da digitalização dos sistemas de produção em mercados flexíveis.

Embora o OEE seja amplamente adotado na prática industrial, considerando diferentes fatores de ineficiência, seu uso para apoiar a tomada de decisões relacionadas a ativos apresenta duas principais limitações no ciclo de vida (Roda e Macchi, 2019). Primeiramente, ele é restrito ao nível do equipamento, sem considerar a complexidade típica dos sistemas de produção. Em segundo lugar, é tradicionalmente calculado por meio de uma análise ex-post de dados, o que o torna insuficiente para decisões no início do ciclo de vida do ativo (Roda e Macchi, 2019).

Nesse contexto, a Análise Envoltória de Dados (Data Envelopment Analysis - DEA) surge como um método quantitativo eficaz de avaliação de eficiência, permitindo a identificação de unidades eficientes e ineficientes dentro de um conjunto específico, levando em consideração uma ou mais variáveis de entrada e saída (Alam; González; Raman, 2023).

A DEA é um método quantitativo que emprega otimização linear para aprimorar processos de análise de eficiência, com o objetivo de identificar as Unidades de Tomada de Decisão (DMUs) eficientes. Do ponto de vista estatístico, a DEA constitui um método de análise não paramétrica, amplamente aceito por empresas que o utilizam para avaliar a eficiência relativa no processo de tomada de decisão. Esse Método pode ser aplicado tanto no setor público quanto ao privado (Silva *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019 e Lafuente *et al.*, 2022).

Nessa abordagem de modelos DEA de um estágio, cada DMU é tratada sem considerar as características de sua estrutura organizacional interna, o que não permite a identificação de possíveis causas de ineficiências (Färe; Grosskopf, 2000, Kao; Hwang, 2008, Kao e Hwang, 2010, Kao, 2014, Lim; Zhu, 2019). Para abordar essa dificuldade, os modelos NDEA (Network Data Envelopment Analysis – NDEA) surgiram propondo uma abordagem na qual cada DMU é vista como uma rede de subprocessos ou estágios. A principal razão para tal abordagem alternativa é permitir a exploração das estruturas internas das DMUs na análise de suas eficiências, decompondo o valor geral de eficiência da DMU em termos dos valores de eficiência relativos aos diferentes estágios considerados (Färe; Grosskopf, 2000).

Assim, nesses modelos NDEA, cada estágio pode ter diferentes variáveis exógenas de entrada e saída, que serão conectadas entre si por meio de variáveis intermediárias, chamadas de produtos intermediários ou endógenos (Kao, 2014; Cook *et al.*, 2010).

Uma vantagem adicional da NDEA em comparação com a DEA clássica está em sua capacidade de avaliar precisamente a eficiência em vários estágios ou redes, enquanto a DEA clássica é limitada a modelar apenas um único estágio.

Diante deste contexto, tem-se às seguintes questões de Pesquisa:

- De que maneira a NDEA-OEE pode complementar a análise convencional de OEE para melhorar a tomada de decisões em máquinas industriais?

- Como desenvolver uma estrutura de rede de dois estágios que possibilite a integração da NDEA com o OEE?
- Como correlacionar as eficiências dos dois estágios com o OEE, visando avaliar as implicações gerenciais da abordagem proposta?
- Como implementar computacionalmente a abordagem sugerida?

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é propor uma abordagem inovadora para a avaliação do desempenho da Eficácia Geral do Equipamento (OEE), utilizando a Análise de Envoltória de Dados em Rede (NDEA).

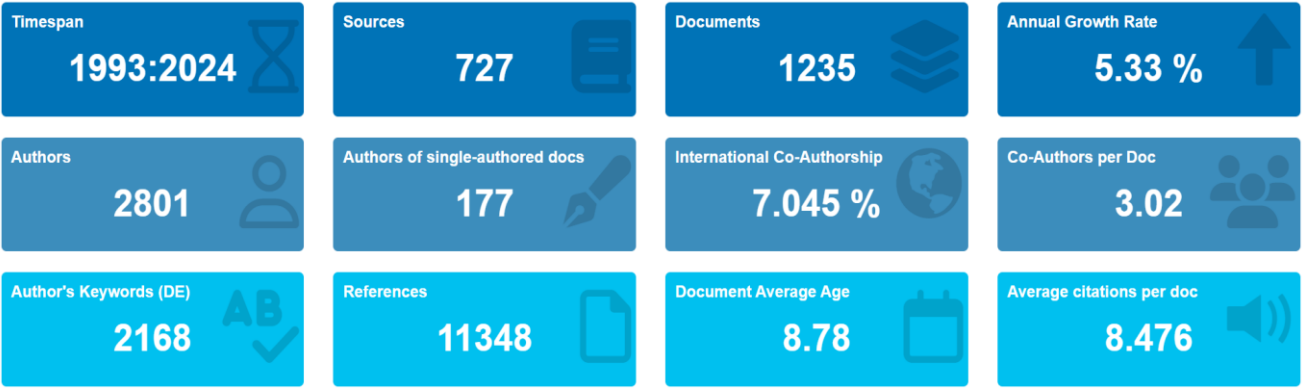
Considerando o exposto e em consonância com o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar um modelo NDEA com rendimentos constantes de escala combinado com o OEE, para avaliar a eficiência de máquinas industriais de médio porte.
- Modelar e otimizar o modelo NDEA utilizando métodos computacionais apropriados.
- Classificar as máquinas entre os estágios e comparar a classificação obtida com a fornecida pelo OEE.
- Analisar as implicações gerenciais dessa abordagem.

## 1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Os bancos de dados Scopus e Web of Science foram usados para pesquisar pesquisas sobre "Overall Equipment Effectiveness", seguido de análise usando a linguagem R com os pacotes Tidyverse e Bibliometrix. Após remover duplicatas, foram avaliados 1.235 documentos abrangendo de 1993 a 2024, originários de 727 fontes distintas, conforme Figura 1. Os dados destacam uma taxa de crescimento anual significativa de 5,33% e uma contagem média de citações por documento de 8.476. Isso ressalta a relevância contemporânea do assunto e enfatiza a necessidade de investigação contínua.

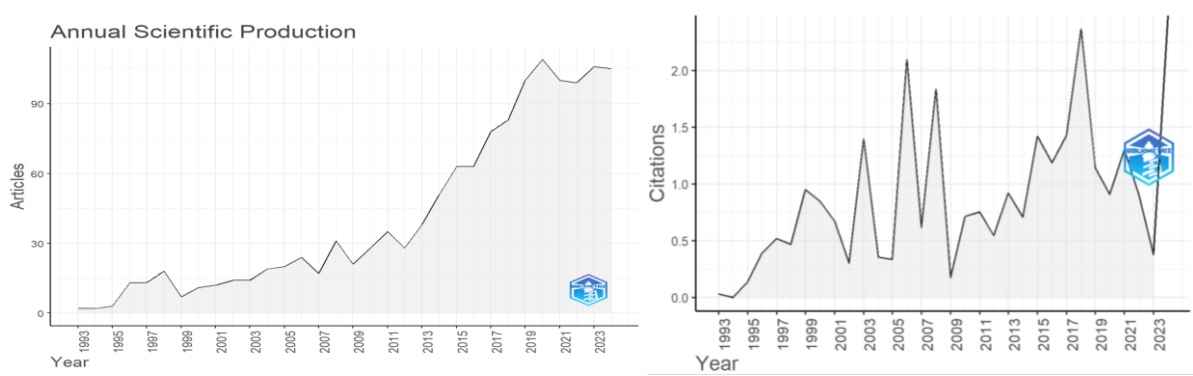
Figura 1 - Visão geral das publicações sobre Eficácia Geral do Equipamento.



Fonte: Scopus e Web of Science.

A Figura 2 complementa as informações da Figura 1, indicando uma tendência de crescimento nas publicações sobre o tema desde o ano 2000. A média de publicações entre os períodos de 2019 a 2023 foi aproximadamente 103,25 publicações maior. Esse contexto ressalta a contemporaneidade do tema, o que reflete diretamente o significativo interesse da comunidade científica.

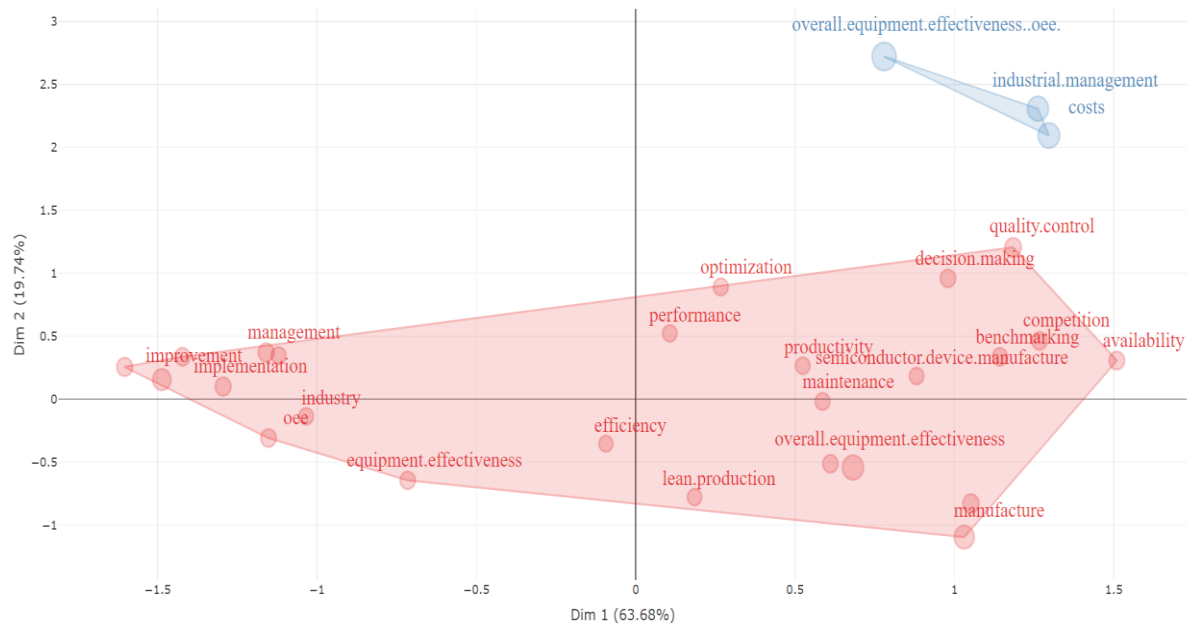
Figura 2 - Produção científica anual e citação média de artigos no geral



Fonte: Scopus e Web of Science.

A Figura 3 fornece uma análise usando Análise de Componentes Principais (Principal component Analysis - PCA). As informações iniciais pertencem à explicação do modelo, em que a soma das duas dimensões produz uma explicação de 83,42%. Em outras palavras, observa-se que os termos "otimização", "eficiência", "benchmarking", "tomada de decisão" aparecem frequentemente na pesquisa de OEE, particularmente dentro do cluster vermelho, e esses termos serão abordados neste estudo.

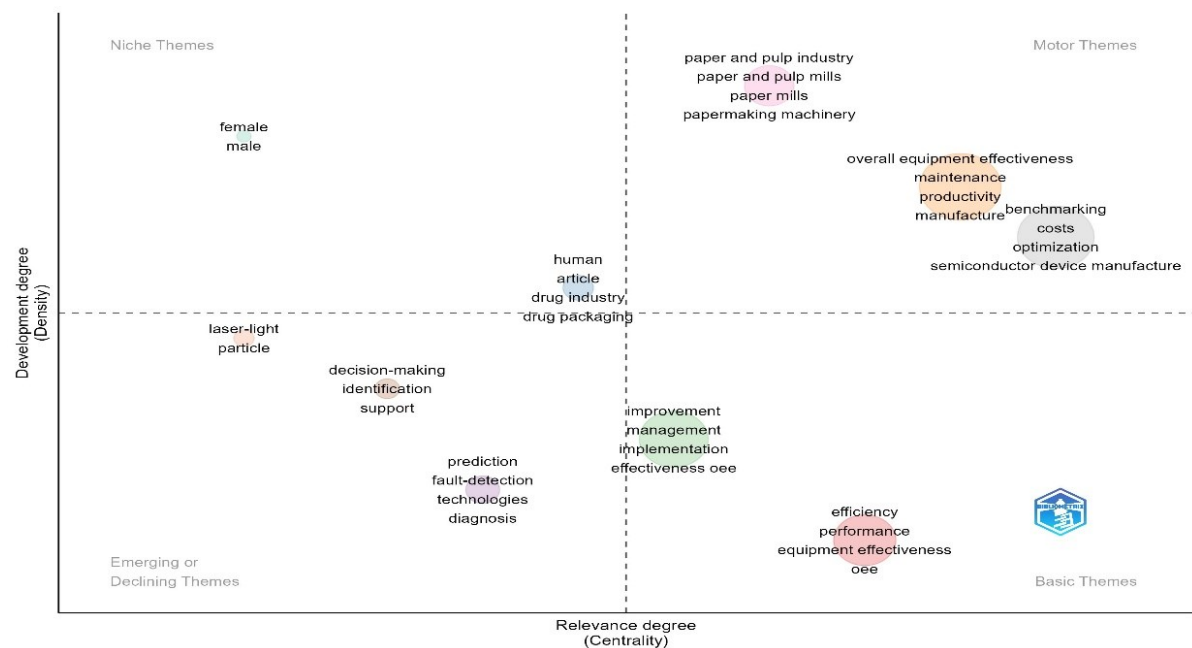
Figura 3 - Análise sobre a eficácia geral do equipamento.



Fonte: Scopus e Web of Science.

A Figura 4 complementa as análises conduzidas na Figura 3. Especificamente, ela destaca a alta relevância e densidade de termos como "otimização" e "Benchmarking", categorizando-os sob a classificação "Temas Motores", o que significa interesse substancial dentro da comunidade científica.

Figura 4 - Mapa Temático sobre Eficiência Geral do Equipamento.



Fonte: Scopus e Web of Science.

Na busca pelas palavras-chave “Overall Equipment Effectiveness” e “Data Envelopment Analysis” nas bases de dados Scopus e Web of Science, foram identificados oito artigos, conforme mostrado pela Tabela 1.

Tabela 1 - Artigos sobre “Eficácia Geral do Equipamento” e “Análise Envoltória de Dados”

| Referência                         | Descrição do Estudo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asadi <i>et al.</i> (2023)         | Neste estudo, o desempenho dos processos é analisado ao longo de vários períodos de tempo, apresentando um modelo multiperíodo baseado na abordagem do casco de descarte livre (FDH), incorporando saídas indesejáveis. As abordagens propostas são usadas na indústria automotiva para analisar o desempenho e as mudanças nas medidas de entrada ao longo de vários períodos de tempo.                                                                                                                          |
| Antunes (2021)                     | Este artigo apresenta um modelo desenvolvido utilizando técnicas DEA e OEE para avaliar a eficiência de unidades de serviço de campo em empresas de distribuição de energia elétrica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Mousavi-Nasab <i>et al.</i> (2020) | Neste artigo, uma abordagem usando um conjunto de vários modelos DEA e solução de negociação de Nash (NBS) é projetada para resolver o problema de alocação de recursos com base no OEE, entre um conjunto de DMUs (unidades de tomada de decisão) comparáveis e uniformes de forma justa.                                                                                                                                                                                                                        |
| Piran <i>et al.</i> (2020)         | O objetivo deste estudo é apresentar uma análise de eficiência para um sistema de produção utilizando DEA e OEE de forma integrada (DEA/OEE). Para atingir este objetivo, foi realizado um estudo de caso de uma fabricante de ônibus e uma análise comparativa utilizando os resultados obtidos por DEA/OEE comparados com os resultados do OEE medidos em uma operação da empresa estudada.                                                                                                                     |
| Mahmoud <i>et al.</i> (2019)       | Neste trabalho, um modelo DEA é integrado ao modelo clássico Overall Equipment Cost Loss para obter valores-alvo como benchmarks. Para validação, o modelo proposto foi implementado em uma empresa de impressão e embalagem. Os resultados mostraram a eficácia do modelo proposto, onde o OECL melhorou em 13,7%.                                                                                                                                                                                               |
| Al-Refaie <i>et al.</i> (2019)     | Este trabalho tem como objetivo identificar as práticas lean e/ou ágeis apropriadas para melhorar o desempenho do processo de envase em uma indústria farmacêutica. Os resultados da simulação mostraram que a pontuação da eficácia geral do equipamento (OEE) para alguns processos de produção foi menor do que os valores mínimos recomendados de classe mundial. Finalmente, o modelo baseado em folga (SBM) na análise de envoltório de dados foi adotado para determinar a melhor alternativa de melhoria. |
| Silva <i>et al.</i> (2017)         | Este trabalho tem como objetivo propor um novo indicador de eficiência, denominado Overall Machinery Effectiveness, para ser aplicado em uma empresa automotiva no Brasil que adotou o indicador Overall Equipment Effectiveness. A empresa estudada disponibilizou dados de produção de dez meses, associados a duas máquinas de Prensa, gerando vinte Unidades de Tomada de Decisão para aplicação dos modelos Data Envelopment Analysis e Bi-Objective Multiple Criteria Data Envelopment Analysis.            |
| Jeonghwan <i>et al.</i> (2011)     | Este estudo pretende medir a eficiência da implementação do TPM usando análise envoltória de dados (DEA) considerando o processo geral de implementação do TPM.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Fonte: Scopus e Web of Science (2024).

A principal contribuição desta pesquisa, comparada aos oito estudos que aplicam DEA combinado com OEE, está na aplicação inovadora de DEA de rede combinado com OEE para avaliar a eficiência de máquinas industriais em dois estágios, conforme demonstrado pela Tabela 2 na linha nº 6.

O OEE é uma métrica abrangente projetada para avaliar a eficiência de máquinas, embora restrita a uma fase singular de produção ou operação. No entanto, ela é insuficiente em abordar as complexidades de sistemas de produção complexos que abrangem vários estágios interconectados ou processos em rede. Dentro desta estrutura, a NDEA-OEE oferece uma abordagem mais detalhada e holística ao reconhecer as interconexões entre vários estágios e distribuir recursos de forma otimizada por toda a rede. Esta sistemática é especialmente benéfica em ambientes de fabricação contemporâneos, frequentemente definidos por suas operações sequenciais e interdependentes (Silva *et al.*, 2017).

Ao usar NDEA-OEE, é possível não apenas identificar a eficiência de cada estágio individual, mas também como esses estágios contribuem para a eficiência da rede como um todo. Isso pode destacar gargalos específicos e oportunidades de melhoria que não seriam aparentes com o uso do OEE tradicional (Silva *et al.*, 2017). Além disso, NDEA-OEE pode ajudar a distinguir entre eficiência técnica (como um estágio usa entradas para produzir saídas) e eficiência de alocação (como as entradas são alocadas entre os estágios para otimizar a saída geral).

Tabela 2 - Análise bibliométrica das publicações

| <b>Pesquisa</b> | <b>Palavras-chaves</b>                                                    | <b>Publicações<br/>Scopus (a)</b> | <b>Publicações<br/>WoS (b)</b> |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1               | "Total Productive Maintenance"                                            | 1169                              | 557                            |
| 2               | " Overall Equipment Effectiveness"                                        | 1.162                             | 581                            |
| 3               | "Data Envelopment Analysis"                                               | 24.995                            | 20.570                         |
| 4               | "Network DEA"                                                             | 851                               | 1.012                          |
| 5               | "Data Envelopment Analysis"<br>and<br>"Total Productive Maintenance"      | 4                                 | 4                              |
| 6               | "Data Envelopment Analysis"<br>and<br>" Overall Equipment Effectiveness " | 8                                 | 8                              |
| 7               | "Network DEA"<br>and<br>"Total Productive Maintenance"                    | 0                                 | 0                              |
| 8               | "Network DEA"<br>and<br>" Overall Equipment Effectiveness "               | 0                                 | 0                              |

Fonte: Scopus e Web of Science (2024).

## 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

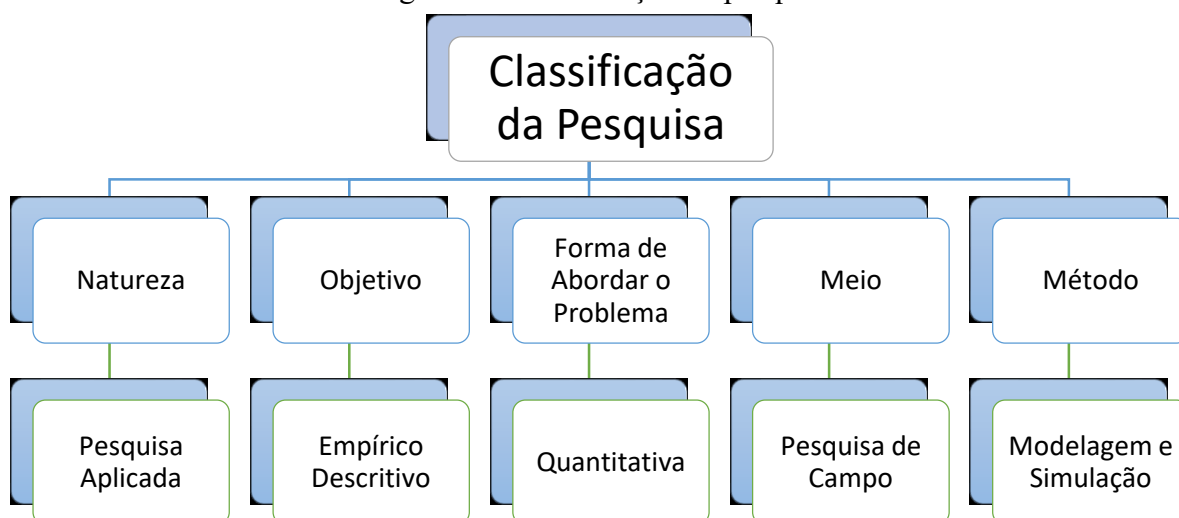
Os dados utilizados para esta análise foram fornecidos por uma empresa do setor de autopeças, permitindo a aplicação prática dos modelos de Análise Envoltória de Dados em Rede (NDEA) empregados nesta pesquisa. Todos os modelos NDEA adotados são de natureza linear, com potencial de aplicação específica no contexto de indústrias do segmento de autopeças, contribuindo para a avaliação e otimização de eficiência em processos produtivos característicos desse seguimento industrial.

## 1.5 MÉTODO DE PESQUISA E MATERIAIS UTILIZADOS

As pesquisas científicas são estudos detalhados que visam alcançar diversos objetivos, entre os quais se destaca a resolução de problemas por meio do método científico, um conjunto de práticas e procedimentos reconhecidos pela comunidade científica (Miguel *et al.*, 2018). De acordo com Miguel *et al.* (2018), as pesquisas científicas podem ser classificadas com base em suas abordagens, naturezas, objetivos e procedimentos.

A Figura 5 apresenta a classificação desta pesquisa, a qual é de natureza aplicada, com objetivos empíricos descritivos. A abordagem do problema é quantitativa, sendo realizada por meio de pesquisa de campo, e o método de pesquisa adotado é a modelagem e simulação (Bertrand; Fransoo, 2002).

Figura 5 - Classificação da pesquisa.



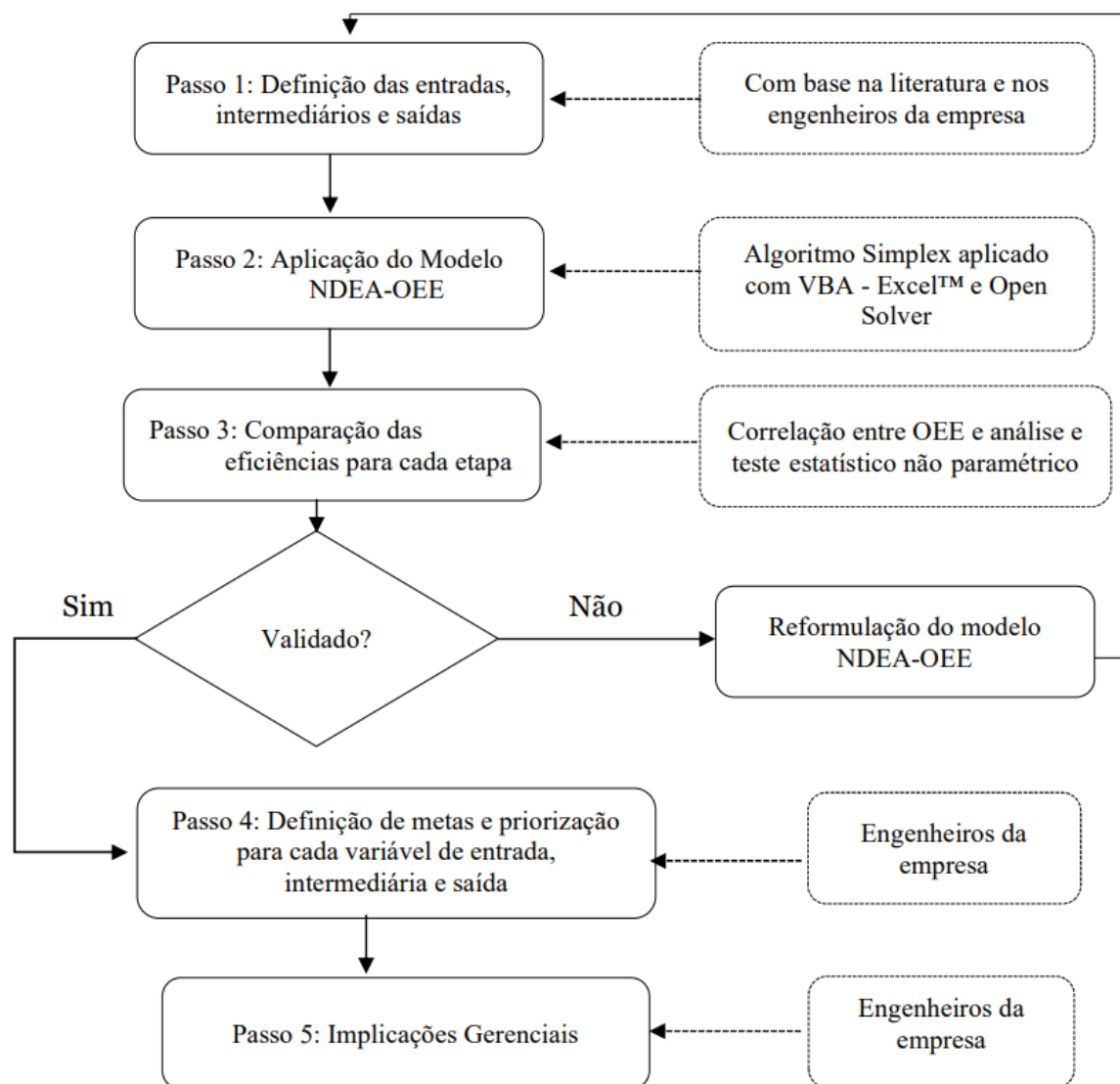
Fonte: Bertrand e Fransoo (2002).

O VBA-Excel (Visual Basic for Applications) é uma ferramenta que permite automatizar tarefas e criar modelos personalizados dentro do Excel, ampliando suas capacidades analíticas. O OpenSolver, um suplemento de código aberto, expande as funcionalidades do Solver tradicional do Excel, permitindo a resolução de problemas de otimização de forma mais eficiente, como programação linear e inteira. Sua principal vantagem é a capacidade de lidar com modelos de maior escala, sem as limitações do Solver padrão, e sua compatibilidade com modelos existentes facilita a transição para soluções mais complexas.

Neste trabalho, as ferramentas VBA-Excel e OpenSolver serão utilizadas para a aplicação do modelo NDEA-OEE proposto, proporcionando uma solução eficiente para a análise de desempenho e otimização de processos de manufatura. A escolha dessas ferramentas se justifica pela sua capacidade de lidar com um elevado número de restrições presentes no modelo, oferecendo flexibilidade e robustez para atender aos requisitos complexos do estudo. Além disso, o VBA-Excel e o OpenSolver se destacam como ferramentas acessíveis e eficazes, amplamente disponíveis e de fácil implementação, tornando-as uma excelente opção para este tipo de análise. Juntas, essas ferramentas oferecem uma abordagem eficaz para automação e análise, sendo amplamente aplicáveis em contextos empresariais e acadêmicos.

A Figura 6 apresenta o fluxograma metodológico da pesquisa realizada, na qual é composta por cinco etapas definidas para a aplicação do NDEA-OEE, iniciando pelo passo 1 onde é realizado as definições das entradas, intermediárias e saídas passando pelos demais passos, chegando ao passo 5 onde os engenheiros da empresa avaliam as implicações gerenciais.

Figura 6 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Próprio autor.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, enquanto o Capítulo 2 dedica-se à revisão teórica, abordando os conceitos e as práticas que fundamentam a base de conhecimento utilizada para a realização desta pesquisa aplicada. O Capítulo 3 aborda a análise envoltória de dados em rede (NDEA), detalhando seus princípios e aplicações. No Capítulo 4, é exposto o modelo proposto para o estudo do NDEA-OEE. O Capítulo 5 descreve e modela o problema investigado. No Capítulo 6, estão as discussões e os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões da pesquisa, além de sugestões para investigações futuras.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos fundamentais da Manutenção Produtiva Total (TPM) e da Eficácia Geral do Equipamento (OEE), duas abordagens essenciais para a melhoria da eficiência e produtividade no ambiente industrial. A TPM, enquanto uma filosofia de gestão focada na otimização do desempenho dos equipamentos e na redução de falhas, desempenha um papel crucial na maximização da disponibilidade e confiabilidade dos ativos produtivos. Por sua vez, o OEE surge como uma métrica chave para avaliar a eficácia dos processos produtivos, permitindo identificar e quantificar as perdas associadas à produção, além de fornecer uma visão clara sobre a eficiência global dos equipamentos. Ao longo deste capítulo, serão exploradas as interrelações entre esses conceitos, destacando sua aplicação prática e a importância de sua implementação no contexto das operações industriais, visando à melhoria contínua e ao alcance de resultados sustentáveis.

### 2.1 MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM)

A manufatura enxuta (Lean Manufacturing), conforme discutido por Shah e Ward (2003), é uma abordagem multidimensional que envolve a aplicação de um conjunto de ferramentas padrão, como o OEE, Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM), e o sistema Kanban, bem como métodos como a Troca de Moldes em Minutos Únicos (SMED), Manutenção Produtiva Total (TPM) e 5S. Essas ferramentas têm como objetivo alcançar melhorias em produtividade, qualidade e tempo de ciclo ao eliminar desperdícios (Shah e Ward, 2003).

A Manutenção Produtiva Total (TPM) é uma filosofia de gestão que visa à maximização da eficiência dos equipamentos por meio do envolvimento de todos os níveis organizacionais. Sua estrutura baseia-se em oito pilares interdependentes:

- 1- Manutenção Autônoma: promove a capacitação dos operadores para realizarem atividades básicas de manutenção, estimulando a responsabilidade e a identificação precoce de falhas (NAKAJIMA, 1988).
- 2- Manutenção Planejada: busca prevenir falhas por meio de ações sistemáticas baseadas em dados e ciclos de vida dos equipamentos (PINTO; XAVIER, 2015).
- 3- Melhoria Enfocada: foca na eliminação contínua de perdas e falhas crônicas por meio de equipes multifuncionais e metodologias como o PDCA (IIDA, 2002).
- 4- Educação e Treinamento: garante a qualificação técnica dos colaboradores, reforçando os princípios do TPM e promovendo segurança e eficiência (SUZUKI, 1994).

- 5- Controle Inicial: integra a manutenção ao projeto de novos equipamentos, otimizando sua operação e manutenção desde a concepção (MOURA, 2010).
- 6- Manutenção da Qualidade: previne defeitos ao eliminar causas de falhas nos equipamentos que afetam a qualidade do produto (NAKAJIMA, 1988).
- 7- TPM nas Áreas Administrativas: aplica os princípios do TPM a setores de apoio, visando aumentar a eficiência organizacional como um todo (PINTO; XAVIER, 2015).
- 8- Segurança, Meio Ambiente e Saúde Ocupacional: assegura ambientes de trabalho seguros e sustentáveis, promovendo a conformidade legal e o bem-estar (IIDA, 2002).

A Manutenção Produtiva Total (Total Productive Maintenance - TPM) é uma estratégia amplamente adotada para aumentar a eficiência dos processos produtivos, aumentando a produtividade e reduzindo as paradas. Introduzida por Nakajima, integra manutenção preventiva e proativa, envolvendo toda a organização para que os equipamentos operem com desempenho máximo.

O TPM contribui para operações sustentáveis, permitindo práticas enxutas e adaptação a tecnologias da Indústria 4.0, otimizando a eficiência e reduzindo desperdícios de forma ambientalmente responsável (Marques *et al.*, 2023; Ahuja & Khamba, 2021).

A TPM e o OEE estão relacionadas, pois ambas buscam melhorar o desempenho dos equipamentos e reduzir os desperdícios no processo produtivo. Enquanto a TPM foca na eliminação de falhas e paradas por intermédio de manutenções preventivas, o OEE avalia a eficácia dos equipamentos considerando disponibilidade, desempenho e qualidade.

Dessa forma, a aplicação da TPM impacta diretamente no aumento dos índices de OEE, melhorando a eficiência geral e a competitividade na produção (MARQUES *et al.*, 2023; AHUJA; KHAMBA, 2021).

## 2.2 EFICIENCIA GERAL DO EQUIPAMENTO (OEE)

A Eficácia Global dos Equipamentos (OEE) tem sido amplamente utilizada na indústria de manufatura, especialmente no contexto da manutenção dos processos produtivos (Li, 2022). O OEE é considerado o parâmetro padrão para avaliar a utilização de uma operação de manufatura em relação ao seu potencial máximo.

O principal objetivo do OEE é identificar a eficácia de um único ativo ou linha de produção, sendo composto por três elementos fundamentais: 1) **Disponibilidade**, que indica o tempo de operação do equipamento, 2) **Desempenho**, que compara a taxa de produção real com a taxa

teórica, e 3) **Qualidade**, que mede o controle de qualidade dos produtos (Li, Y. H., 2022). A fórmula básica do OEE é expressa como:  $OEE = Disponibilidade \times Desempenho \times Qualidade$ .

Cada um desses componentes está diretamente relacionado a fatores que podem resultar em perdas no processo produtivo. As principais perdas identificadas a partir dessas métricas incluem falhas nos equipamentos (disponibilidade), ajustes de setup (disponibilidade), inatividade e paradas menores (desempenho), redução de velocidade (desempenho), defeitos no processo (qualidade) e redução de rendimento (qualidade) (LI., 2022). Este conceito foi inicialmente introduzido por Nakajima em 1988 dentro da teoria de Manutenção Produtiva Total (TPM), e desde então, tem sido amplamente adotado como um indicador de desempenho no contexto da manufatura (LUOZZO, 2023).

A vinculação de fatores humanos a cada um dos parâmetros do OEE permite às organizações uma compreensão abrangente de como os aspectos relacionados aos operadores influenciam a eficiência dos equipamentos e o desempenho geral da produção (NALLUSAMY, 2018). Além disso, Nakajima estabeleceu um nível de referência para o OEE, denominado "Nível Classe Mundial", que é fixado em 85%, indicando um desempenho considerado excelente no contexto industrial (LUOZZO, 2023).

Embora o OEE tenha sido introduzido por Nakajima em 1988 (Nakajima, 1989) dentro das iniciativas TPM, ainda recebe considerável atenção tanto de acadêmicos quanto de profissionais da indústria (Binti Aminuddin *et al.*, 2016; Ylipää *et al.*, 2017). O OEE é essencial para avaliar como as máquinas são utilizadas de forma eficaz no processo de produção, identificando as perdas de produção que são desmembradas em perdas de disponibilidade, desempenho e qualidade (Muchiri e Pintelon, 2008).

De fato, um padrão internacional, a ISO 22400-2 (2014), propõe uma ampla gama de KPIs numéricos para medir as operações de manufatura. Estes KPIs são úteis para entender e melhorar o desempenho na produção, tanto sob a perspectiva da manufatura enxuta, com foco na eliminação de desperdícios, quanto sob a ótica estratégica das empresas, para alcançar metas corporativas.

O OEE, sem dúvida, goza de ampla consideração e utilização no mundo industrial, devido à sua capacidade de proporcionar uma avaliação precisa e eficaz da eficiência de operações de manufatura (BRAGLIA, 2019). Nesse sentido, Sakamoto (2010) realizou uma análise sobre sete perdas evidentes relacionadas à produtividade e lucratividade, por meio de um diagnóstico ou mapeamento de fluxo de valor, destacando quatro impulsores de produtividade que, ao serem

otimizados, podem resultar em maiores lucros. Além disso, Zandin (2001) dividiu os desperdícios em três categorias: desperdícios relacionados a métodos, desempenho e utilização, não apenas para identificá-los, mas também para buscar melhorias contínuas (ZANDIN, 2001).

### 3. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS EM REDES

O procedimento padrão da Análise Envoltória de Dados (DEA) foca na modelagem e aplicação de dois modelos clássicos, DEA - Retorno Constante à Escala (CRS) e DEA - Retorno Variável à Escala (VRS), propostos por Charnes *et al.*, 1978 e Banker *et al.*, 1984, respectivamente. Esses modelos podem ser formulados tanto na forma multiplicativa quanto na forma de envelope, e ambos podem ser orientados para entrada e saída (Lim e Zhu, 2019; Amaral *et al.*, 2022; Antunes *et al.*, 2023). É interessante notar que os modelos multiplicativo e de envelope são equivalentes com base na teoria da dualidade para problemas de otimização linear (Charnes *et al.*, 1978 e Banker *et al.*, 1984; Sudhaman e Srinarayan, 2016).

A análise da eficiência de sistemas produtivos ou de prestação de serviços é complexa, mas de grande interesse para os gestores das organizações, principalmente quando há muitas variáveis (insumos e produtos) envolvidas e múltiplos objetivos a serem otimizados (Silva *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a DEA busca identificar quais unidades tomadores de decisão (Decision-Making Units - DMUs), das organizações em estudo, são eficientes, bem como quais benchmarks de DMU podem orientar os gestores sobre como transformar uma DMU ineficiente em eficiente.

Dessa forma, a DEA auxilia os gestores a proporem políticas e estratégias que possibilitem a melhoria de processos reais (Azadeh *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2021). Segundo Charnes *et al.* (1978), na avaliação da eficiência e desempenho de DMUs, a DEA define um indicador de eficiência considerando os valores de inputs (x) e outputs (y) relevantes para o desempenho das DMUs.

DEA é um método quantitativo que utiliza otimização linear para otimizar processos de análise de eficiência, cujo objetivo é identificar quais DMUs são eficientes. Do ponto de vista estatístico, DEA é um método não paramétrico de análise, sendo bem aceito por empresas que o aplicam com o objetivo de analisar a eficiência relativa para tomada de decisão, podendo este método ser aplicado tanto o setor público quanto ao privado (Silva *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019 e Lafuente *et al.*, 2022).

As expressões (1) - (4) referem-se ao modelo DEA original apresentado por Charnes *et al.* (1978), que é um modelo multiplicador orientado a entrada com CRS:

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

sujeito a:

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

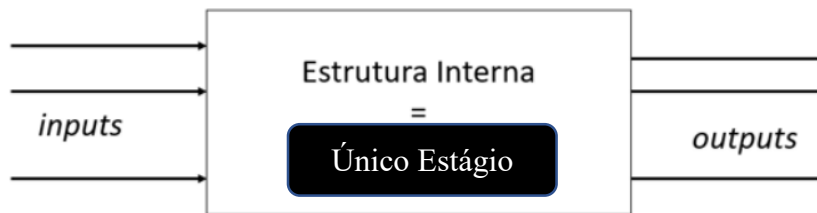
$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (3)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

Sendo,  $j \in \{1, \dots, n\}$  para cada  $j$ -ésima DMU,  $y_{rj}$  é o valor da saída  $r \in \{1, \dots, s\}$ ;  $x_{ij}$  é o valor da entrada  $i \in \{1, \dots, m\}$ ;  $u_r$  é o peso associado à saída  $r$  e  $v_i$  é o peso associado à entrada  $i$ ; e  $y_{r0}$  e  $x_{i0}$  são os valores para a saída  $r \in \{1, \dots, s\}$  e para a entrada  $i \in \{1, \dots, m\}$  da DMU em análise (DMU0), cuja eficiência relativa é representada por  $\theta$ .

A Network Data Envelopment Analysis (NDEA) inicial foi desenvolvida por Färe e Grosskopf (2000), que propuseram a abertura do chamado "*one-stage*", conforme Figura 7. Os primeiros trabalhos utilizando NDEA buscavam a solução de um modelo DEA para cada estágio de forma independente, desconsiderando a continuidade das relações entre os estágios (Kao; Hwang, 2008).

Figura 7 - Estrutura geral dos modelos clássicos DEA (CCR e BCC).



Fonte: Färe e Grosskopf (2000)

Nessa abordagem de modelos NDEA de um estágio, cada DMU é tratada sem considerar as características de sua estrutura organizacional interna, o que não permite a identificação de possíveis causas de ineficiências (Färe; Grosskopf, 2000, Kao; Hwang, 2008, Kao e Hwang, 2010, Kao, 2014, Lim; Zhu, 2019).

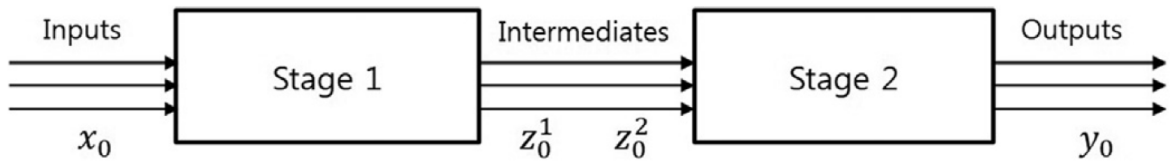
Para abordar essa dificuldade, os modelos NDEA surgiram propondo uma abordagem na qual cada DMU é vista como uma rede de subprocessos ou estágios. A principal razão para tal abordagem alternativa é permitir a exploração das estruturas internas das DMUs na análise de

suas eficiências, decompondo o valor geral de eficiência da DMU em termos dos valores de eficiência relativos aos diferentes estágios considerados (Färe; Grosskopf, 2000).

Assim, nesses modelos NDEA com mais de um estágio, cada estágio pode ter diferentes variáveis exógenas de entrada e saída, que serão conectadas entre si por meio de variáveis intermediárias, chamadas de produtos intermediários ou endógenos (Kao, 2014; Cook *et al.*, 2010).

A Figura 8 descreve uma rede de dois estágios em que, especificamente, no primeiro estágio, há parâmetros de entrada exógenos dados por  $x_0$ , e parâmetros de produto intermediários  $z_0^1$  e  $z_0^2$ , que são os parâmetros de entrada endógenos do segundo estágio que, por sua vez, terão parâmetros de saída exógenos, representados por  $y_0$  (Lim e Zhu, 2019).

Figura 8 - Um processo serial de dois estágios.



Fonte: Lim and Zhu (2019).

Färe e Grosskopf (2000) propuseram uma Network Data Envelopment Analysis (NDEA) de um estágio, conforme ilustrado anteriormente na Figura 8. Esses primeiros trabalhos usando NDEA buscavam a solução de um modelo DEA para cada estágio de forma independente, desconsiderando a continuidade dos relacionamentos entre os estágios. Recentemente, uma estrutura de rede de dois estágios (ver Figura 8) tem sido amplamente estudada como uma estrutura básica para redes DEA (Lim; Zhu, 2019).

Kao e Hwang (2008) apresentaram o modelo relacional multiplicativo para a formulação NDEA, com base no modelo DEA-CRS com orientação ao *input*, e que é dado em (5) - (11):

$$\text{Max } \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (5)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{d=1}^e w_d z_{dj} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (9)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$w_d \geq 0, d = 1, 2, \dots, e \quad (11)$$

Sendo  $d$  é o índice associado aos produtos intermediários (entradas e saídas) ou endógenos  $d \in \{1, \dots, e\}$ ;  $Z_{dj}$  é o valor da entrada ou saída intermediária  $d \in \{1, \dots, e\}$  para a  $j$ -ésima DMU  $j \in \{1, \dots, n\}$ , e  $W_d$  é o peso associado ao produto intermediário  $d \in \{1, \dots, e\}$ .

Os outros índices, parâmetros e variáveis são análogos ao modelo (1) - (4).

Sabe-se que os pesos ótimos no modelo (5) - (11) podem não ser únicos, assim como a decomposição da eficiência global  $\theta^*$  das eficiências, de cada estágio  $\theta_1$  e  $\theta_2$  também pode não ser única. Em qualquer caso, Kao e Hwang (2008) propuseram calcular as eficiências individuais pelas expressões (12) e (13) e calcular a eficiência global  $\theta^*$  por (14):

$$\theta_1 = \sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} / \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} \quad (12)$$

$$\theta_2 = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} / \sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} \quad (13)$$

$$\theta^* = \theta_1 \times \theta_2 \quad (14)$$

Para obter a formulação matemática do modelo NDEA - VRS, com orientação ao *input*, é necessário fazer as seguintes modificações no modelo de (5) - (14), conforme apontado por Chen *et al.* (2009) e Lim e Zhu (2019):

$$\text{Max } \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + \eta_1 + \eta_2 \quad (15)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} + \eta_1 \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$\sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \eta_2 \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (19)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$$w_d \geq 0, d = 1, 2, \dots, e \quad (21)$$

$$\eta_1, \eta_2 \in \mathbb{R} \quad (22)$$

$$\theta_1 = \left( \sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} + \eta_1 \right) / \sum_{i=1}^m v_i X_{i0} \quad (23)$$

$$\theta_2 = \left( \sum_{r=1}^s u_r Y_{r0} + \eta_2 \right) / \sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} \quad (24)$$

$$\theta^* = \sum_{r=1}^s u_r Y_{r0} + \eta_1 + \eta_2 \quad (25)$$

As modificações feitas no modelo (5) - (14) - CRS, e no modelo (15) - (25) - VRS, são: a inclusão dos fatores de escala  $\eta_1$  e  $\eta_2$ , que são variáveis livres no modelo, ou seja, pertencem ao conjunto dos números reais. A outra modificação está no cálculo da eficiência do estágio, onde a eficiência global é a própria função objetivo.

#### 4. NDEA-OEE – MODELO PROPOSTO

O modelo NDEA delineou um link lógico claro entre os recursos utilizados na determinação da disponibilidade, qualidade e desempenho, e o OEE geral da empresa.

A seguir, apresenta-se a estrutura do modelo proposto NDEA – OEE.

$$\text{Min } \theta = \left( \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} - \eta_1 \right) / \sum_{d=1}^e w_d z_{d0} \quad (26)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \eta_1 / \sum_{d=1}^e w_d z_{dj} \geq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

$$w_d \geq 0, \quad d = 1, 2, \dots, e \quad (29)$$

$$\eta_1 \in \mathbb{R} \quad (30)$$

Os índices, parâmetros e variáveis são análogos ao modelo (1) - (11). A variável  $\eta_1$  representa o fator de escala associado ao estágio 1.

O Modelo (26) - (30) é um modelo multiplicador de programação fracionária com orientação de saída e retornos variáveis de escala (VRS).

$$\text{Max } \theta = \left( \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + \eta_2 \right) / \sum_{d=1}^e w_d z_{d0} \quad (31)$$

sujeito a:

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} + \eta_2 / \sum_{d=1}^e w_d z_{dj} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (32)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (33)$$

$$w_d \geq 0, \quad d = 1, 2, \dots, e \quad (34)$$

$$\eta_2 \in \mathbb{R} \quad (35)$$

Os índices, parâmetros e variáveis são análogos ao modelo (1) - (11). A variável  $\eta_2$  representa o fator de escala associado ao estágio 2.

Pretende-se encontrar simultaneamente uma solução que busque a melhor eficiência tanto para o primeiro quanto para o segundo estágio, de forma a respeitar as restrições que garantem que a eficiência de cada estágio interno seja igual ou menor que 1.

O Modelo (31) - (35) é um modelo multiplicador de programação fracionária com orientação de entrada e retornos variáveis de escala (VRS).

Como os denominadores das funções (27) e (32) são os mesmos, é possível linearizar o modelo, conforme mostrado em (36) - (44).

$$\text{Min} = \sum_{r=1}^s v_i x_{i0} - \eta_1 \quad (36)$$

$$\text{Max} = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + \eta_2 \quad (37)$$

sujeito a:

$$\sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} = 1 \quad (38)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} + \eta_2 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (39)$$

$$\sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i Z_{di} + \eta_1 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (40)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (41)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (42)$$

$$w_d \geq 0, \quad d = 1, 2, \dots, e \quad (43)$$

$$\eta_1, \eta_2 \in \mathbb{R} \quad (44)$$

O modelo final NDEA-OEE é expresso por (45) a (58).

$$\text{Min} = \delta \quad (45)$$

$$\sum_{r=1}^s v_i x_{i0} - \eta_1 - \delta \leq 1 \quad (46)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + \eta_2 + \delta \geq 1 \quad (47)$$

sujeito a:

$$\sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} = 1 \quad (48)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} + \eta_2 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (49)$$

$$\sum_{d=1}^e w_d Z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i Z_{dj} + \eta_1 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (50)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (51)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (52)$$

$$w_d \geq 0, \quad d = 1, 2, \dots, e \quad (53)$$

$$\eta_1, \eta_2 \in \mathbb{R} - \text{VRS} \quad (54)$$

$$\eta_1 = \eta_2 = 0 - \text{CRS} \quad (55)$$

$$\theta_1 = \sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} / \left( \sum_{i=1}^m v_i X_{i0} - \eta_1 \right) \quad (56)$$

$$\theta_2 = \left( \sum_{r=1}^s u_r Y_{r0} + \eta_2 \right) / \sum_{d=1}^e w_d Z_{d0} \quad (57)$$

$$\theta^* = \theta_1 \times \theta_2 \quad (58)$$

Ao restringir  $\eta_1=\eta_2=0$ , o modelo NDEA com retorno constante à escala CRS - OEE é obtido. A preferência pelo modelo NDEA CRS - OEE sobre o NDEA VRS - OEE é motivada por considerações de retorno à escala (Charnes *et al.*, 1989 e Banker *et al.*, 1984). Por exemplo, o conceito de retornos constantes à escala sugere que um aumento nos insumos produz um aumento proporcional nos produtos quando uma DMU está funcionando em sua capacidade ótima (Silva *et al.*, 2024).

## 5. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Discutir o OEE é crucial porque essa métrica oferece uma perspectiva holística sobre a eficiência operacional do equipamento ou processos de produção. OEE integra três fatores de eficiência primários - disponibilidade, desempenho e qualidade - em uma medida unificada, facilitando uma avaliação abrangente do desempenho do equipamento.

Por meio do monitoramento e aprimoramento do OEE, as empresas podem identificar ineficiências, minimizar o tempo de inatividade, aumentar a produtividade e, finalmente, aumentar a lucratividade. Além disso, o OEE encontra ampla aplicação em diversos setores, abrangendo da manufatura aos serviços, servindo assim como um instrumento valioso para otimizar a eficiência operacional em vários ambientes de negócios (Nakajima, 1989 e Nallusamy, 2016).

Da perspectiva de aplicações gerenciais dentro da empresa em estudo, o uso do NDEA - OEE como um indicador de produção fornece à gerência a capacidade de identificar oportunidades de melhoria e alocar recursos de forma eficiente.

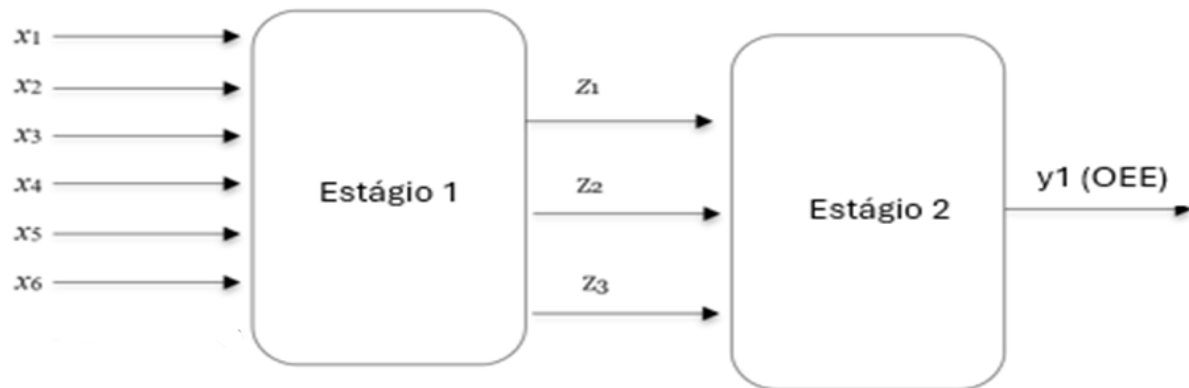
**Etapas 1:** A Figura 9 e a Tabela 3 abrangem a estrutura de rede de dois estágios e a matriz de entradas, intermediários e saídas para o modelo NDEA – OEE.

Este sistema possui entradas exógenas compostas por seis variáveis, denominadas de X1 a X6. A variável X1 representa o tempo efetivo de operação do equipamento, enquanto X2 indica o tempo total programado para produção. A variável X3 é a média de batidas práticas por horas disponíveis, ao passo que X4 é a média de batidas teóricas pelo mesmo período disponível. Já X5 corresponde ao total de itens aprovados, e X6 representa o número total de peças produzidas. As variáveis X1 e X2 são expressas em horas, ao passo que X3, X4, X5 e X6 são quantificadas em unidades produzidas.

As saídas intermediárias são compostas por três variáveis, designadas como Z1, Z2 e Z3, todas expressas em percentuais. A variável Z1 resulta da razão entre as entradas X1 e X2, indicando a disponibilidade do equipamento. A variável Z2, determinada pela razão entre as entradas X3 e X4, reflete o desempenho operacional do equipamento, também em percentual. Finalmente, a variável Z3 é obtida pela razão entre X5 e X6, igualmente expressa em percentual, representando o índice de qualidade do processo.

A saída exógena final, denominada Y1, é calculada pelo produto das variáveis intermediárias Z1, Z2 e Z3, configurando o índice de Eficiência Geral dos Equipamentos (OEE, Overall Equipment Effectiveness). Esse índice representa a eficácia global do equipamento em termos percentuais, refletindo seu desempenho no contexto produtivo.

Figura 9 - Representação do modelo do problema de Análise de Eficiência NDEA - OEE com dois estágios.



Fonte: Próprio autor.

O OEE surge como a métrica por excelência para identificar perdas, comparar o progresso e reforçar a produtividade do equipamento de fabricação, erradicando efetivamente as ineficiências (Ferko e Znidarsic, 2007). No geral, todos esses seis níveis de etapas analíticas tornam possível fornecer informações acionáveis para dar suporte à tomada de decisões, como cronogramas e recomendações de manutenção, plano de produção ideal (Pandhare *et al.*, 2024).

As DMUs são representadas por 7 máquinas operando em 3 turnos ao longo de 4 quinzenas, resultando em um total de 84 DMUs da instância 1.

Tabela 3 - Matriz de entrada, intermediários e saída para a instância 1.

| DMU   | $x_1$<br>[h] | $x_2$<br>[h] | $x_3$<br>[un] | $x_4$<br>[un] | $x_5$<br>[un] | $x_6$<br>[un] | $z_1$<br>[%] | $z_2$<br>[%] | $z_3$<br>[%] | $y_1$<br>[%] |
|-------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1     | 47,68        | 72,00        | 11.491,00     | 12.636, 00    | 11.218,00     | 11.251,00     | 0,66         | 0,91         | 1,00         | 0,60         |
| 2     | 68,72        | 93,17        | 16.904, 00    | 18.209, 00    | 17.277,00     | 17.281,00     | 0,74         | 0,93         | 1,00         | 0,68         |
| 3     | 41,83        | 74,28        | 10.625, 00    | 11.085, 00    | 11.249,00     | 11.321,00     | 0,56         | 0,96         | 0,99         | 0,54         |
| 4     | 54,25        | 85,58        | 14.918, 00    | 14.376, 00    | 14.701,00     | 14.701,00     | 0,63         | 1,04         | 1,00         | 0,66         |
| 5     | 53,53        | 72,47        | 13.276, 00    | 14.186, 00    | 13.254,00     | 13.254,00     | 0,74         | 0,94         | 1,00         | 0,69         |
| ..... |              |              |               |               |               |               |              |              |              |              |
| 82    | 46,38        | 84,73        | 10.992, 00    | 12.291, 00    | 10.942,00     | 10.980,00     | 0,55         | 0,89         | 1,00         | 0,49         |
| 83    | 14,32        | 59,80        | 3.851, 00     | 3.793, 00     | 3.839,00      | 3.839,00      | 0,24         | 1,02         | 1,00         | 0,24         |
| 84    | 50,68        | 82,22        | 12.974, 00    | 13.431, 00    | 12.396,00     | 12.414,00     | 0,62         | 0,97         | 1,00         | 0,59         |

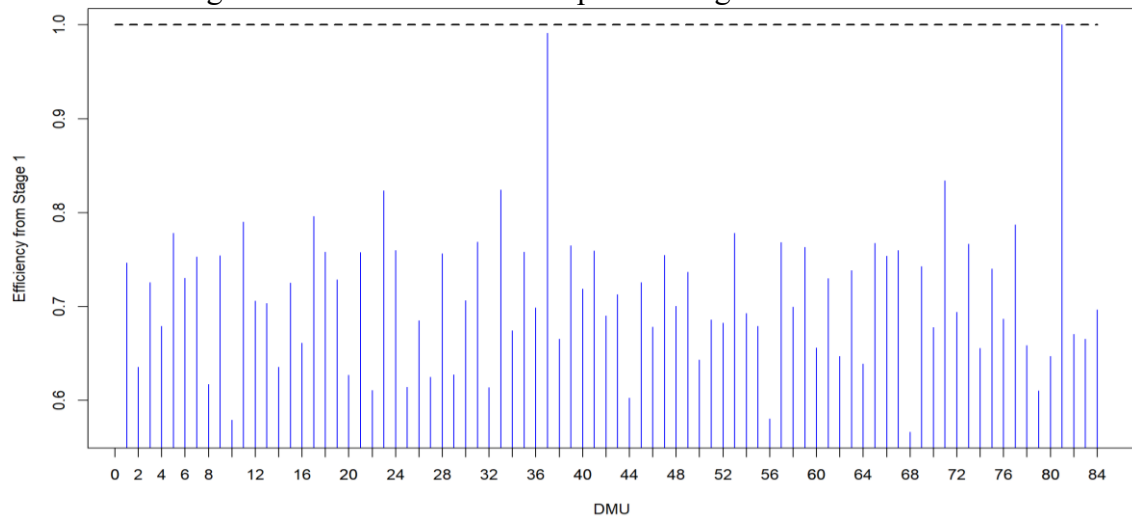
Fonte: Próprio autor.

**Etapa 2:** Nesta etapa, o modelo NDEA – OEE foi otimizado, obtendo vetores de eficiência para cada etapa, bem como o vetor de eficiência geral, conforme ilustrado nas Figuras 10 a 13.

Foi empregada uma máquina com processador Intel Core i9-13900HX 2,20 GHz e 64 GB de RAM, utilizando o Open Solver com o otimizador COIN-OR CBC (<https://www.coin-or.org/Cbc/cbcuserguide.html#id3342315>). O tempo computacional foi de aproximadamente 2 minutos. A escolha do Open Solver foi motivada pelo fato de que o solucionador Excel<sup>TM</sup> manipula no máximo 100 restrições, enquanto este modelo compreende mais de 170 restrições.

**Etapa 3:** Na Etapa 1, entre as 84 DMUs analisadas, apenas 1 foi eficiente, conforme ilustrado na Figura 10. A DMU identificada como eficiente para a etapa 1 foi a DMU {81}.

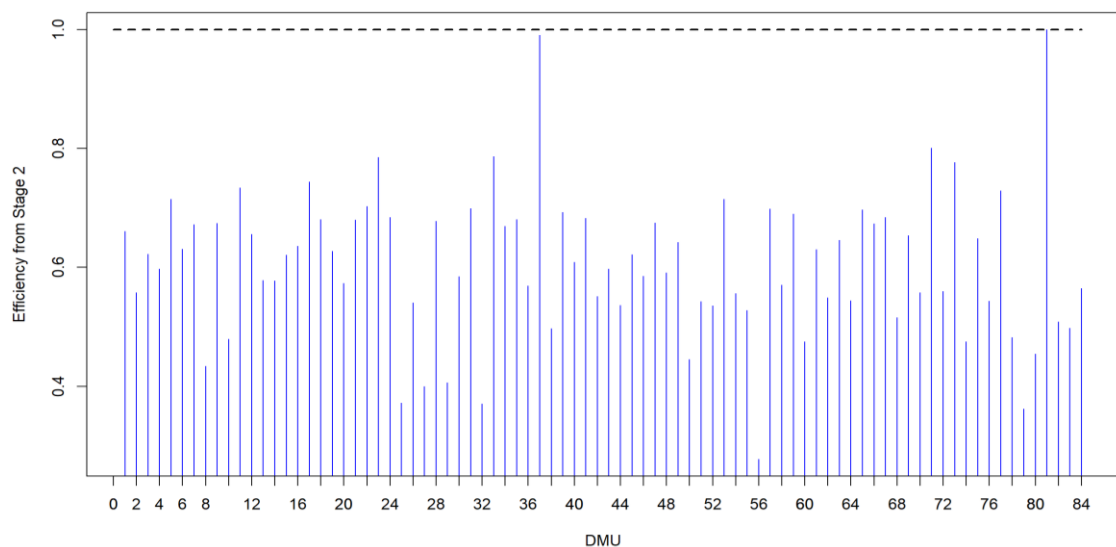
Figura 10 - Vetor de eficiência para o estágio 1 da instância 1.



Fonte: Linguagem R.

No estágio 2 das 84 DMUs analisadas, apenas 1 foi eficiente, conforme ilustrado na Figura 11. A DMU identificada como eficiente para o estágio 1 foi a DMU {81}.

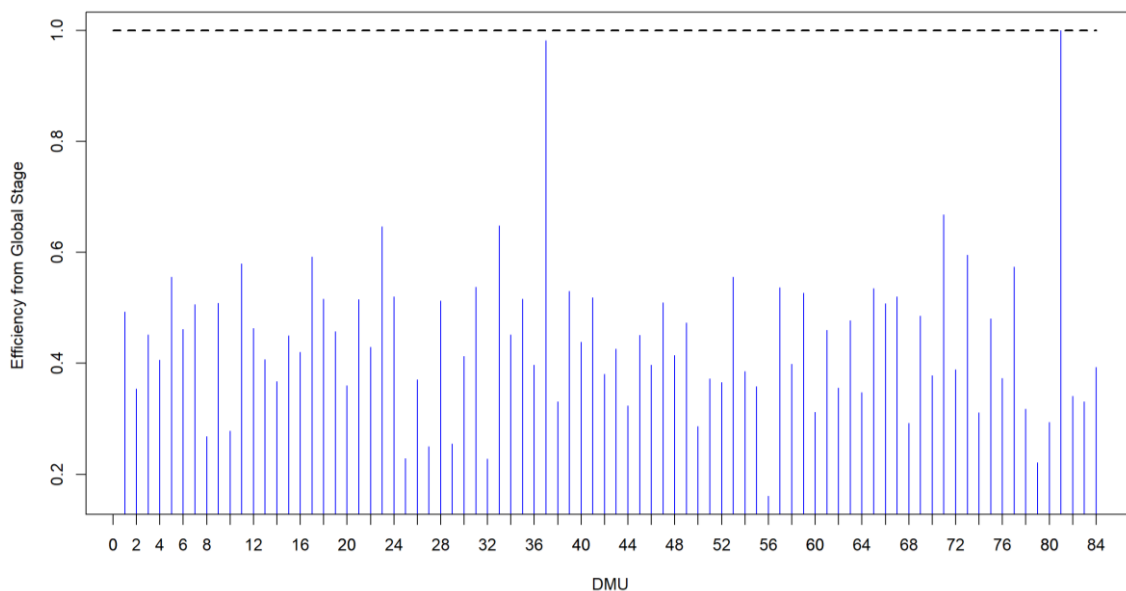
Figura 11 - Vetor de eficiência para o estágio 2 da instância 1.



Fonte: Linguagem R

No estágio global das 84 DMUs analisadas, apenas 1 foi eficiente, conforme ilustrado pela Figura 12. A DMU identificada como eficiente para o estágio 1 foi a DMU {81}.

Figura 12 - Vetor de eficiência para o estágio global da instância 1.



Fonte: Linguagem R

A seguir está uma análise geral comparando todos os estágios, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14. A análise dessas Figuras foi conduzida com base nos vetores de eficiência de cada estágio, onde cada bloco de 12 DMUs representa uma máquina.

Por exemplo, na análise de eficiência, as DMUs {1 a 12} representam a máquina 1, e as DMUs {13 a 24} representam a máquina 2, mantendo a lógica até as DMUs {73 a 84} da máquina 7.

No Estágio 1, a Máquina 3 tem a maior eficiência mínima (61,38%), e a Máquina 6 tem a menor (56,67%). Isso indica que a Máquina 3 tem um melhor ponto de partida em eficiência em comparação com as outras máquinas.

A Máquina 4 e a Máquina 7 têm eficiências máximas excepcionalmente altas, atingindo 99,11% e 100%, respectivamente. Isso pode indicar que, em condições ideais, essas máquinas podem operar com quase perfeição. No geral, as eficiências mínimas (Min) variam de 56,67% a 61,38%, indicando que a Máquina 3 (DMU) tem a maior eficiência mínima e a Máquina 6 a menor neste estágio.

No entanto, as médias são bem próximas, todas em torno de 70%, o que sugere desempenho consistente entre as máquinas em termos de eficiência média. Os máximos (Max) têm uma faixa mais ampla, de 77,80% a 100%, com a Máquina 7 alcançando eficiência perfeita de 100%.

O desvio padrão (DP) em todas as máquinas é muito baixo (variando de 0,06 a 0,10), sugerindo que as eficiências são bem consistentes e não variam muito do valor médio.

Neste estágio, as eficiências mínimas são mais variadas, com a Máquina 5 mostrando a menor eficiência mínima (27,76%) e a Máquina 2 a maior (57,35%). A Máquina 2 mantém uma média alta (65,76%), indicando desempenho confiável, enquanto a Máquina 7 tem a média mais baixa (58,69%).

No geral, para o Estágio 2, a variação nas eficiências mínimas é mais pronunciada, variando de 27,76% a 57,35%, com a Máquina 2 apresentando o melhor desempenho mínimo e a Máquina 5 o pior.

As médias também são mais dispersas do que no Estágio 1, com a Máquina 2 mantendo uma média mais alta de 65,76% e a Máquina 7 a mais baixa em 58,69%. A Máquina 6 e a Máquina 7 têm máximos de 100%, mostrando que podem atingir eficiência perfeita, mas a Máquina 5 tem o menor valor máximo de 71,47%. O Desvio padrão foi maior neste estágio, especialmente para as Máquinas 6 e 7 (ambas com 0,18), sugerindo maior variabilidade na eficiência.

No geral, as análises a seguir para o estágio global mostram que as eficiências mínimas são significativamente menores do que as dos estágios anteriores (1 e 2), com a Máquina 5 tendo a menor (16,12%) e a Máquina 2 a maior (35,96%). Em termos de eficiência média, a Máquina 2 também lidera (47,34%), enquanto a Máquina 5 tem a menor média (39,94%).

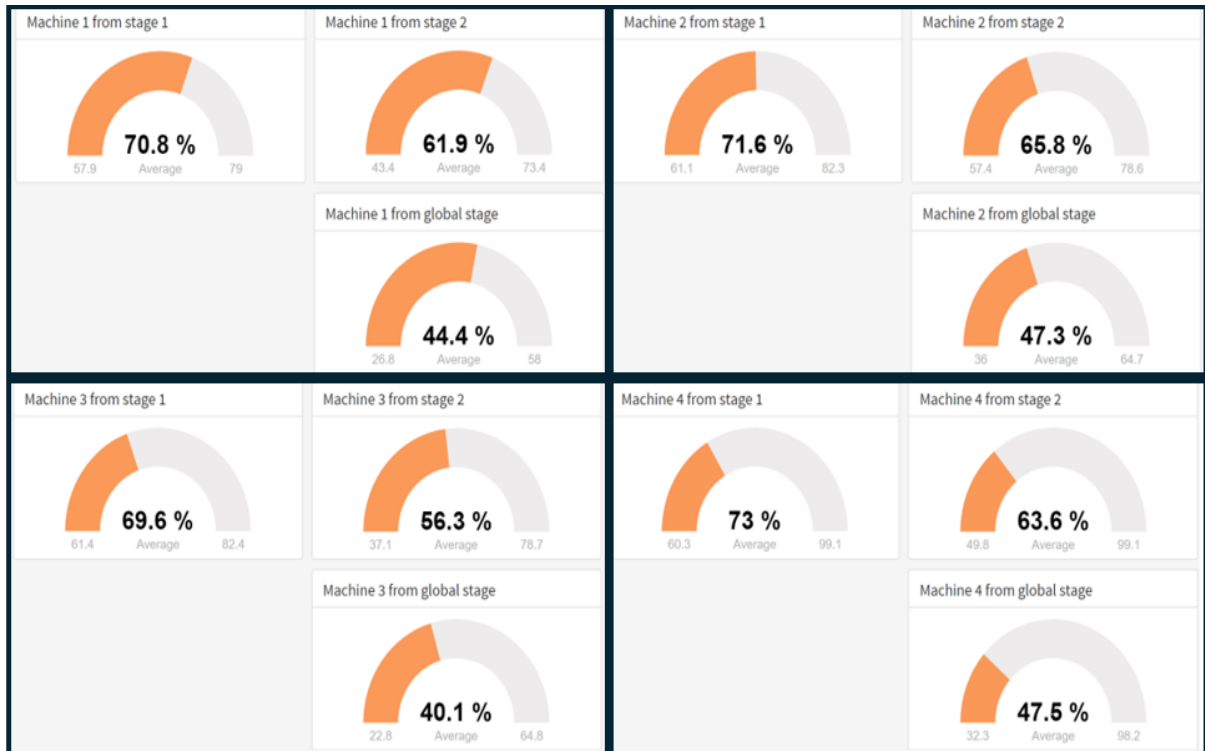
O desvio padrão neste estágio é muito maior para todas as máquinas, particularmente para a Máquina 6 (29,74%), indicando uma variação substancial na eficiência entre os estágios.

A Máquina 2 parece ser a mais consistente em todos os três estágios, mantendo eficiências médias e mínimas relativamente altas e um DP global menor em comparação com outras máquinas. As Máquinas 4, 6 e 7 mostram grande variabilidade em sua eficiência, o que pode ser uma preocupação dependendo de como a variabilidade afeta a produção.

A Máquina 5 pode exigir atenção especial, pois tem as menores eficiências mínima e média nos Estágios 2 e no estágio global. O alto desvio padrão no Estágio Global para várias máquinas indica que pode haver fatores de risco significativos afetando a eficiência que precisa ser identificado e gerenciado.

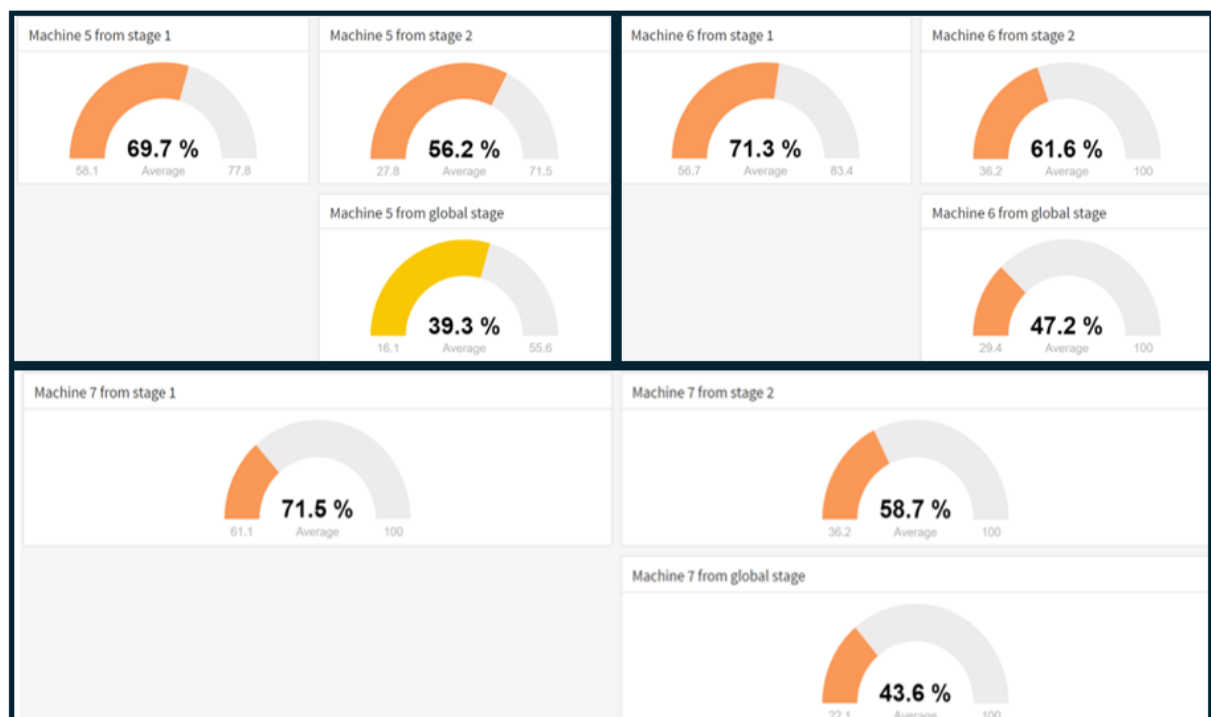
Uma análise mais aprofundada pode incluir a investigação dos fatores que contribuem para a alta variabilidade na eficiência, bem como estratégias para melhorar a consistência do desempenho de máquinas com eficiências mais baixas. Além disso, é importante considerar como essas eficiências afetam os resultados globais e os custos operacionais.

Figura 13 - Painel para cada estágio da máquina 1 a 4.



Fonte: Linguagem R

Figura 14 - Painel para cada estágio da máquina 5 a 7.



Fonte: Linguagem R

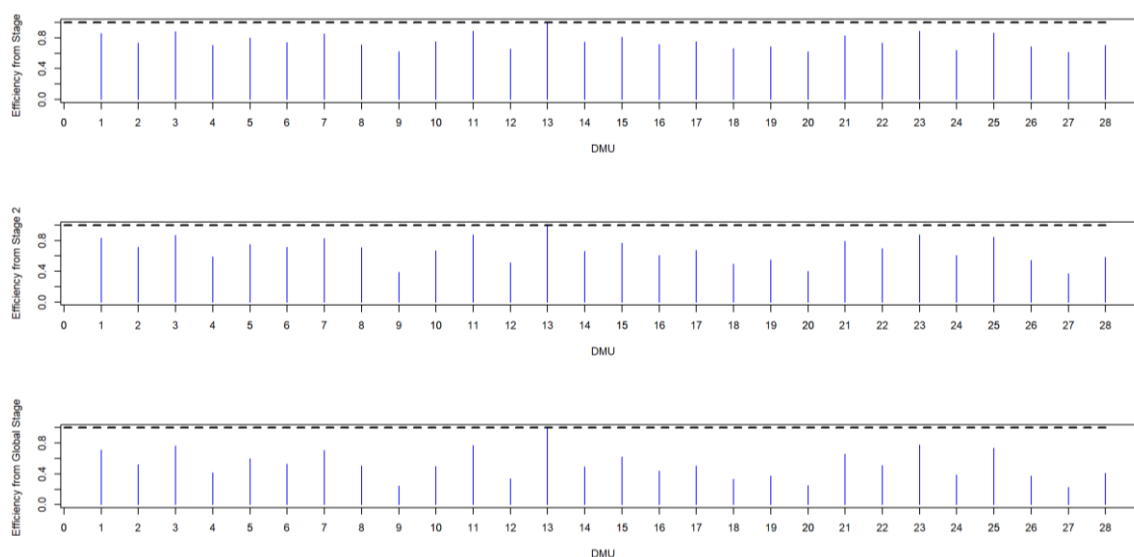
## 5.1 INSTÂNCIA 2

**Etapa 1:** A Instância 2 envolve uma análise de eficiência de todas as máquinas, considerando apenas o primeiro turno em um período de 4 quinzenas.

**Etapa 2:** Nesta etapa, o modelo NDEA – OEE foi otimizado, obtendo vetores de eficiência para cada estágio, bem como o vetor de eficiência geral, conforme ilustrado nas Figura 15.

**Etapa 3:** Em cada estágio, entre as 28 DMUs analisadas, apenas a DMU 13 foi eficiente, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Vetor de eficiência correspondente a cada estágio para a instância 2.



Fonte: Linguagem R

**Estágio 1:** A eficiência varia consideravelmente, com a DMU 13 mostrando eficiência perfeita em 100%, o que é um destaque. A maioria das DMUs tem uma eficiência acima de 70%, indicando um desempenho geralmente bom neste estágio. No entanto, algumas DMUs, como 9, 20 e 27, mostram eficiências menores que 65%, indicando áreas para melhoria.

**Para o Estágio 2:** A eficiência diminui ligeiramente em comparação ao estágio 1 para a maioria das DMUs. Novamente, a DMU 13 mantém 100% de eficiência. DMUs como 9 e 27 experimentam uma queda significativa na eficiência, com valores abaixo de 40%, sugerindo problemas significativos neste estágio que precisam de atenção.

**Estágio Global:** Há uma queda geral na eficiência, o que é esperado, pois pequenas ineficiências em estágios individuais podem ter um efeito composto. Novamente, a DMU 13 se destaca com 100% de eficiência. A maioria das outras DMUs tem uma eficiência global menor

do que suas eficiências no estágio 1 e estágio 2, com várias DMUs caindo abaixo de 50%, indicando que o desempenho pode ser severamente impactado por um ou ambos os estágios.

Pode-se observar que a eficiência tende a diminuir do estágio 1 para o estágio 2 e depois para o Estágio Global. Isso pode indicar que há fatores cumulativos que afetam a eficiência global que podem não ser tão evidentes quando se olha apenas para os estágios individuais.

A DMU 13 é uma exceção notável, mantendo 100% em todos os estágios, sugerindo que eles podem ter otimizado processos ou não enfrentam os desafios que outras DMUs enfrentam.

Para melhorar a eficiência, seria importante analisar mais profundamente os processos específicos em cada DMU e estágio, identificar gargalos e desenvolver estratégias de melhoria. Também é vital investigar por que a DMU 13 é tão eficiente e se suas práticas podem ser replicadas em outras DMUs.

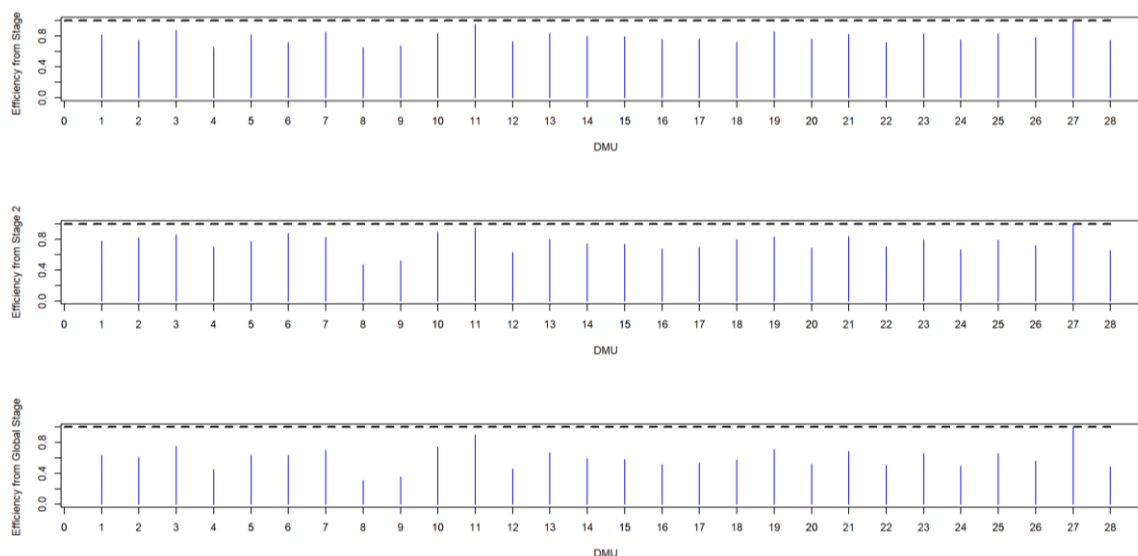
## 5.2 INSTÂNCIA 3

**Etapa 1:** A Instância 3 envolve uma análise de eficiência de todas as máquinas, considerando somente o segundo turno em um período de 4 quinzenas.

**Etapa 2:** Nesta etapa, o modelo NDEA–OEE foi otimizado, obtendo vetores de eficiência para cada etapa, bem como o vetor de eficiência geral, conforme ilustrado na Figura 16.

**Etapa 3:** Em cada Etapa, entre as 28 DMUs analisadas, apenas a DMU 27 foi eficiente, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Vetor de eficiência correspondente a cada estágio da instância 3



Fonte: Linguagem R

**Estágio 1:** Apenas a DMU 27 se destaca com uma eficiência perfeita de 100%. Outras DMUs, como 3, 7, 10, 11 e 19, também apresentam eficiências relativamente altas acima de 85%. Algumas DMUs, como 4, 8 e 28, têm eficiências abaixo de 75%, indicando espaço para melhorias neste estágio inicial.

**No Estágio 2:** A eficiência parece ser geralmente maior do que no Estágio 1 para algumas DMUs, como 6 e 18, sugerindo que elas podem ter processos ou estratégias mais eficazes neste estágio intermediário. Notavelmente, a DMU 27 mantém sua eficiência perfeita. No entanto, DMUs como 8 e 9 registram eficiências bem abaixo de 60%, o que pode indicar desafios significativos neste ponto do processo.

**No Estágio Global:** Há uma tendência geral de que as eficiências sejam menores aqui do que em qualquer estágio individual, o que é esperado devido ao efeito cumulativo de ineficiências em estágios anteriores.

A DMU 27 novamente se destaca com 100% de eficiência, uma conquista impressionante que sugere excelência operacional consistente em todos os aspectos. Muitas DMUs têm eficiências globais acima de 60%, mas algumas, como 8, 9 e 28, ficam abaixo de 50%, destacando áreas que exigem intervenção.

Comparando as eficiências do primeiro turno com as do segundo turno, pode-se observar que as eficiências tendem a ser consistentes entre as DMUs. A DMU 27, que foi a única eficiente no turno 1, continua a ser eficiente no turno 2, enquanto outras DMUs continuam a mostrar áreas de ineficiência em estágios específicos ou em sua eficiência geral.

Para melhorar, seria útil para DMUs com eficiências mais baixas investigar as práticas da DMU 27, assumindo que as condições e contextos são comparáveis, e aplicar aprendizados relevantes aos seus próprios processos. Também seria benéfico realizar uma análise mais detalhada de cada estágio para identificar onde as ineficiências estão ocorrendo e desenvolver estratégias para lidar com elas.

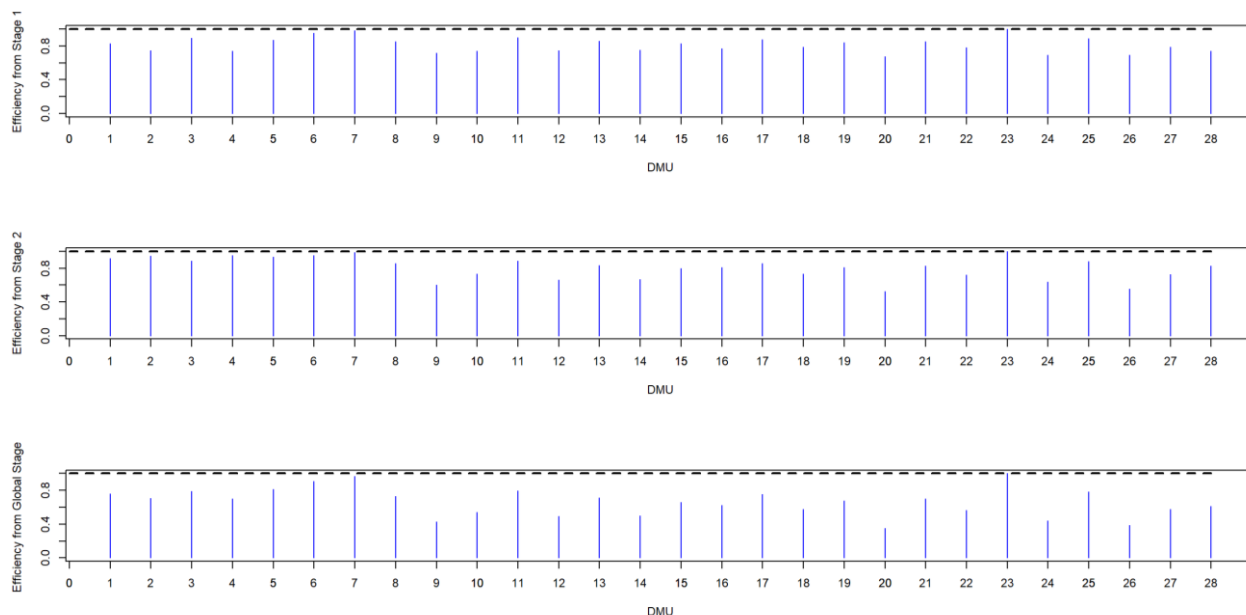
### 5.3 INSTÂNCIA 4

**Etapa 1:** A Instância 4 envolve uma análise de eficiência de todas as máquinas, considerando somente o terceiro turno em um período de 4 quinzenas.

**Etapa 2:** Nesta etapa, o modelo NDEA - OEE foi otimizado, obtendo vetores de eficiência para cada etapa, bem como o vetor de eficiência geral, conforme ilustrado na Figura 17.

Etapa 3: Ao longo de cada fase da análise, entre as 28 Unidades de Tomada de Decisão (DMUs) examinadas, a DMU 23 foi a única unidade a atingir eficiência, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Vetor de eficiência correspondente a cada estágio da instância 4



Fonte: Linguagem R

**Para o Estágio 1:** As eficiências são geralmente altas, com a DMU 7 se destacando com uma eficiência de 98,46%. Isso sugere um desempenho muito forte no primeiro estágio do processo. A maioria das DMUs está acima de 70%, com algumas exceções como DMU 9 e DMU 20, que estão abaixo desse limite.

**No Estágio 2,** várias DMUs mostram eficiência ainda maior do que no Estágio 1, indicando melhoria ou especialização em processos que ocorrem nesta fase. A DMU 7 continua com uma eficiência excepcional de 98,44%, enquanto a DMU 4 tem a maior eficiência em 95,32%. No entanto, algumas DMUs, como 9 e 20, têm eficiências significativamente menores, o que pode apontar para áreas específicas onde podem estar enfrentando desafios.

**No Estágio Global,** observamos as eficiências globais que consideram os dois estágios anteriores. Como esperado, há uma tendência geral de diminuição da eficiência global em comparação aos estágios individuais, devido ao acúmulo de ineficiências. A DMU 7 mantém uma eficiência notável de 96,93%, demonstrando um alto nível de eficácia em todo o processo.

Em contraste, DMUs como 9, com 42,89%, e 20, com 35,37%, têm baixa eficiência global, destacando a necessidade de intervenção e melhoria.

Pode-se notar que algumas DMUs mantêm alta eficiência em todos os estágios, enquanto outras experimentam uma queda significativa na eficiência global. Isso sugere que algumas DMUs estão gerenciando seus processos de forma mais eficiente ou estão menos sujeitas a perdas de eficiência ao longo do tempo.

Para melhorar a eficiência global, DMUs com desempenho inferior precisariam investigar as causas de suas ineficiências em cada estágio e buscar estratégias de melhoria. Isso pode incluir a revisão de processos internos, treinamento de equipe ou implementação de novas tecnologias. A DMU 7, com sua eficiência consistente, pode servir como um modelo para as melhores práticas.

#### 5.4 DEFINIÇÃO DE METAS E PRIORIZAÇÃO

**Etapa 4:** Definindo metas e priorização para cada variável de entrada, intermediários e saída, veja a Tabela 4.

A Tabela 4 contempla o número de DMUs que atribuíram importância aos pesos para as quatro instâncias testadas, ordenadas como 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> mais importantes. Aqui está uma análise com base nos dados atualizados:

Primeira Instância:  $v_2$  e  $u_1$  continuam sendo as mais frequentemente classificadas como os pesos mais importantes, com 84 DMUs cada uma considerando-as sua primeira escolha.

A variável  $W_1$  é quase tão frequentemente selecionada quanto a mais importante, com 83 DMUs fazendo essa escolha. Nesse contexto, as variáveis  $v_2$  e  $u_1$  também têm uma distribuição bastante uniforme entre as outras instâncias (2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>), indicando que são consistentemente consideradas importantes. Enquanto isso,  $W_2$ , semelhante a  $W_1$ , é bastante considerada em todas as instâncias, especialmente como a mais importante e a segunda mais importante.

A variável  $v_1$  apresentou um aumento significativo como o peso mais importante em comparação com a análise anterior, sendo a primeira escolha para 24 DMUs, e  $v_3$  também é considerada importante, mas com menos frequência a escolha principal (1<sup>a</sup>), sendo a primeira escolha para 23 DMUs.

Em relação aos pesos menos valorizados:  $v_4$  não é considerada a primeira escolha por nenhuma DMU e tem muitas poucas indicações nas outras instâncias,  $v_5$  e  $v_6$  raramente são escolhidas como as mais importantes, mas  $v_5$  teve um ligeiro aumento em sua classificação como a mais importante em comparação com dados anteriores.

Tendências gerais:  $W_3$  é a menos frequentemente escolhida como a mais importante, com apenas 18 escolhas para a 1<sup>a</sup> e nenhuma para a 4<sup>a</sup> instâncias, respectivamente.

As variáveis  $v_1$ ,  $v_5$  e  $v_6$  tiveram um aumento no número de vezes em que foram escolhidas como o peso mais importante, embora ainda sejam relativamente menos selecionadas em comparação com  $v_2$ ,  $W_1$  e  $u_1$ .

A partir desta análise, pode-se inferir que os pesos  $v_2$ ,  $u_1$  e  $W_1$  são de importância crítica para a maioria das DMUs em avaliações de desempenho, enquanto pesos como  $v_4$ ,  $v_6$  e, em menor extensão,  $W_3$  são menos priorizados.

A percepção da importância desses pesos pode ser influenciada pela natureza das atividades das DMUs ou pelo contexto operacional em que estão situadas. Esses resultados podem fornecer insights sobre onde as DMUs estão concentrando seus esforços e recursos e onde pode haver oportunidades de melhoria.

Tabela 4 - Análise de pesos de cada variável

| Peso  | Instância      |                |                |                |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> |
| $v_1$ | 24             | 3              | 11             | 10             |
| $v_2$ | 84             | 28             | 28             | 27             |
| $v_3$ | 23             | 20             | 7              | 3              |
| $v_4$ | 0              | 0              | 7              | 1              |
| $v_5$ | 14             | 2              | 2              | 11             |
| $v_6$ | 7              | 2              | 2              | 3              |
| $w_1$ | 83             | 25             | 25             | 28             |
| $w_2$ | 81             | 26             | 25             | 23             |
| $w_3$ | 18             | 8              | 12             | 0              |
| $u_1$ | 84             | 28             | 28             | 28             |

Fonte: Próprio autor.

Na próxima seção foi elaborada com o apoio de engenheiros e especialistas da empresa em estudo (etapa 5). Notavelmente, três desses engenheiros ostentam mais de 25 anos de experiência em tomada de decisão relacionado ao OEE.

## 6. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Este estudo destaca implicações gerenciais significativas para a situação enfrentada pela empresa em questão. Na perspectiva dos especialistas envolvidos, o uso das DMUs de referência, alinhado às metas de desempenho estabelecidas para cada parâmetro, facilita a priorização dos esforços de produção. Isso possibilita um melhor alinhamento com os objetivos estratégicos da organização, garantindo que as operações de fabricação sejam conduzidas de maneira estratégica e orientada para resultados.

Embora o OEE consolide indisponibilidade, desempenho e qualidade em um único índice, ele não detalha os tipos de perdas, o que dificulta a identificação dos fatores que realmente impactam o desempenho. Essa limitação é semelhante às avaliações das DMUs, que também oferecem uma visão geral, sem discriminar as causas específicas das variações de eficiência. Por exemplo, ao analisar 84 DMUs em três turnos de produção, a DMU 81 se destacou por sua eficiência em todos os estágios, mesmo que o OEE convencional sugerisse um desempenho relativamente baixo (OEE de 54,4%). Uma análise mais detalhada, no entanto, revelou um quadro mais completo, indicando que o OEE, embora útil, pode ocultar aspectos essenciais que só são identificados por análises mais específicas, como as realizadas nas DMUs.

Além disso, o OEE, ao se concentrar exclusivamente no desempenho interno da máquina ou do processo, ignora fatores externos que podem impactar significativamente a produção, como variações na demanda, restrições logísticas ou problemas na cadeia de suprimentos. Essa limitação também é observada nas avaliações das DMUs, que, embora forneçam uma visão geral da eficiência, não capturam completamente a influência de elementos externos sobre o desempenho. Um exemplo disso pode ser visto na produção, que, apesar da alta indisponibilidade de equipamentos, superou as expectativas. Isso sugere que o mix de produção desempenhou um papel crucial nesse resultado positivo, implicando, ainda, em um padrão de qualidade mais elevado. A DMU 37, identificada como a segunda mais eficiente na análise inicial, destacou-se principalmente por sua produtividade, um desempenho que não era imediatamente evidente por meio do OEE convencional. Esse exemplo evidencia como o OEE pode omitir influências externas importantes, enquanto as DMUs, ao considerarem um conjunto mais amplo de fatores, oferecem uma compreensão mais precisa do desempenho.

Em contrapartida, a DMU 56 demonstrou a menor eficiência, apresentando baixo desempenho em todos os estágios. Esses resultados foram consistentes, já que as DMUs com menor desempenho de produtividade revelaram problemas em suas operações. Durante o segundo estágio da análise, focado apenas no primeiro turno de produção, a DMU 13 surgiu como a mais

eficiente, atingindo 100% de eficiência e um volume de produção excepcional. Importante ressaltar que a DMU 13 corresponde à DMU 37, que, na primeira análise, foi identificada como a segunda mais eficiente considerando todos os três turnos de produção.

A DMU 23 foi reconhecida pela segunda melhor eficiência, destacando-se pela alta disponibilidade de equipamentos, embora com um volume de produção mais moderado. Em contraste, a DMU 27 apresentou o pior desempenho, enfrentando desafios em todos os três pilares: disponibilidade, volume de produção e qualidade.

Apesar de sua utilidade na avaliação de unidades específicas, o OEE não reflete a eficiência global da fábrica, uma vez que mede apenas o desempenho de unidades isoladas. Aspectos fundamentais, como o balanceamento de linha, gargalos e a sincronização entre processos, não são considerados. Essa limitação sublinha a necessidade de uma abordagem mais abrangente, como a avaliação das DMUs, que considera uma gama maior de variáveis. Confiar unicamente nas métricas tradicionais do OEE pode resultar em conclusões imprecisas, negligenciando a identificação de pontos críticos e dificultando a implementação de práticas de benchmarking com DMUs de excelente desempenho. Portanto, uma análise mais detalhada, como a oferecida pelas DMUs, é essencial para fornecer uma visão mais completa da eficiência operacional e possibilitar a adoção de melhorias fundamentadas em dados mais completos e precisos.

Ao se considerar apenas o primeiro turno de produção, a DMU 13 se destacou com 100% de eficiência e excelente volume de produção, o que ressalta a importância de análises mais detalhadas para a avaliação de desempenho. A DMU 13 (Máquina 4) corresponde à DMU 37 (Máquina 4 na instância 1), que se mostrou a segunda mais eficiente ao ser analisada ao longo de todos os três turnos. Já a DMU 23 (Máquina 6) foi a segunda mais eficiente nesse contexto, destacando-se pela boa disponibilidade do equipamento, mesmo com um volume de produção razoável.

A precisão do OEE pode ser comprometida pela coleta de dados imprecisos, pois depende diretamente da qualidade das informações obtidas. Dados incorretos sobre tempos de parada, rejeitos ou ciclos podem distorcer os resultados, prejudicando a avaliação da eficiência real. Em contrapartida, a análise das DMUs oferece uma visão mais detalhada, como demonstrado pela DMU 27, que obteve o pior desempenho devido a desafios em todos os três pilares: indisponibilidade, volume de produção e qualidade. Esse exemplo reforça a importância de uma abordagem mais profunda para analisar o desempenho. Se confiássemos exclusivamente no OEE tradicional, os resultados poderiam ser enganadores, e a identificação de pontos críticos poderia ser negligenciada. Assim, a análise das DMUs, ao considerar uma gama mais ampla de variáveis,

permite uma identificação mais precisa dos fatores que impactam a eficiência e facilita a implementação de melhorias com base em dados mais completos e consistentes.

Na terceira instância da análise, que considerou o desempenho das 28 DMUs no segundo turno, a DMU 27 (Máquina 7) se destacou, alinhando-se com a DMU 81 ao ser analisada ao longo de todos os três turnos, exibindo 100% de eficiência nas primeiras e últimas instâncias.

A utilidade do OEE para medir a eficiência de uma máquina pode ser distorcida por problemas mais profundos. Uma máquina com um alto OEE pode, na realidade, estar produzindo itens desnecessários ou gerando estoque excessivo, o que, embora represente uma boa performance operacional, não traduz uma verdadeira eficiência para a empresa. Esse aspecto é refletido nas avaliações das DMUs, que, ao considerarem uma gama mais ampla de variáveis, permitem identificar o impacto de fatores externos, como o mix de produção. Em um caso de produção excepcional, por exemplo, a análise tradicional do OEE não teria sido capaz de revelar esse resultado, enquanto o mix de produção foi determinante para o desempenho alcançado. A DMU 11, que se destacou como a segunda mais eficiente, apresentou resultados satisfatórios em termos de disponibilidade, volume produzido e qualidade, demonstrando que, ao considerar não apenas os dados de operação, mas também o contexto mais amplo, é possível obter uma avaliação mais precisa do desempenho geral.

Por fim, o OEE pode ser influenciado por ajustes operacionais, como a redução da velocidade nominal de uma máquina, o que pode aumentar artificialmente o índice de eficiência ao diminuir as perdas por desempenho, sem, no entanto, refletir uma melhoria real na eficiência global. Em contraste, a análise das DMUs oferece uma visão mais precisa, como demonstrado pela DMU 8, que obteve o pior resultado nesta análise DEA OEE. Embora apresentasse um nível razoável de indisponibilidade, a DMU 8 teve excelente produtividade e boa qualidade. Curiosamente, ao analisar o OEE tradicional nesta instância, a DMU 8 parecia alcançar o melhor desempenho (80,4%) entre todas, o que sublinha a relevância de abordagens analíticas mais detalhadas. Esse exemplo evidencia como as DMUs podem identificar nuances e discrepâncias que o OEE convencional não consegue capturar, proporcionando uma avaliação mais fiel da eficiência real.

Na quarta instância analítica, foram examinados os resultados de desempenho das 28 DMUs exclusivamente no terceiro turno. A DMU 23 emergiu como a mais eficiente, atingindo 100% de eficiência.

Esta análise permitiu observar como a variável disponibilidade impacta os resultados produtivos na prensaria em estudo, revelando importantes oportunidades para identificar pontos críticos e gargalos, visando à melhoria contínua dos processos.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base nos testes realizados, bem como na opinião de especialistas, o modelo NDEA CRS - OEE demonstrou ser mais aderente na estimativa da eficiência das máquinas. No entanto, sua implementação requer a coleta e o processamento de uma quantidade significativa de dados de diversas fontes, bem como um profundo entendimento da metodologia e dos resultados obtidos. Apesar desses desafios, o uso do NDEA agrega valor ao fornecer uma visão mais ampla do desempenho da estampagem, contribuindo para a identificação de oportunidades de melhoria e o aprimoramento do processo produtivo geral.

Por outro lado, o NDEA - OEE vai além da identificação de ineficiências do processo, fornecendo insights valiosos para a tomada de decisões da gerência. Isso permite uma análise abrangente da eficiência geral do sistema, identificando não apenas áreas de baixo desempenho, mas também as inter-relações entre diferentes unidades de produção. Dessa forma, o NDEA - OEE fornece à gerência um entendimento mais completo do processo produtivo, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria e a formulação de estratégias mais eficazes para otimizar o desempenho operacional e a competitividade da empresa. Em comparação, o OEE tradicional, ao focar apenas nas ineficiências operacionais do equipamento, pode limitar a visão da gerência e dificultar a identificação de soluções abrangentes para melhorar o desempenho geral da produção.

Do ponto de vista de gerentes experientes e especialistas do setor, integrar a metodologia NDEA - OEE na estrutura estratégica de uma organização pode desbloquear insights essenciais para processos de tomada de decisão em todos os níveis. Essa abordagem não apenas promove uma cultura de melhoria contínua dentro dos domínios operacionais existentes, mas também mantém a promessa de escalabilidade em diferentes unidades de produção dentro da mesma empresa, bem como em toda a sua rede mais ampla de instalações. A implantação da estrutura NDEA - OEE é estrategicamente projetada para agilizar a localização de recursos essenciais dentro do cenário de produção, aumentando assim a resiliência da organização e elevando sua vantagem competitiva. A versatilidade e aplicabilidade do método NDEA - OEE em uma gama diversificada de produtos e procedimentos dentro do escopo da empresa ressaltam seu potencial transformador.

O NDEA - OEE dá à gerência uma compreensão mais completa do processo de produção, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria e a formulação de estratégias mais eficazes para otimizar o desempenho operacional e a competitividade da empresa. Em comparação, o OEE tradicional, ao focar apenas nas ineficiências operacionais dos equipamentos,

pode limitar a visão da gerência e dificultar a identificação de soluções abrangentes para melhorar o desempenho geral da produção.

Como proposta para pesquisas futuras, sugere-se o uso do NDEA - OEE em outros tipos de aplicações, como na indústria siderúrgica, fundição, entre outras. Outra proposta relevante seria a criação de interfaces entre o modelo NDEA-OEE e sistemas de gestão de produção, como o MES (*Manufacturing Execution System*), para possibilitar a integração em tempo real de dados de operação e otimização. Além disso, seria interessante a integração do NDEA com ferramentas de visualização de dados, como o Tableau, proporcionando uma análise dinâmica e intuitiva dos resultados de eficiência. A combinação dessas ferramentas poderia contribuir significativamente para a melhoria contínua e para a tomada de decisões mais eficazes dentro de ambientes produtivos complexos.

Por fim, uma nova linha de investigação consiste na aplicação de um modelo NDEA com entrada compartilhada, no qual variáveis exógenas, que tradicionalmente não são consideradas no cálculo do OEE, mas que têm impacto direto no desempenho, como o tempo de experiência do operador, sejam incorporadas ao modelo. Tal abordagem teria o potencial de aprimorar significativamente a precisão das avaliações de eficiência, permitindo uma análise mais holística e abrangente dos processos produtivos. Isso se justifica pelo fato de o OEE, embora eficaz na mensuração da performance dos equipamentos, desconsiderar fatores humanos essenciais, como a qualificação da equipe, a cultura organizacional e o engajamento dos operadores, os quais influenciam de maneira substancial o desempenho operacional.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, T. E.; GONZÁLEZ, A. D.; RAMAN, S. Benchmarking of academic departments using data envelopment analysis (DEA). **Journal of applied research in higher education**, West Yorkshire, v. 15, n. 1, p. 268–285, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JARHE-03-2021-0087>. Acesso em: 08 fev. 2024
- AL-REFAIE, A.; ABBASI, G.; AL-SHALALDEH, H. Lean and agile practices to improve the performance of filling process via simulation and data envelopment analysis. **Applied sciences**, Switzerland, v. 1, p. 1131, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1199-4>. Acesso em: 17 jan. 2024.
- AMARAL, J. V. S.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. C.; SANTOS, C. H.; SILVA, A. F. Data envelopment analysis for algorithms efficiency assessment in metamodel-based simulation optimization. **International journal of advanced manufacturing technology**, London v. 121, p. 7493-7507, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-022-09864-z>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- ANTUNES, J.; HADI-VENCHEH, A.; JAMSHIDI, A.; TAN, Y.; WANKE, P. TEA-IS: A hybrid DEA-TOPSIS approach for assessing performance and synergy in Chinese health care. **Decision support systems**, Amsterdam, v. 171, p. 113916, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113916>. Acesso em: 08 fev. 2024
- ANTUNES, T. D. S.; PIRAN, F. S.; SILVA, S. G.; LACERDA, D. P. An internal benchmarking efficiency evaluation of a Brazilian electrical distributor using data envelopment analysis (DEA): a case of study. **IEEE Latin America Transactions**, New York, v. 19, n. 3, p. 437-445, 2021. Disponível em: <https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/3533>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- ASADI, F.; KORDROSTAMI, S.; AMIRTEIMOORI, A.; JAHANI SAYYAD NOVEIRI, M. An inverse multi-period FDH model with undesirable outputs. **Croatian operational research review**, Zagreb, v. 14, n. 2, p. 111-124, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17535/corr.2023.0010>. Acesso em: 17 jan. 2024.
- AZADEH, A.; SHAMS MIANAEIA, H.; ASADZADEHA, S. M.; SABERIB, M.; SHEIKHALISHAHI, M. A flexible ANN-GA-multivariate algorithm for assessment and optimization of machinery productivity in complex production units. **Journal of manufacturing systems**, Dearborn, v. 35, p. 46-75, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.11.007>. Acesso em: 26 abr. 2025.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management science**, Linthicum, v. 30, p. 1078-1092, 1984. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2631725?origin=JSTOR-pdf>. Acesso em: 08 fev. 2024
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International journal of operations and production management**, Bradford, v. 22, p. 241-264, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/01443570210414338>. Acesso em: 17 jan. 2024.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C.; UDENIO, M. Model-based research. *In*: KARLSSON, C. (ed.). **Research methods for operations and supply chain management**. New York: Routledge, 3. ed., 2024. p. 274-311.

BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R.; MARRAZZINI, L. Overall task effectiveness: a new Lean performance indicator in engineer-to-order environment. **International journal of productivity and performance management**, Leeds, v. 68, n. 2, p. 407–422, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/IJPPM-05-2018-0192>. Acesso em: 30 jan. 2025.

CAREY, M. A.; STEINER, K. L.; PETRI, W. A. Ten simple rules for reading a scientific paper. **PLOS computational biology**, California, v. 16, n. 7, p. e1008032, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008032>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8). Acesso em: 08 fev. 2024.

CHEN, Y.; COOK, W. D.; LI, N.; ZHU, J. Additive efficiency decomposition in two-stage DEA. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 196, p. 1170-1176, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.011>. Acesso em: 25 jan. 2024.

COOK, W. D.; LIANG, L.; ZHU, J. Measuring performance of two-stage network structures by DEA: a review and future perspective. **International journal of management science**, Linthicum, v. 38, n. 6, p. 423-430, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2009.12.001>. Acesso em: 15 mar. 2025.

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA) - Thirty years on. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 1–17, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2008.01.032>. Acesso em: 21 dez. 2024.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. **Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references, and DEA-solver software**. 2. ed. Berlin: Springer, 2007.

DÍAZ-REZA, J. R.; GARCÍA-ALCARAZ, J. L.; FIGUEROA, L. J. M.; VIDAL, R. P. I.; MURO, J. C. S. D. Relationship between lean manufacturing tools and their sustainable economic benefits. **International journal of advanced manufacturing technology**, London, v. 123, n. 3–4, p. 1269–1284, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10208-0>. Acesso em: 10 dez. 2024.

DOBRA, P.; JÓSVAI, J. overall equipment effectiveness (OEE) complexity for semi-automatic automotive assembly lines. **Acta polytechnica hungarica**, Budapest. v. 20, n.2, 2023. Disponível em: [https://acta.uni-obuda.hu/Dobra\\_Josvai\\_131.pdf](https://acta.uni-obuda.hu/Dobra_Josvai_131.pdf). Acesso em: 25 jan. 2024.

FARÈ, R.; GROSSKOPF, S. Network DEA. **Socio-economic planning sciences**, New York, v. 34, n. 1, p. 35-49, 2000. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0121\(99\)00012-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0121(99)00012-9). Acesso em: 17 jan. 2024.

FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. A critical investigation of industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. **Production planning and control**, London, v. 29, n. 8, p. 633-644, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2018.1424960>. Acesso em: 28 nov. 2024.

FERKO, R.; ZNIDARSIC, A. Using OEE approach for improving manufacturing performance. **Information MIDE**M, v. 37, p. 105-111, 2007. Disponível em: [https://www.midem-drustvo.si/journal\\_papers/MIDEM\\_37\(2007\)2p105.pdf](https://www.midem-drustvo.si/journal_papers/MIDEM_37(2007)2p105.pdf). Acesso em: 13 dez. 2024.

FERRARO, S.; CANTINI, A.; LEONI, L.; CARLO, F. Assessing the adequacy of transportation overall vehicle effectiveness for sustainable road transportation. **International journal of engineering business management**, United Kingdom, v. 15, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/18479790231176783>. Acesso em: 30 jan. 2025.

FERREIRA, W. P.; ARMELLINI, F.; SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: a state-of-the-art review. **Computers and industrial engineering**, New York, v. 149, p. 106868, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>. Acesso em: 21 dez. 2024.

GHOBAKHLOO, M.; IRANMANESH, M.; FOROUGHI, B.; TSENG, M. L.; NIKBIN, D.; KHANFAR, A. A. Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: a comprehensive review and a strategic roadmap. **Production planning and control**, London, v. 36, n. 1, p. 1-31, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2023.2252376>. Acesso em: 10 dez. 2024.

IIDA, T. **TPM: total productive maintenance**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22400-1:2014**: automation systems and integration: key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management: part 1: overview, concepts and terminology. Genebra: ISO, 2014. Disponível em: <http://www.iso.org>. Acesso em: 30 jan. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22400-2:2014**: automation systems and integration: key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management: part 2: definitions and descriptions. Genebra: ISO, 2014. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8a9efc01-6c74-42a2-ad8f->. Acesso em: 21 dez. 2024.

ISKANDAR, B. S.; NUGRAHA, H.; WIDI, D. K. Organizational productivity measurement method applied on electric utility company. *In*: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, p. 1 - 6, 2019, Orlando. **Proceedings** [...]. Tucson: IEEE, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2019.8769052>. Acesso em: 25 jan. 2024.

JAQIN, C.; ROZAK, A.; PURBA, H. H. Case study in increasing overall equipment effectiveness on progressive press machine using plan-do-check-act cycle. **International journal of engineering, transactions b: applications**, Teheran, v. 33, n. 11, p. 2245–2251, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5829/ije.2020.33.11b.16>. Acesso em: 10 dez. 2024.

JEONGHWAN, C.; CHULHYUN, K.; HAKYEON, L. H. Measuring efficiency of total productive maintenance (TPM): a three-stage data envelopment analysis (DEA) approach. **Total quality management and business excellence**, Abingdon, v. 22, n. 8, p. 911-924, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14783363.2011.593865>. Acesso em: 21 dez. 2024.

KAO, C. Network data envelopment analysis: a review. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 239, p. 1-16, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.039>. Acesso em: 17 jan. 2024.

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**, Amsterdam, v. 185, n. 1, p. 418-429, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.041>. Acesso em: 13 dez. 2024.

KAO, C.; HWANG, S.-N. Efficiency measurement for network systems: IT impact on firm performance. **Decision support systems**, Amsterdam, v. 48, p. 437-446, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2009.06.002>. Acesso em: 15 mar. 2025.

KARAKUTUK, S. S.; ORNEK, M. A. A goal programming approach to lean production system implementation. **Journal of the operational research society**, Oxford, v. 74, n. 1, p. 403-416, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01605682.2022.2046518>. Acesso em: 26 abr. 2025.

KHALILI, A.; ISMAIL, M. Y.; RUZMAN, M. A. Planned preventive maintenance effects on overall equipment effectiveness: a case study in Malaysia. **International journal of productivity and quality management**, United Kingdom, v. 38, p. 332-360, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1504/IJPQM.2021.10041483>. Acesso em: 17 jan. 2024.

LI, Y. H.; INOUE, L. C. G. V.; SINHA, R. Real-time OEE visualisation for downtime detection. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN) 2022a, **Proceedings** [...]. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.

LI, Y.; ABTAHI, A. R.; SEYEDAN, M. Supply chain performance evaluation using fuzzy network data envelopment analysis: a case study in the automotive industry. **Annals of operations research**, Amsterdam, v. 275, p. 461-484, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-018-3027-4>. Acesso em: 30 jan. 2025.

LIM, S.; ZHU, J. Primal-dual correspondence and frontier projections in two-stage network DEA models. **Omega**, Oxford, v. 83, p. 236-248, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2018.06.005>. Acesso em: 21 dez. 2024.

LUOZZO, S. D.; POP, G. R.; SCHIRALDI, M. M. The human performance impact on OEE in the adoption of new production technologies. **Applied sciences**, Switzerland, v. 11, n. 18, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app11188620>. Acesso em: 26 abr. 2025.

LUOZZO, S. D.; STARNONI, F.; SCHIRALDI, M. M. On the relationship between human factor and overall equipment effectiveness (OEE): an analysis through the adoption of ana-

lytic hierarchy process and ISO 22400. **International journal of engineering business management**, United Kindom, v. 15, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/18479790231188548>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MAHMOUD, I. A.; FAHMY ALY, M.; MOHIB, A.; AFEFY, I. H. Integration of benchmarking with overall equipment cost loss for industrial process improvement. **Jordan journal of mechanical and industrial engineering**, Zarqa, v. 13, p. 49-59, 2019. Disponível em: [https://jjmie.hu.edu.jo/vol13-1/jjmie\\_30\\_19-01.pdf](https://jjmie.hu.edu.jo/vol13-1/jjmie_30_19-01.pdf). Acesso em: 17 jan. 2024.

MARQUES, P. C.; PEREIRA, T.; FERNANDES, F.; COSTA, C.; MOREIRA, F. A review of sustainable total productive maintenance (STPM). **Sustainability**, London, v. 15, n. 16, p. 12362, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151612362>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MJIMER, I.; AOULA, E. S.; ACHOUYAB, E. H. Monitoring of overall equipment effectiveness by multivariate statistical process control. **International journal of lean six sigma**, United Kingdom, v. 13, n. 4, p. 847–862, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/IJLSS-12-2020-0218>. Acesso em: 26 abr. 2025.

MOURA, J. C. **Manutenção produtiva total: princípios e aplicação**. São Paulo: Atlas, 2010.

MOUSAVI-NASAB, S. H.; SAFARI, J.; HAFEZALKOTOB, A. Resource allocation based on overall equipment effectiveness using cooperative game. **Kybernetes**, Bradford, v. 49, n. 3, p. 819–834, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/K-09-2018-0491>. Acesso em: 08 fev. 2024.

MUSTKIM, R.; HENDARSJAH, H. Efficiency measurement on the effectiveness of train and wagon maintenance: a data envelopment analysis perspective. **The south east asian journal of management**, Depok, v. 15, n. 1, p. 1–18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21002/seam.v15i1.12946>. Acesso em: 10 dez. 2024.

NAKAJIMA, S. An introduction to TPM. In: NAKAJIMA, S. (Ed.). **TPM development program: implementing total productive maintenance**. Massachusetts: Productivity Press, 1989. p. 1-26.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: total productive maintenance**. Cambridge: Productivity Press, 1988.

NALLUSAMY, S. Enhancement of productivity and efficiency of CNC machines in a small-scale industry using total productive maintenance. **I.J. Engineering research in Africa**, South Africa, v. 25, p. 119-126, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.25.119>. Acesso em: 28 nov. 2024.

NALLUSAMY, S.; KUMAR, V.; YADAV, V.; KUMAR PRASAD, U.; SUMAN, S. K. Implementation of total productive maintenance to enhance the overall equipment effectiveness in medium scale industries. **International journal of mechanical and production**, India, v. 8, n. 1, p. 1027-1038, 2018. Disponível em: [www.tjprc.org](http://www.tjprc.org). Acesso em: 13 dez. 2024.

PANDHARE, V.; NEGRI, E.; RAGAZZINI, L.; CATTANEO, L.; MACCHI, M.; LEE, J. Digital twin-enabled robust production scheduling for equipment in degraded state. **Journal**

of manufacturing systems, Dearbornv, v. 74, p. 841-857, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.027>. Acesso em: 08 fev. 2024.

PINTO, M. C. A.; XAVIER, A. L. **Gestão da manutenção**: fundamentos e melhores práticas. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

PIRAN, F. A. S.; PARIS, A.; LACERDA, D. P.; CAMARGO, L. F. R.; SERRANO, R.; CASSEL, R. A. Overall equipment effectiveness: Required but not enough: an analysis integrating overall equipment effect and data envelopment analysis. **Global journal of flexible systems management**, India, v. 21, p. 191-206, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40171-020-00238-6>. Acesso em: 26 abr. 2025.

RODA, I.; MACCHI, M. Factory-level performance evaluation of buffered multi-state production systems. **Journal of manufacturing systems**, Dearbornv, v. 50, p. 226-235, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.015>. Acesso em: 30 jan. 2025.

SCHIRALDI, M. M.; VARISCO, M. Overall Equipment Effectiveness: consistency of ISO standard with literature. **Computers and industrial engineering**, New York, v. 145, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2020.106518>. Acesso em: 28 nov. 2024.

SILVA, A. F.; ARANDA, K. M.; MARINS, F. A. S.; DIAS, E. X.; MIRANDA, R. C. A hybrid DMAIC framework for integrating response surface methodology and multi-objective optimization methods. **International journal of advanced manufacturing technology**, London, v. 122, p. 4139-4164, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-022-10152-z>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; DIAS, E. X.; USHIZIMA, C. A. Improving manufacturing cycle efficiency through new multiple criteria data envelopment analysis models: an application in green and lean manufacturing processes. **Production planning and control**, London, v. 32, n. 2, p. 104–120, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2020.1713413>. Acesso em: 08 fev. 2024

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; MIRANDA, R. C.; DIAS, E. X. A new multiple criteria data envelopment analysis with variable return to scale: Applying bi-dimensional representation and super-efficiency analysis. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 314, n. 1, p. 308-322, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2023.09.008>. Acesso em: 28 nov. 2024.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; MIRANDA, R. C.; DIAS, E. X. Goal programming and multiple criteria data envelopment analysis combined with optimization and Monte Carlo simulation: an application in railway components. **Expert systems**, New York, v. 39, n. 2, e12840, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/exsy.12840>. Acesso em: 15 mar. 2025.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; SILVA OLIVEIRA, J. B.; DIAS, E. X. Multi-objective optimization and finite element method combined with optimization via Monte Carlo simulation in a stamping process under uncertainty. **International journal of advanced manufacturing technology**, London v. 117, p. 305-327, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-525542/v1>. Acesso em: 21 dez. 2024.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; TAMURA, P. M.; DIAS, E. X. Bi-objective multiple criteria data envelopment analysis combined with the overall equipment effectiveness: an application in an automotive company. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 157, p. 278–288, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.147>. Acesso em: 25 jan. 2024.

SUDHAMAN, P.; SRINARAYAN, S. Efficiency analysis of ERP packages: a customization perspective. **Computers in industry**, Amsterdam, v. 82, p. 19-27, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.004>. Acesso em: 30 jan. 2025.

SUZUKI, T. **TPM in process industries**. Portland: Productivity Press, 1994.

ZUBAIR, M.; MAQSOOD, S.; HABIB, T.; JAN, Q. M. U.; NADIR, U.; WASEEM, M.; YASEEN, Q. M. Manufacturing productivity analysis by applying overall equipment effectiveness metric in a pharmaceutical industry. **Cogent engineering**, Chandigarh, v. 8, n. 1, 1953681, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2021.1953681>. Acesso em: 15 mar. 2025.

## APÊNDICE A – Matriz de entradas, intermediários e saídas.

| DMU | x1<br>(h) | X2<br>(h) | X3<br>(un) | X4<br>(un) | X5<br>(un) | X6<br>(un) | Z1<br>(%) | Z2<br>(%) | Z3<br>(%) | Y1<br>(%) |
|-----|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1   | 47,68     | 72,00     | 11.491,68  | 12.636,08  | 11.218,00  | 11.251,00  | 0,66      | 0,91      | 1,00      | 0,60      |
| 2   | 68,72     | 93,17     | 16.904,30  | 18.209,92  | 17.277,00  | 17.281,00  | 0,74      | 0,93      | 1,00      | 0,68      |
| 3   | 41,83     | 74,28     | 10.625,67  | 11.085,83  | 11.249,00  | 11.321,00  | 0,56      | 0,96      | 0,99      | 0,54      |
| 4   | 54,25     | 85,58     | 14.918,75  | 14.376,25  | 14.701,00  | 14.701,00  | 0,63      | 1,04      | 1,00      | 0,66      |
| 5   | 53,53     | 72,47     | 13.276,27  | 14.186,33  | 13.254,00  | 13.254,00  | 0,74      | 0,94      | 1,00      | 0,69      |
| 6   | 60,87     | 81,58     | 15.581,87  | 16.129,67  | 15.466,00  | 15.466,00  | 0,75      | 0,97      | 1,00      | 0,72      |
| 7   | 47,27     | 66,05     | 10.351,40  | 12.525,67  | 10.296,00  | 10.296,00  | 0,72      | 0,83      | 1,00      | 0,59      |
| 8   | 58,12     | 97,00     | 13.715,53  | 15.400,92  | 12.905,00  | 12.913,00  | 0,60      | 0,89      | 1,00      | 0,53      |
| 9   | 33,92     | 65,08     | 9.869,75   | 8.987,92   | 10.296,00  | 10.296,00  | 0,52      | 1,10      | 1,00      | 0,57      |
| 10  | 54,27     | 97,45     | 14.652,00  | 14.380,67  | 14.651,00  | 14.651,00  | 0,56      | 1,02      | 1,00      | 0,57      |
| 11  | 39,83     | 60,60     | 10.316,83  | 10.555,83  | 10.269,00  | 10.269,00  | 0,66      | 0,98      | 1,00      | 0,64      |
| 12  | 63,45     | 84,92     | 16.750,80  | 16.814,25  | 16.971,00  | 16.971,00  | 0,75      | 1,00      | 1,00      | 0,74      |
| 13  | 58,40     | 80,10     | 11.212,80  | 15.476,00  | 10.348,00  | 10.365,00  | 0,73      | 0,72      | 1,00      | 0,53      |
| 14  | 62,78     | 92,00     | 16.260,88  | 16.637,58  | 16.610,00  | 16.632,00  | 0,68      | 0,98      | 1,00      | 0,67      |
| 15  | 43,87     | 76,00     | 11.361,47  | 11.624,67  | 11.066,00  | 11.083,00  | 0,58      | 0,98      | 1,00      | 0,56      |
| 16  | 61,22     | 89,50     | 16.895,80  | 16.222,42  | 16.610,00  | 16.610,00  | 0,68      | 1,04      | 1,00      | 0,71      |
| 17  | 53,15     | 72,80     | 14.244,20  | 14.084,75  | 14.179,00  | 14.196,00  | 0,73      | 1,01      | 1,00      | 0,74      |
| 18  | 59,03     | 85,70     | 21.783,30  | 15.643,83  | 16.803,00  | 16.803,00  | 0,69      | 1,39      | 1,00      | 0,96      |
| 19  | 46,05     | 66,92     | 9.716,55   | 12.203,25  | 9.361,00   | 9.561,00   | 0,69      | 0,80      | 0,98      | 0,54      |
| 20  | 71,08     | 96,00     | 17.273,25  | 18.837,08  | 16.983,00  | 16.993,00  | 0,74      | 0,92      | 1,00      | 0,68      |
| 21  | 43,32     | 64,42     | 10.049,47  | 11.478,92  | 10.620,00  | 10.620,00  | 0,67      | 0,88      | 1,00      | 0,59      |
| 22  | 63,20     | 98,92     | 21.298,40  | 16.748,00  | 19.519,00  | 19.719,00  | 0,64      | 1,27      | 0,99      | 0,80      |
| 23  | 47,68     | 61,02     | 11.825,47  | 12.636,08  | 11.810,00  | 11.810,00  | 0,78      | 0,94      | 1,00      | 0,73      |
| 24  | 48,40     | 72,90     | 12.680,80  | 12.826,00  | 11.766,00  | 11.966,00  | 0,66      | 0,99      | 0,98      | 0,65      |
| 25  | 13,27     | 67,55     | 3.303,40   | 3.515,67   | 2.847,00   | 3.476,00   | 0,20      | 0,94      | 0,82      | 0,15      |
| 26  | 62,85     | 88,52     | 13.198,50  | 16.655,25  | 13.337,00  | 13.345,00  | 0,71      | 0,79      | 1,00      | 0,56      |
| 27  | 13,57     | 70,00     | 2.930,40   | 3.595,17   | 2.764,00   | 2.764,00   | 0,19      | 0,82      | 1,00      | 0,16      |
| 28  | 54,67     | 77,17     | 14.486,67  | 14.486,67  | 14.824,00  | 14.824,00  | 0,71      | 1,00      | 1,00      | 0,71      |
| 29  | 14,10     | 77,05     | 3.130,20   | 3.736,50   | 3.173,00   | 3.180,00   | 0,18      | 0,84      | 1,00      | 0,15      |
| 30  | 55,27     | 83,33     | 12.877,13  | 14.645,67  | 12.069,00  | 12.113,00  | 0,66      | 0,88      | 1,00      | 0,58      |
| 31  | 45,90     | 67,67     | 11.658,60  | 12.163,50  | 11.316,00  | 11.545,00  | 0,68      | 0,96      | 0,98      | 0,64      |
| 32  | 66,98     | 102,00    | 13.597,62  | 17.750,58  | 13.757,00  | 13.791,00  | 0,66      | 0,77      | 1,00      | 0,50      |
| 33  | 46,00     | 64,48     | 12.880,00  | 12.190,00  | 12.805,00  | 12.807,00  | 0,71      | 1,06      | 1,00      | 0,75      |
| 34  | 63,95     | 89,00     | 17.969,95  | 16.946,75  | 17.632,00  | 17.656,00  | 0,72      | 1,06      | 1,00      | 0,76      |
| 35  | 43,88     | 60,90     | 9.259,38   | 11.629,08  | 9.328,00   | 9.330,00   | 0,72      | 0,80      | 1,00      | 0,57      |
| 36  | 57,40     | 82,73     | 11.250,40  | 15.211,00  | 11.503,00  | 11.524,00  | 0,69      | 0,74      | 1,00      | 0,51      |
| 37  | 51,08     | 77,22     | 26.665,50  | 13.537,08  | 18.752,00  | 18.761,00  | 0,66      | 1,97      | 1,00      | 1,30      |
| 38  | 55,98     | 90,83     | 12.932,15  | 14.835,58  | 11.530,00  | 12.090,00  | 0,62      | 0,87      | 0,95      | 0,51      |
| 39  | 52,48     | 76,92     | 15.062,72  | 13.908,08  | 14.613,00  | 14.622,00  | 0,68      | 1,08      | 1,00      | 0,74      |
| 40  | 46,65     | 69,25     | 10.169,70  | 12.362,25  | 10.297,00  | 10.857,00  | 0,67      | 0,82      | 0,95      | 0,53      |
| 41  | 48,18     | 70,27     | 11.660,37  | 12.768,58  | 11.171,00  | 11.187,00  | 0,69      | 0,91      | 1,00      | 0,63      |
| 42  | 54,05     | 83,33     | 11.728,85  | 14.323,25  | 11.032,00  | 11.592,00  | 0,65      | 0,82      | 0,95      | 0,51      |
| 43  | 43,58     | 67,17     | 7.932,17   | 11.549,58  | 8.367,00   | 8.367,00   | 0,65      | 0,69      | 1,00      | 0,45      |
| 44  | 60,17     | 94,33     | 14.440,00  | 15.944,17  | 15.120,00  | 15.127,00  | 0,64      | 0,91      | 1,00      | 0,58      |
| 45  | 42,63     | 63,07     | 7.801,90   | 11.297,83  | 8.653,00   | 8.653,00   | 0,68      | 0,69      | 1,00      | 0,47      |
| 46  | 65,32     | 88,42     | 16.263,85  | 17.308,92  | 15.919,00  | 15.919,00  | 0,74      | 0,94      | 1,00      | 0,69      |
| 47  | 33,32     | 55,40     | 7.462,93   | 8.828,92   | 8.328,00   | 8.328,00   | 0,60      | 0,85      | 1,00      | 0,51      |
| 48  | 52,95     | 82,97     | 14.561,25  | 14.031,75  | 14.339,00  | 14.589,00  | 0,64      | 1,04      | 0,98      | 0,65      |
| 49  | 56,77     | 78,17     | 52.168,57  | 56.766,67  | 53.398,00  | 53.420,00  | 0,73      | 0,92      | 1,00      | 0,67      |
| 50  | 62,53     | 87,62     | 42.960,40  | 62.533,33  | 43.447,00  | 43.447,00  | 0,71      | 0,69      | 1,00      | 0,49      |
| 51  | 45,95     | 76,27     | 38.414,20  | 45.950,00  | 36.327,00  | 36.348,00  | 0,60      | 0,84      | 1,00      | 0,50      |
| 52  | 60,80     | 85,35     | 53.929,60  | 60.800,00  | 54.488,00  | 54.488,00  | 0,71      | 0,89      | 1,00      | 0,63      |
| 53  | 43,18     | 72,80     | 51.258,62  | 43.183,33  | 50.099,00  | 50.144,00  | 0,59      | 1,19      | 1,00      | 0,70      |
| 54  | 51,42     | 84,00     | 55.684,25  | 51.416,67  | 55.836,00  | 55.839,00  | 0,61      | 1,08      | 1,00      | 0,66      |
| 55  | 52,93     | 68,00     | 29.325,07  | 52.933,33  | 28.785,00  | 28.785,00  | 0,78      | 0,55      | 1,00      | 0,43      |
| 56  | 73,48     | 101,17    | 42.914,27  | 73.483,33  | 43.936,00  | 43.955,00  | 0,73      | 0,58      | 1,00      | 0,42      |
| 57  | 43,45     | 61,03     | 36.498,00  | 43.450,00  | 36.287,00  | 36.287,00  | 0,71      | 0,84      | 1,00      | 0,60      |
| 58  | 50,32     | 80,83     | 48.253,68  | 50.316,67  | 52.123,00  | 52.142,00  | 0,62      | 0,96      | 1,00      | 0,60      |
| 59  | 35,48     | 61,60     | 35.767,20  | 35.483,33  | 35.911,00  | 35.911,00  | 0,58      | 1,01      | 1,00      | 0,58      |
| 60  | 52,65     | 83,22     | 40.329,90  | 52.650,00  | 39.987,00  | 40.110,00  | 0,63      | 0,77      | 1,00      | 0,48      |
| 61  | 55,13     | 79,20     | 13.011,47  | 14.610,33  | 12.840,00  | 13.074,00  | 0,70      | 0,89      | 0,98      | 0,61      |
| 62  | 65,80     | 92,00     | 16.384,20  | 17.437,00  | 15.970,00  | 16.307,00  | 0,72      | 0,94      | 0,98      | 0,66      |
| 63  | 48,68     | 77,75     | 13.874,75  | 12.901,08  | 13.988,00  | 13.998,00  | 0,63      | 1,08      | 1,00      | 0,67      |
| 64  | 53,07     | 88,43     | 13.425,87  | 14.062,67  | 13.206,00  | 13.225,00  | 0,60      | 0,95      | 1,00      | 0,57      |
| 65  | 57,17     | 71,97     | 12.805,33  | 15.149,17  | 12.520,00  | 12.520,00  | 0,79      | 0,85      | 1,00      | 0,67      |
| 66  | 67,55     | 81,63     | 16.414,65  | 17.900,75  | 15.352,00  | 16.172,00  | 0,83      | 0,92      | 0,95      | 0,72      |
| 67  | 50,67     | 67,48     | 11.096,00  | 13.426,67  | 11.348,00  | 11.348,00  | 0,75      | 0,83      | 1,00      | 0,62      |
| 68  | 71,82     | 104,00    | 16.302,38  | 19.031,42  | 16.814,00  | 16.814,00  | 0,69      | 0,86      | 1,00      | 0,59      |
| 69  | 43,93     | 65,60     | 9.709,27   | 11.642,33  | 9.692,00   | 9.692,00   | 0,67      | 0,83      | 1,00      | 0,56      |
| 70  | 62,62     | 87,32     | 15.466,32  | 16.593,42  | 15.448,00  | 15.448,00  | 0,72      | 0,93      | 1,00      | 0,67      |
| 71  | 48,22     | 60,35     | 12.054,17  | 12.777,42  | 12.197,00  | 12.219,00  | 0,80      | 0,94      | 1,00      | 0,75      |
| 72  | 69,80     | 88,48     | 16.891,60  | 18.497,00  | 16.644,00  | 17.120,00  | 0,79      | 0,91      | 0,97      | 0,70      |
| 73  | 61,42     | 80,00     | 17.196,67  | 16.275,42  | 16.018,00  | 16.018,00  | 0,77      | 1,06      | 1,00      | 0,81      |
| 74  | 36,87     | 92,00     | 7.926,33   | 9.769,67   | 7.709,00   | 7.709,00   | 0,40      | 0,81      | 1,00      | 0,33      |
| 75  | 42,47     | 65,80     | 9.597,47   | 11.253,67  | 10.120,00  | 10.120,00  | 0,65      | 0,85      | 1,00      | 0,55      |
| 76  | 29,93     | 79,08     | 7.992,20   | 7.932,33   | 7.725,00   | 7.725,00   | 0,38      | 1,01      | 1,00      | 0,38      |
| 77  | 51,45     | 67,97     | 12.502,35  | 13.634,25  | 12.229,00  | 12.284,00  | 0,76      | 0,92      | 1,00      | 0,69      |
| 78  | 30,78     | 81,33     | 6.433,72   | 8.157,58   | 6.647,00   | 6.765,00   | 0,38      | 0,79      | 0,98      | 0,29      |
| 79  | 13,85     | 68,00     | 2.880,80   | 3.670,25   | 2.868,00   | 3.080,00   | 0,20      | 0,78      | 0,93      | 0,15      |
| 80  | 60,70     | 96,67     | 12.868,40  | 16.085,50  | 12.270,00  | 12.270,00  | 0,63      | 0,80      | 1,00      | 0,50      |
| 81  | 14,67     | 64,75     | 9.328,00   | 3.886,67   | 3.172,00   | 3.172,00   | 0,23      | 2,40      | 1,00      | 0,54      |
| 82  | 46,38     | 84,73     | 10.992,85  | 12.291,58  | 10.942,00  | 10.980,00  | 0,55      | 0,89      | 1,00      | 0,49      |
| 83  | 14,32     | 59,80     | 3.851,18   | 3.793,92   | 3.839,00   | 3.839,00   | 0,24      | 1,02      | 1,00      | 0,24      |
| 84  | 50,68     | 82,22     | 12.974,93  | 13.431,08  | 12.396,00  | 12.414,00  | 0,62      | 0,97      | 1,00      | 0,59      |