

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

**EDUARDO SANTOS TELLES**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO TAMBOR-PULMÃO-CORDA NA EFICIÊNCIA EM UM  
SISTEMA PRODUTIVO DE ENGENHARIA SOB ENCOMENDA**

**SÃO LEOPOLDO**

**2019**

EDUARDO SANTOS TELLES

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO TAMBOR-PULMÃO-CORDA NA EFICIÊNCIA EM UM  
SISTEMA PRODUTIVO DE ENGENHARIA SOB ENCOMENDA**

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

Orientador: Dr. Daniel Pacheco Lacerda

Coorientadora: Dr. Maria Isabel Wolf Motta  
Morandi

SÃO LEOPOLDO

2019

---

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Telles, Eduardo Santos

Análise dos efeitos do tambor-pulmão-corda na eficiência em um sistema produtivo de engenharia sob encomenda / Eduardo Santos Telles. - São Leopoldo, 2019.  
183 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.  
Orientação: Dr. Daniel Pacheco Lacerda  
Coorientação: Dr. Maria Isabel Wolf Motta

1. Teoria das Restrições (TOC). 2. Tambor-Pulmão-Corda (TPC). 3. Engenharia sob Encomenda (ETO). 4. Análise Envoltória de Dados (DEA). I. Título. II. Lacerda, Daniel Pacheco, orientador. III. Motta, Maria Isabel Wolf, coorientadora.

---

Bibliotecária responsável  
Bárbara Rocha Bittencourt Sallaberry CRB9/1864

**EDUARDO SANTOS TELLES**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TAMBOR-PULMÃO-CORDA EM UM SISTEMA  
PRODUTIVO DE ENGENHARIA SOB ENCOMENDA**

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

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_\_/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda – Orientador  
PPGEPS Unisinos

---

Prof.<sup>a</sup> Dr. Maria Isabel Wolf Motta Morandi – Coorientadora  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. Dr. Cristiano Richter  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. Dr. Douglas Rafael Veit  
PPGEPS Unisinos

---

Prof.<sup>a</sup> Dr. Aline Dresch  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza  
Faculdade de Engenharia UNESP

*Dedico esta dissertação à minha esposa Gabriela e a minha família que me apoiaram durante esta trajetória.*

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato ao meu orientador, Prof. Daniel Pacheco Lacerda, por ter despertado em mim o interesse pela Teoria das Restrições (TOC) e apoiado a proposta de pesquisa. Também a minha coorientadora Prof. Maria Isabel pela oportunidade de acompanhar durante o estágio supervisionado a disciplina de TOC e conhecer melhor a importante profissão de docência acadêmica.

Sou grato toda a equipe de professores do PPGEPS Unisinos, que contribuiu com o aprendizado nesta fase da minha vida. Um agradecimento muito especial à equipe do GMAP pelo profissionalismo do grupo de pesquisa e contribuição.

Agradeço à banca examinadora do projeto de qualificação, Prof. Daniel Pacheco Lacerda, Prof. Douglas Rafael Veit e Prof. Junico Antunes pelas contribuições e apoio para avanço do trabalho.

Sou muito grato pela empresa em estudo e aos profissionais excepcionais que contribuíram com valiosas informações para o desenvolvimento desta pesquisa: Augusto, Daniel, Everton, Gabriel, Matheus, Renato, Tatiane, entre outros.

Agradeço aos meus pais (Alcides e Rejane) e a minha irmã, Laura, pelo apoio e ajuda de sempre. Agradeço aos meus sogros (Paulo e Liseti) e meu cunhado, Felipe, pelo incentivo. Para mim, a família sempre foi muito importante e compreendeu a significado deste projeto.

Sou muito grato a minha esposa Gabriela, por compreender as horas de isolamento no escritório durante esta caminhada. Este trabalho possui muito incentivo seu, pois foi você que me apoiou a seguir os estudos.

## RESUMO

O aumento da produtividade e eficiência em sistemas produtivos de Engenharia sob Encomenda (ETO) têm atraído um interesse crescente da academia e das empresas. Uma alternativa aos programas de melhoria tradicionais é a aplicação do Tambor-Pulmão-Corda (TPC). Apesar de a pesquisa sobre TPC apontar benefícios, evidências empíricas são escassas na literatura, sobretudo em sistemas produtivos ETO. Portanto, é relevante avaliar os efeitos que a implantação do TPC produz para contribuir para a melhoria da eficiência técnica em um sistema ETO. Esta pesquisa analisa os efeitos da implantação do TPC em três linhas produtivas ETO de uma empresa eletrônica do setor aeroespacial brasileiro. Esses efeitos foram avaliados longitudinalmente em um período que abrange resultados anteriores e posteriores à implantação do TPC, combinado com a Análise envoltória de dados (DEA), teste de Wilcoxon e a Análise de Variância (ANOVA) em um estudo de caso. Como resultado, evidencia-se que os efeitos do TPC sobre a eficiência são positivos. Observa-se, também, diferenças significativas no resultado da eficiência produtiva entre as três linhas de produtos analisadas. Por fim, a pesquisa aponta quais variáveis e características qualitativas contribuíram, positivamente ou não, na eficiência produtiva pós a implantação do TPC.

**Palavras-chave:** Teoria das Restrições (TOC), Tambor-Pulmão-Corda (TPC), Eficiência, Engenharia sob Encomenda (ETO) e Análise Envoltória de Dados (DEA).

## ABSTRACT

Increased productivity and efficiency in industries with Engineered to Order (ETOs) production systems have attracted growing interest from the academic and business, and the application of the Drum-Buffer-Rope (DBR) is considered an alternative to traditional improvement programs to achieve these ends. However, although research on DBR shows benefits, empirical evidence is scarce in the literature, especially in ETO production systems. Therefore, it is relevant to evaluate the effects that the implementation of DBR produces to contribute to the improvement of technical efficiency in an ETO system. This research analyzes the effects of the implementation of DBR in three ETO production lines of an electronic company of the Brazilian aerospace sector. These effects were evaluated longitudinally in a period that includes pre and post TPC results, combined with the Data Envelopment Analysis (DEA), the Wilcoxon test and the Analysis of Variance (ANOVA) in a case study. As a result, it is evident that the effects of DBR on efficiency are positive. It is also observed significant differences in the result of the productive efficiency among the three product lines analyzed. Finally, the research establishes which variables and qualitative aspects contributed, positively or not, to the productive efficiency after the DBR implementation.

**Key-words:** Theory of Constraints (TOC), Drum-Buffer-Rope (DBR), Engineering to order (ETO) and Data Envelopment Analysis (DEA).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho e objeto da pesquisa.....	23
Figura 2 - Sumário dos conceitos operacionais empresariais .....	38
Figura 3 - Momentos no desenvolvimento da TOC .....	44
Figura 4 - Tambor-Pulmão-Corda (TPC).....	58
Figura 5 - Relação entre <i>input</i> , DMU e <i>output</i> - DEA .....	64
Figura 6 - Aplicações dos modelos DEA .....	75
Figura 7 - Modelos matemáticos e tipo da eficiência calculada.....	76
Figura 8 - A estratégia para condução de pesquisas científicas .....	86
Figura 9 - Etapas para aplicação de um estudo de caso .....	89
Figura 10 - Método de trabalho .....	92
Figura 11 - Período de análise e quantidade de DMUs.....	97
Figura 12 - Definição das variáveis DEA .....	99
Figura 13 - Atividades de análise dos dados.....	109
Figura 14 - Interface SAGEPE .....	110
Figura 15 - Processo de análises estatísticas .....	112
Figura 16 - Histograma da eficiência pré TPC na linha de computadores .....	113
Figura 17 - Histograma da eficiência pós TPC na linha de computadores.....	113
Figura 18 - Histograma da eficiência pré TPC na linha de <i>displays</i> .....	114
Figura 19 - Histograma da eficiência pós TPC na linha de <i>displays</i> .....	114
Figura 20 - Histograma da eficiência pré TPC na linha de eletrônicos.....	114
Figura 21 - Histograma da eficiência pós TPC na linha de eletrônicos .....	114
Figura 22 - Aeronave Embraer Super Tucano A-29 .....	119
Figura 23 - Display panorâmico WAD .....	120
Figura 24 - Aeronave KC-390.....	120
Figura 25 - Processo de montagem eletrônica.....	121
Figura 26 - Componentes SMD montados em PCB.....	122
Figura 27 - Diagrama de cores TPC.....	125
Figura 28 - Relatório semanal TPC .....	125
Figura 29 - Alocação de recursos TPC .....	126
Figura 30 - Relatório semanal TPC .....	153

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de publicações de TPC.....	30
Gráfico 2 - Distribuição de publicações de DEA por ano.....	34
Gráfico 3 - Fronteira CRS com orientação para <i>input</i> .....	69
Gráfico 4 - Fronteira CRS com orientação para <i>output</i> .....	70
Gráfico 5 - Fronteira VRS e CRS .....	74
Gráfico 6 - Eficiência técnica e eficiência de escala.....	78
Gráfico 7 - Evolução da eficiência composta da linha de computadores .....	129
Gráfico 8 - Evolução da eficiência composta da linha de <i>displays</i> .....	137
Gráfico 9 - Evolução da eficiência composta da linha de eletrônicos.....	144

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Publicações de maior relevância sobre o tema.....	32
Quadro 2 - Características dos conceitos operacionais empresariais.....	39
Quadro 3 - Desdobramento da meta.....	49
Quadro 4 - Desdobramento da meta.....	59
Quadro 5 - Principais técnicas para cálculo de eficiência e produtividade.....	61
Quadro 6 - Artigos mais citados sobre DEA.....	65
Quadro 7 - Tipos de retorno à escala existentes.....	77
Quadro 8 - Combinações possíveis.....	78
Quadro 9 - Estimativa de variâncias existentes no teste estatístico ANOVA.....	83
Quadro 10 - Classificação geral da pesquisa.....	90
Quadro 11 - Profissionais da empresa.....	94
Quadro 12 - Variáveis primárias informadas pelos especialistas.....	99
Quadro 13 - Lista final de variáveis do modelo DEA.....	103
Quadro 14 - Visão geral do modelo DEA.....	105
Quadro 15 - Técnicas, fontes e informações.....	107
Quadro 16 - Linha de produtos e hipóteses testadas.....	111
Quadro 17 - Classificação de produtos eletrônicos.....	118
Quadro 18 - Avaliação dos especialistas.....	151
Quadro 19 - Hipóteses de pesquisa testadas e resultados.....	155
Quadro 20 - Efeitos do TPC da literatura e estudo de caso.....	161
Quadro 21 - Bases de dados pesquisados.....	176
Quadro 22 - Critério de pesquisa nas bases de dados.....	177

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de empregos e receita no setor aeroespacial.....	27
Tabela 2 - Evolução das publicações acadêmicas sobre TPC.....	29
Tabela 3 - Resumo eficiência da linha de computadores.....	128
Tabela 4 - Folgas das DMUs ineficientes da linha de computadores.....	131
Tabela 5 - Variação média das folgas da linha de computadores.....	132
Tabela 6 - Normalidade dos dados da linha de computadores.....	133
Tabela 7 - Teste Wilcoxon da linha de computadores.....	133
Tabela 8 - Teste Wilcoxon para as folgas da linha de computadores.....	134
Tabela 9 - Resumo eficiência da linha de <i>displays</i> .....	136
Tabela 10 - Folgas das DMUs ineficientes da linha de <i>displays</i> .....	138
Tabela 11 - Variação média das folgas da linha de <i>displays</i> .....	140
Tabela 12 - Normalidade dos dados da linha de <i>displays</i> .....	140
Tabela 13 - Teste Wilcoxon da linha de <i>displays</i> .....	141
Tabela 14 - Teste Wilcoxon para as folgas da linha de <i>displays</i> .....	141
Tabela 15 - Resumo eficiência da linha de eletrônicos.....	143
Tabela 16 - Folgas das DMUs ineficientes da linha de eletrônicos.....	145
Tabela 17 - Variação média das folgas da linha de eletrônicos.....	147
Tabela 18 - Validação dos pressupostos da ANOVA na linha de eletrônicos.....	147
Tabela 19 - Teste ANOVA da linha de eletrônicos.....	148
Tabela 20 - Teste Wilcoxon da linha de eletrônicos.....	148
Tabela 21 - Teste Wilcoxon para as folgas da linha de eletrônicos.....	149
Tabela 22 - Variação da eficiência das três linhas de produtos.....	155
Tabela 23 - Ordem da variação médias das folgas.....	157
Tabela 24 - Eficiência da linha de computadores.....	178
Tabela 25 - Eficiência da linha de <i>displays</i> .....	180
Tabela 26 - Eficiência da linha de eletrônicos.....	182

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
AIA	<i>Aerospace Industries Association</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ASD	<i>AeroSpace and Defence Industries Association of Europe</i>
ATO	<i>Assemble to Order</i>
BCC	Banker, Charnes e Cooper
BOM	<i>Bill of material</i>
BPMS	<i>Business Process Management System</i>
BTO	<i>Build to Order</i>
CCR	<i>Capacity Constraint Resource</i>
CRS	<i>Constrant Returns to Scale</i>
DBR	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Unit</i>
DO	Despesa Operacional
DTO	<i>Develop to Order</i>
EASA	<i>European Aviation Safety Agency</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ETO	<i>Engineer-to-Order</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
FC	Fluxo de Caixa
FGLR	Färe, Grosskopf, Lindgren e Roose
FGNZ	Färe, Grosslopft, Norris e Zhang
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPC	<i>Association Connecting Electronics Industries</i>
JIT	<i>Just In Time</i>
LL	Lucro líquido

MPSS	<i>Most Productive Scale Size</i>
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
MTO	<i>Make-to-Order</i>
MTS	<i>Make-to-Stock</i>
N/A	Não aplicável
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturers</i>
OPT	<i>Optimized Production Technology</i>
PCB	Placa de Circuito Impresso
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PN	<i>Part Number</i>
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
RCE	Rendimentos Constantes de Escala
RNC	Rendimentos não crescentes
RND	Rendimentos não decrescentes
RSI	Retorno sobre o investimento
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
RVE	Rendimentos Variáveis de Escala
SAGEPE	Sistema para Análise e Gestão da Produtividade e Eficiência
SMD	<i>Surface Mount Devices</i>
SMT	<i>Surface Mount Technology</i>
TOC	<i>Theory Of Constraints</i>
TPC	Tambor-Pulmão-Corda
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UR	Umidade Relativa do Ar
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>
WK	<i>Week</i>
WIP	<i>Work In Process</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>26</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	26
1.2.2 Objetivos Específicos .....	26
<b>1.3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>27</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>36</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>37</b>
<b>2.1 SISTEMAS PRODUTIVOS DE ENGENHARIA SOB ENCOMENDA (ETO)</b> .....	<b>37</b>
<b>2.2 TEORIA DAS RESTRIÇÕES (TOC)</b> .....	<b>43</b>
2.2.1 Indicadores de desempenho da TOC.....	48
2.2.2 Indicadores de desempenho no nível do processo .....	53
2.2.3 Tambor-Pulmão-Corda (TPC) .....	55
<b>2.3 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA</b> .....	<b>60</b>
2.3.1 Métodos para Cálculo de Eficiência .....	60
2.3.2 Análise Envoltória de Dados (DEA).....	62
2.3.2.1 Modelo Retorno Constante de Escala (CCR - CRS) .....	66
2.3.2.2 Modelo Retorno Variável de Escala (BCC - VRS).....	71
2.3.2.3 Eficiência e Rendimento de escala .....	75
2.3.2.4 Alvos.....	79
<b>2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS</b> .....	<b>80</b>
2.4.1 Teste de Shapiro-Wilk .....	80
2.4.2 Teste de Levene.....	81
2.4.3 Análise de Variância (ANOVA).....	82
2.4.4 Teste de Wilcoxon.....	84
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>85</b>
<b>3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA</b> .....	<b>85</b>
<b>3.2 MÉTODO DE TRABALHO</b> .....	<b>91</b>
<b>3.3 PROJETO DO MODELO DEA</b> .....	<b>93</b>
3.3.1 Definição dos produtos a serem analisados.....	95
3.3.2 Definição do período de análise .....	96
3.3.3 Definição das unidades de tomada de decisão (DMUs).....	96

3.3.4 Definição das variáveis do modelo DEA ( <i>input</i> e <i>output</i> ) .....	98
3.3.5 Definição do modelo DEA (CRS/VRS) .....	104
3.3.6 Definição da orientação do modelo DEA ( <i>input</i> ou <i>output</i> ).....	104
3.3.7 Classificação geral do modelo DEA .....	105
<b>3.4 COLETA DOS DADOS</b> .....	<b>106</b>
<b>3.5 ANÁLISE DOS DADOS</b> .....	<b>109</b>
<b>3.6 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>116</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ANALISADA</b> .....	<b>117</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS</b> .....	<b>118</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO</b> .....	<b>121</b>
<b>4.3 CARACTERIZAÇÃO DO TPC NA EMPRESA</b> .....	<b>123</b>
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>128</b>
<b>5.1 AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS</b> .....	<b>128</b>
5.1.1 Análise da eficiência da linha de computadores.....	128
5.1.1.1 Análises estatísticas dos efeitos do TPC na linha de computadores .....	133
5.1.2 Análise da eficiência da linha de <i>displays</i> .....	135
5.1.2.1 Análises estatísticas dos efeitos do TPC na linha de <i>displays</i> .....	140
5.1.3 Análise da eficiência da linha de eletrônicos .....	143
5.1.3.1 Análises estatísticas dos efeitos do TPC na linha de eletrônicos.....	147
<b>5.2 AVALIAÇÃO DOS ESPECIALISTAS SOBRE A IMPLANTAÇÃO DO TPC</b> ....	<b>150</b>
<b>5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>155</b>
<b>6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>160</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>163</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>166</b>
<b>ANEXO I - PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b> .....	<b>176</b>
<b>ANEXO II - EFICIÊNCIA DA LINHA DE COMPUTADORES</b> .....	<b>178</b>
<b>ANEXO III - EFICIÊNCIA DA LINHA DE <i>DISPLAYS</i></b> .....	<b>180</b>
<b>ANEXO IV - EFICIÊNCIA DA LINHA DE ELETRÔNICOS</b> .....	<b>182</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do setor aeroespacial colabora para o desenvolvimento do país, com a aplicação de tecnologias inovadoras em produtos de alto valor agregado, que demandam tecnologias avançadas com rápida evolução (GOMES; BARCELLOS; FONSECA, 2017). O setor aeroespacial registrou mundialmente em 2017 um lucro recorde de USD 77 bilhões, um aumento de 18% em relação ao ano anterior (PWC, 2018).

A produção de uma nova aeronave demanda o desenvolvimento de produtos conforme os requisitos específicos dos clientes e possibilita criar novas tecnologias no projeto de máquinas e equipamentos (GOMES; BARCELLOS; FONSECA, 2017). O desenvolvimento de produtos com características diferenciadas reforça a necessidade das empresas encontrarem formas de reduzir custos, encurtarem o tempo de desenvolvimento e produção. Nesse cenário, a eficiência das atividades no desenvolvimento e produção de novos produtos tornou-se fator estratégico para as empresas que atuam neste setor (MATT; DALLASEGA; RAUCH, 2015).

No Brasil, a reduzida eficiência é um assunto recorrente em diversos setores da economia e existe um relativo consenso sobre os fatores que impactam nos resultados, como educação, tecnologia, inovação, burocracia, infraestrutura e competição externa (BBC, 2014). O reduzido crescimento da produtividade é um problema para o desenvolvimento econômico do Brasil. Entre 1990 e 2014 o crescimento da produtividade dos EUA foi 20% superior ao do Brasil (O GLOBO, 2018). A produtividade pode ser definida como o esforço em transformar matéria prima em produtos acabados (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978). A eficiência compara a produtividade de diferentes unidades (empresas, processos, unidades fabris, etc.), por meio da razão entre um indicador de desempenho e sua produtividade máxima (MARIANO et al., 2006).

A eficiência está presente nas diferentes estruturas que podem descrever as possibilidades existentes em operações: *Engineer-to-Order* (ETO), *Buy-to-Order* (BTO), *Make-to-Order* (MTO), *Assemble-to-Order* (ATO), *Make-to-Stock* (MTS) e *Ship-to-Stock* (STS) (YANG; BURNS, 2003). As operações de Engenharia sob Encomenda (*Engineer-to-Order* - ETO) são primariamente associadas com ambientes de projetos complexos como bens de capital (GOSLING; NAIM, 2009).

Na estrutura ETO, os produtos podem ser escolhidos pelo tempo de entrega e não apenas pelas preferências de preço ou outro diferencial. Ainda que o tempo de entrega seja decisivo em outras estruturas operacionais, no ETO é um fator determinante, uma vez que os produtos costumam levar um tempo considerável desde a contratação até a entrega (GOSLING; NAIM, 2009). Em geral, os produtos possuem uma estrutura complexa e iniciam o processo de montagem com diversos componentes (HICKS; MCGOVERN; EARL, 2000).

As empresas ETO estão focadas no desenvolvimento de novos produtos, especialmente nos setores de tecnologias da informação, automotivo, automação industrial, telecomunicação, equipamentos médicos, eletrônicos, etc. Os contratos para desenvolvimento e produção forçam as empresas a operarem em um ambiente de negócios semelhante e adotarem processos operacionais similares (CHEN, 2006). O tempo de resposta para as mudanças do mercado deve ser rápido, o que força as empresas a serem ágeis e enxutas para desenvolver um produto específico e produzi-lo com eficiência e eficácia (GOSLING; NAIM, 2009).

Nesse sentido, a necessidade de oferecer ao mercado novos produtos em um tempo menor exige a aplicação de práticas de gestão de produção. A gestão da qualidade total (TQM) e *just in time (JIT)* obtiveram popularidade no final da década de 80, e neste período o desenvolvimento de uma filosofia de gerenciamento das restrições foi proposta pelo físico Israelense Eliyahu Goldratt (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013). Os conceitos de Eliyahu Goldratt obtiveram notoriedade e publicações foram realizadas no início da década de 1980, promovendo o debate no meio acadêmico e empresarial. Com propósito de desenvolver um mecanismo de Planejamento e Controle da Produção (PCP) para implementar a Teoria das Restrições (TOC), Goldratt (1984) apresenta o Tambor-Pulmão-Corda (TPC). No TPC, a ideia central é que ações devam ser priorizadas no posto de trabalho que está limitando o crescimento do sistema (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013).

O mecanismo de programação e controle na área de operações pode contribuir para a competitividade das empresas por meio do aumento de produtividade e eficiência nos processos e na qualidade final dos produtos (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013). O interesse pela eficiência em sistemas produtivos na década de 1980 direcionou muitas empresas a implementarem sistemas de PCP (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015).

Contudo, nos sistemas produtivos ETO existem o desafio dos tempos de atravessamento e tempos de ciclos muito diferente entre os produtos, tornando a sincronização um desafio (MATT; DALLASEGA; RAUCH, 2014). A variabilidade de recursos com reduzido volume de produção, oscilações da demanda e projeto de produtos focados nos requisitos contribuem negativamente na eficiência (GOSLING; NAIM, 2009). A realização de uma estimativa do tipo e quantidade exata de recursos necessários para atender ao pedido em um sistema ETO torna o planejamento da produção e alocação de capacidade uma tarefa complexa (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). Para minimizar estes efeitos, as empresas reconheceram que os sistemas PCP são essenciais (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015).

Embora existam oportunidades de pesquisa em sistemas produtivos ETO, os ambientes com maior volume de produção atraem maior interesse, por exemplo *Make-to-Stock* (MTS) e *Make-to-Order* (MTO) (GOSLING; NAIM, 2009). No entanto, apesar da evolução dos estudos sobre sistemas produtivos ETO, em especial sobre a eficiência, a literatura aponta que são escassos e insuficientes, assim como os estudos sobre TPC em sistemas de ETO (GONZALEZ-R; FRAMINAN; RUIZ-USANO, 2010; MABIN; BALDERSTONE, 2003; RHEE; CHO; BAE, 2010; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2014).

Tendo em vista o contexto apresentado, o tema desta pesquisa é a avaliação da implantação do TPC em um sistema produtivo ETO, sob análise da eficiência produtiva. Como foi argumentado, a eficiência em sistemas produtivos ETO é significativa para as empresas que atuam neste ambiente. Na próxima seção, são apresentados o objetivo e problema de pesquisa.

## 1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA

A empresa onde o estudo foi realizado é uma indústria eletrônica do setor aeroespacial, com atuação nacional e internacional. Tem como principais clientes fabricantes (OEM - *Original Equipment Manufacturers*) e empresas de manutenção de aeronaves do setor público e privado. A empresa é classificada em um sistema de engenharia sob encomenda (ETO), que desenvolve e produz novos produtos para atender demandas específicas.

Nesse sentido, a variedade, necessidade de customização e reduzido volume de fabricação torna os produtos complexos para serem desenvolvidos e produzidos. Também existe a necessidade de atender às especificações vigentes no Brasil, estabelecidas por órgãos como: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Agência Espacial Brasileira (AEB), Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) e internacionais como: *European Aviation Safety Agency* (EASA), *Federal Aviation Administration* (FAA), *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *Association Connecting Electronics Industries* (IPC). Tais órgãos estabelecem normas a serem cumpridas para que os produtos fabricados estejam aptos a operar. O atendimento das especificações listadas nos contratos com os clientes requer extensos estudos por parte da empresa.

O atendimento às normas e requisitos individuais é uma característica comum de empresas que operam em sistemas ETO, com produtos únicos, geralmente customizados. Os produtos possuem uma estrutura complexa e possuem no processo de montagem diversos componentes (HICKS; MCGOVERN; EARL, 2000).

Para manterem-se competitivas no sistema ETO, as organizações devem ter um rápido tempo de resposta para as mudanças do mercado, exigindo que seus processos internos sejam ágeis e eficientes (CHEN, 2006). As mudanças dos processos estão relacionadas à capacidade da empresa em gerenciar seus recursos, como máquinas e equipamentos, mão de obra, matéria prima, entre outros. Ainda, existem variabilidades como atraso no fornecimento de materiais, falhas de máquinas, falta de equipamentos, etc. Um agravante é que os tempos de atravessamento e tempos de ciclos existentes no processo produtivo ETO não são iguais para todos os produtos, e por isso não permitem uma sincronização adequada da produção (MATT; DALLASEGA; RAUCH, 2014).

Na busca de melhorar o desempenho do gerenciamento da produção, durante a década de 1980 muitas empresas ETO tentaram implementar sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). Contudo, a dificuldade enfrentada foi que os produtos podem consistir em milhares de peças de reposição utilizadas em diferentes recursos produtivos. Sendo assim, para atingir o melhor aproveitamento dos recursos, um sistema PCP eficiente é essencial. Os sistemas de PCP podem ser considerados fatores chave para o sucesso das operações industriais das organizações (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015).

Diante disso, com foco na busca de aumento da eficiência produtiva, a organização onde foi realizado o estudo (apresentada em detalhes no Capítulo 4) iniciou, no ano de 2016, a implantação do Tambor-Pulmão-Corda (TPC) nos processos industriais. Cox e Schleier (2013) apontam que a utilização do TPC na área de operações pode contribuir para a eficiência nos processos e na qualidade. Neste trabalho, o aumento de produtividade e eficiência pode ser entendido como uma melhor utilização dos recursos na manufatura dos produtos.

O TPC é um mecanismo de programação da produção utilizado para difundir os conceitos da Teoria das Restrições (TOC). Proposto inicialmente por Eliyahu Goldratt (1984) como uma das ferramentas para focalização de problemas, é empregado em sistemas de produção de bens e serviços (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013). Além disso, a utilização do TPC influencia a mudança na cultura da empresa (UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2014) e auxilia na focalização e direcionamento de recursos para elevar a restrição existente (BETTERTON; COX, 2009).

Estudos vêm sendo desenvolvidos para a avaliação da implantação da TOC, contudo são raros os estudos em sistemas ETO. O sucesso de aplicação dos princípios da TOC em empresas é discutido por Mabin e Balderstone (2003), mas não citam casos sobre empresas em sistemas ETO. Não avaliar a implantação dos princípios da TOC neste sistema desconsidera analisar a capacidade da TOC em lidar com a variabilidade de recursos operacionais, casos de volume reduzido de produção e oscilações na demanda (GOSLING; NAIM, 2009). O sistema produtivo ETO pode não apresentar gargalos, mas está propenso a transformar recursos não críticos em recursos com restrição de capacidade (CCR - *Capacity Constraint Resource*), dependendo dos produtos que forem planejados.

O sistema produtivo ETO apresenta desafios para o PCP. Wahlers e Cox III (1994) apresentam uma análise na qual descrevem como a TOC pode influenciar na escolha de fatores competitivos adequados para aumentar eficiência produtiva de uma empresa ETO. Contudo, não associam a alta variabilidade do processo devido às alterações de mercado e complexidade dos produtos ETO. A capacidade de prontidão de empresas que utilizam o TPC é discutida por Wu e Liu (2008) que destacam a importância de focalização das restrições existentes. Porém a avaliação de um ambiente produtivo multiprodutos, com variabilidade na produção, não é abordado.

A eficiência é uma característica importante no desempenho produtivo, mensurada com indicadores que auxiliam os gestores na compreensão dos resultados (FÄRE et al., 1985). Entre os métodos para mensuração do desempenho produtivo, a eficiência geral do equipamento (OEE) foi desenvolvido na década de 1960 por Seiichi Nakajima. Esse método é uma combinação de medições de disponibilidade, eficiência de desempenho e qualidade. Klos (2016) e Braglia (2018) comentam sobre a utilização do OEE para mensurar a eficiência produtiva em sistemas ETO, contudo entende-se que a análise do processo produtivo com base em apenas três variáveis pode desconsiderar dados que impactam no resultado da eficiência.

Afim de mensurar a eficiência produtiva considerando mais informações, a Análise Envoltória de Dados (DEA) é um método alternativo baseado em modelos matemáticos para demonstrar as relações entre os insumos e produtos. Seu benefício está na quantidade de variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) utilizadas (FERREIRA; GOMES, 2009). A ideia original da DEA é fornecer um método que, dentro de um conjunto de unidades de tomada de decisão (DMU), possibilite identificar as que apresentam melhores práticas e formam uma fronteira eficiente (COOK; SEIFORD, 2009).

Para mensurar a eficiência produtiva, a empresa avalia os resultados por meio da análise dos seguintes indicadores: consumo de material, tempo utilizado na fabricação dos produtos e entregas no prazo. Os indicadores da empresa são utilizados para tomada de decisões estratégicas, contudo não fornecem dados sobre os recursos consumidos, como tempo de preparação e utilização das máquinas. Cabe destacar que a empresa não possui indicador para avaliar a eficiência das operações. A inexistência desse indicador impõe dificuldades sobre o gerenciamento de recursos, alocação de novos investimentos, definição de metas e objetivos.

O controle do consumo de material utilizado nas ordens de produção da empresa impacta no resultado da produtividade, uma vez que aproximadamente 98% da matéria prima é originada do exterior e possui custos de importação e logísticos associados. Contudo, as informações repassadas aos gestores são posteriores aos eventos, os relatórios exibem acontecimentos passados e desta forma as medidas tomadas são retroativas e com menor impacto na produtividade.

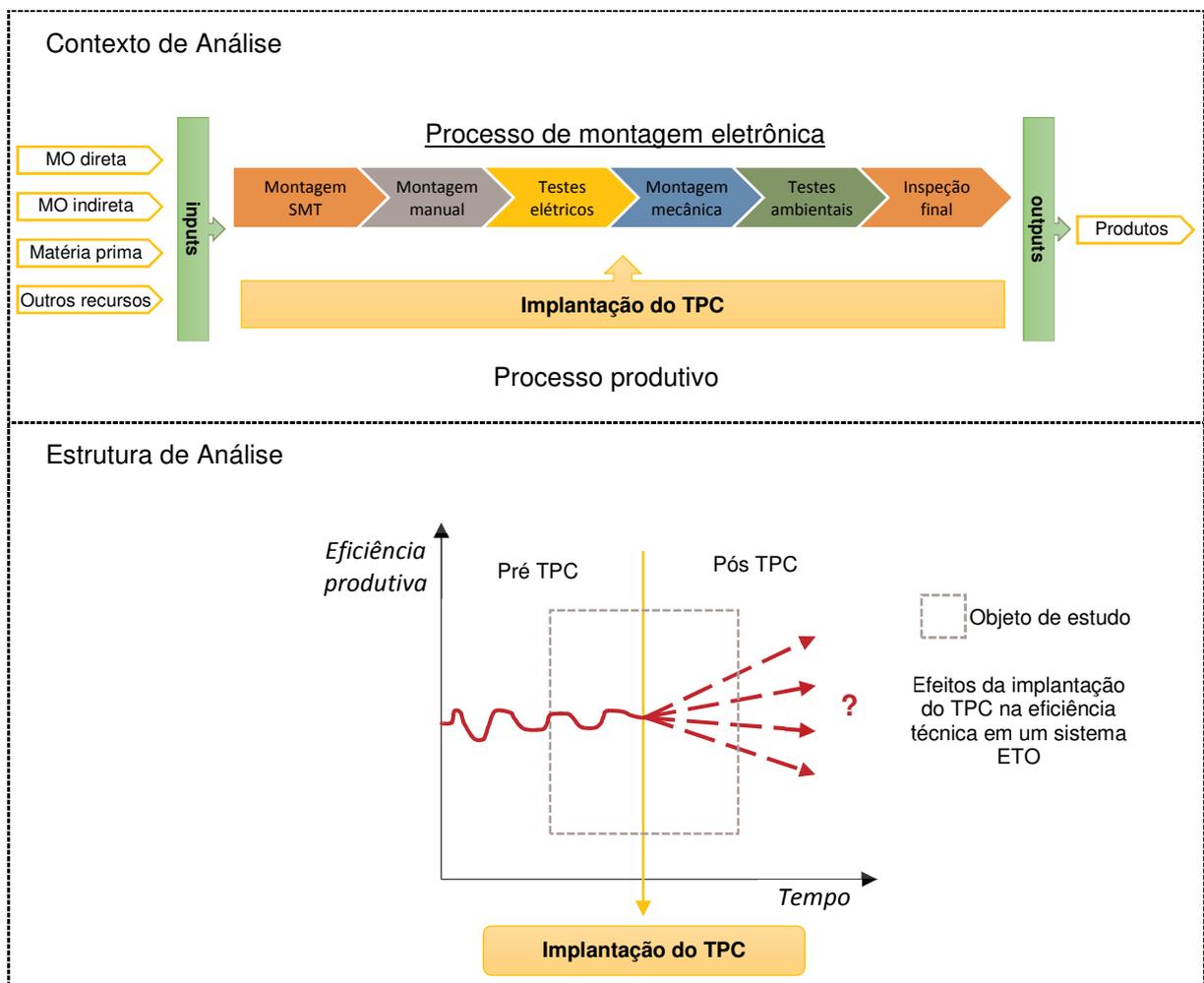
Em relação ao indicador do tempo utilizado na fabricação dos produtos, consiste na comparação do tempo apontado nas ordens de produção (tempo registrado no ERP - *Enterprise Resource Planning*) com produções anteriores. Tal medida possui um nível limitado de apuração da produtividade devido à variação existente entre os tamanhos de lotes. Nesse sentido, a eficiência deve ser interpretada como uma questão que abrange a organização de manufatura por inteiro, e não somente a eficiência de mão de obra (TARNAUD; LELEU, 2018). Portanto, é possível compreender que a medida de produtividade baseada no tempo utilizado na fabricação dos produtos não leva em conta recursos como: consumo de ferramentas, utilização de máquinas, suporte técnico, etc. Logo, o indicador de produtividade baseado no tempo utilizado na fabricação não possibilita que o gestor avalie as variáveis relevantes em relação à eficiência.

Por fim, o indicador de entregas no prazo tem o propósito de demonstrar a aderência entre as ordens de produção planejadas pelo setor de PCP e entregas realizadas. No entanto, este indicador não considera o nível de disponibilidade dos recursos, levando a empresa a operar em turnos com jornada de trabalho estendida, segundo turno e, por consequência, despesas adicionais como: hora extra dos funcionários, energia elétrica, infraestrutura, etc.

Logo, os indicadores de consumo de material, tempo utilizado na fabricação e entregas no prazo utilizados pela empresa não possibilitam aos gestores avaliar as variáveis relevantes em relação à eficiência, o que pode levá-los a gerenciar equivocadamente os recursos e tomar decisões erradas. A dificuldade para tomar decisões se origina na falta de informações adequadas e dificuldades para gerar as análises, como alocar recursos considerando apenas um processo de manufatura local, sem considerar o contexto global dos processos. Hadi-Vencheh et al.(2014) apontam que a análise da eficiência permite aos gestores tomadas de decisão mais qualificadas, podendo ser associadas a: I) utilização de recursos; II) redução dos custos; III) alocação de investimentos; e IV) definição de metas.

Portanto, sistemas ETO procuram transformar e manter os processos internos ágeis e eficientes (CHEN, 2006), lidando com o desafio das diferenças entre os produtos que dificulta a sincronização (MATT; DALLASEGA; RAUCH, 2014). Para solucionar este problema, os sistemas de PCP contribuem para o aumento da eficiência, e em 2016 a empresa implantou o TPC. Nesse sentido, a Figura 1 ilustra o desenho e objeto de pesquisa da análise a ser desenvolvida.

Figura 1 - Desenho e objeto da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto à análise do processo produtivo, este é constituído de um conjunto de variáveis chamadas de *inputs*. Dentre os *inputs*, estão os recursos necessários à produção do produto acabado como: mão de obra direta, mão de obra indireta, matéria prima, entre outros. Nesse contexto, para desenvolver a investigação, analisa-se o comportamento dos resultados produtivos por meio do tempo, contemplando os períodos pré e pós a implantação do TPC. Os produtos (*outputs*) da empresa são os

produtos eletrônicos, que possui o processo de montagem eletrônica subdividido nos seguintes setores: montagem SMT (*surface mount technology*), montagem manual, testes elétricos, montagem mecânica, testes ambientais e inspeção final.

O processo denominado montagem SMT, também conhecido como tecnologia de montagem de superfície, consiste no posicionamento de componentes eletrônicos sobre PCBs (placa de circuito impresso) e soldagem em fornos de refusão. Posteriormente, a montagem manual corresponde a montagem de componentes que não podem ser posicionados na etapa anterior devido a restrições de tamanho e/ou tecnologia empregada, como conectores, componentes PTH (*pin through hole*), entre outros. No setor de testes elétricos, 100% das PCBs são ligadas em equipamentos que verificam se os componentes montados nas etapas anteriores estão conforme as especificações técnicas.

Depois dos testes elétricos, é iniciada a etapa de montagem mecânica. Esta etapa consiste na integração das PCBs, com propósito de montar um produto eletrônico conforme pedido do cliente. Na etapa seguinte, 100% dos produtos são submetidos a testes ambientais que simulam o funcionamento em ambientes reais de uso, com variações de temperatura e vibração. Finalmente, é efetuada a inspeção final do produto. O processo produtivo da empresa analisada é apresentado em detalhe na seção de apresentação da empresa.

Após o entendimento do processo produtivo, é necessário compreender a estrutura de análise, para verificar se a implantação do TPC impactou na eficiência técnica do sistema produtivo. Nesse sentido, as seguintes hipóteses são testadas:

**H<sub>0</sub>:** Não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.

**H<sub>1</sub>:** Existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.

Para desenvolver a investigação do processo produtivo da empresa, analisa-se o comportamento dos resultados operacionais ao longo do tempo, contemplando os períodos pré e pós implantação do TPC. Esta análise tem como função evidenciar se os efeitos identificados trouxeram ou não resultados de melhoria sobre a eficiência do processo produtivo da empresa.

Entende-se que é importante efetuar a medição do comportamento dos resultados operacionais ao longo do tempo, inclusive baseado em indicadores. Goldratt (1984) destaca que o objetivo dos indicadores é motivar os envolvidos a operarem para a organização como um todo. A comparação dos resultados em diferentes períodos (pré x pós o TPC) pode fornecer respostas aos gestores da empresa quanto aos efeitos da implantação do TPC na organização. A compreensão destes efeitos pode apoiar a tomada de decisão quanto à melhor alocação de recursos e priorização de ações. Outra característica a ser considerada é que a implantação do TPC tenha otimizado o uso dos recursos produtivos, visto que uma melhor utilização dos recursos gargalos resulta em melhores resultados econômicos para a empresa.

Dado o efeito do TPC na eficiência de sistemas ETO como objeto de pesquisa, a consideração apropriada da incerteza da aplicação do TPC, e a incerteza observada no contexto produtivo de sistemas ETO, propõe-se a questão de pesquisa: “Quais os efeitos da implantação do TPC na eficiência técnica em um sistema produtivo ETO?”.

Considerando esta questão, a seção seguinte definirá os objetivos deste trabalho. Em seguida, a justificativa acadêmica do trabalho será delineada, indicando o estado atual da literatura relevante em relação aos objetivos propostos.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos da presente pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar os efeitos da implantação do Tambor-Pulmão-Corda (TPC) sobre eficiência técnica em um sistema produtivo de Engenharia sob Encomenda (*Engineer-to-Order* - ETO).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- a) Avaliar o comportamento da eficiência técnica em um sistema produtivo ao longo do tempo, verificando o período anterior e posterior à implantação do TPC;
- b) Identificar as razões pelas quais determinados recursos produtivos foram melhor utilizados pós a implantação do TPC;
- c) Avaliar a utilização dos recursos produtivos com base nas folgas existentes do modelo DEA;
- d) Descrever a implantação do TPC em um sistema produtivo ETO.

Na próxima seção são descritos os argumentos que justificam a elaboração do presente trabalho.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O setor aeroespacial colabora para o desenvolvimento do país, uma vez que a aplicação de tecnologias inovadoras ocorre transversal nas esferas militar e civil, e o produto final, uma aeronave, tem alto valor agregado para exportação. Este setor é caracterizado por exigir elevados investimentos, utilizar intensivamente mão de obra altamente qualificada e ser geradora de tecnologias de ponta com rápida evolução (GOMES; BARCELLOS; FONSECA, 2017). Adicionalmente, desde a década de 1970 existe a importância estratégica para o Brasil possuir o domínio da tecnologia aeroespacial, e assim, tornar-se gradualmente menos dependente do mercado externo (BNDES, 2017).

A cadeia produtiva da indústria aeronáutica brasileira é um segmento com oportunidade de desenvolvimento, seguindo-se caminhos alcançados em outros países (PINTO; MIGON, 2006). Em relação ao número de empregados e receita do setor, a Tabela 1 mostra a desproporção entre a União Europeia, EUA, Rússia, Canadá e Japão, os locais com os principais fabricantes de aeronaves, e o Brasil.

Tabela 1 - Número de empregos e receita no setor aeroespacial

	<b>União Europeia</b>	<b>EUA</b>	<b>Rússia</b>	<b>Canadá</b>	<b>Japão</b>	<b>Brasil</b>
Número de empregos diretos	590.700	487.600	403.000	88.961	36.000	25.500
Receita bruta (bilhões USD)	\$180	\$227	\$26,7	\$22	\$17,4	\$6,9

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ASD (2015) e AIA (2018)

Em 2017, o setor aeroespacial registrou mundialmente lucro recorde, um aumento de 18% em relação ao ano anterior, superando o recorde anterior em 2014. As 100 maiores empresas do setor aeroespacial, por receita, registraram USD \$728 bilhões em faturamento, um aumento de 4% em relação a 2016. A margem operacional também estabeleceu um recorde na indústria de 10,6%. Além disso, os aumentos significativos nos orçamentos de defesa dos EUA e aumento da demanda global impulsionam o setor que deve resultar na aceleração e crescimento da receita nos próximos anos (PWC, 2018).

No Brasil, segundo levantamento de Migon e Montoro (2009) existem aproximadamente 50 empresas com algum envolvimento no setor aeroespacial, sendo que 20 possuem envolvimento contínuo focado no setor. O Brasil é o sexto maior fornecedor de equipamentos aeroespaciais militares para os EUA (AIA, 2018). Existe oportunidade de crescimento das empresas que atuam neste setor, sendo um mercado estratégico para o mundo e também para o Brasil.

Nas últimas décadas, as especificações técnicas dos produtos utilizados nas aeronaves tornaram-se mais complexas, com prazos de entrega bem definidos e requisitos de qualidade elevados. A manufatura de produtos desenvolvidos conforme os requisitos específicos dos clientes possibilita criar novas tecnologias no projeto de máquinas e equipamentos. Isso está evidente, uma vez que a customização dos produtos ocorre antes do desenvolvimento de engenharia (GOMES; BARCELLOS; FONSECA, 2017).

O desenvolvimento de uma nova aeronave demanda, normalmente, entre dois e quatro anos para ser projetada, construída, certificada e ser entregue ao mercado. Aprimoramento de aeronaves existentes, que tenham sido alongadas (com mais assentos), encurtadas (com menos assentos) ou que ofereçam mais alcance demandam um tempo de desenvolvimento que raramente excede dois anos (BNDES, 2017).

Assim, o sucesso ao longo do tempo e dos ciclos econômicos de uma empresa do setor aeroespacial depende, em larga medida, da administração dos ciclos de seus produtos e do gerenciamento de novos investimentos (BNDES, 2017). A busca pela eficiência competitiva torna necessário o desenvolvimento de novas habilidades para implementar mudanças. Os sistemas de engenharia sob encomenda (ETO) dedicam-se principalmente à produção de bens de capital (HICKS; MCGOVERN, 2009). Desta maneira, partindo do pressuposto de que o setor aeroespacial apresenta crescimento nos resultados financeiros e o tempo para desenvolvimento de um produto é pré-estabelecido nos contratos, a aplicação de sistemas para otimizar os sistemas produtivos ETO é relevante.

Uma das ferramentas utilizadas para auxiliar as empresas é a Teoria das Restrições (TOC) desenvolvida por Goldratt (1984). O método de programação da produção Tambor-Pulmão-Corda (TPC) foi utilizado para difundir e implementar a filosofia da TOC (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013). Buscando maior compreensão sobre TPC em sistemas ETO, uma revisão sistemática da literatura (RSL) foi realizada. A

RSL desenvolvida, possuiu em dois estágios, a saber: I) buscou-se avaliar o interesse acadêmico pelo tema Tambor-Pulmão-Corda (TPC) e; II) buscou-se identificar pesquisas publicadas contemplando análises dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência produtiva.

As bases investigadas foram: EBSCO, Scopus, Science Direct, Scielo e Biblioteca digital brasileira de teses e dissertações (BDT/IBCT). As palavras-chave, filtros e demais características da RSL estão disponíveis no Anexo I deste trabalho. Os resultados relativos a evolução do interesse pelo tema no primeiro estágio da pesquisa, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Evolução das publicações acadêmicas sobre TPC

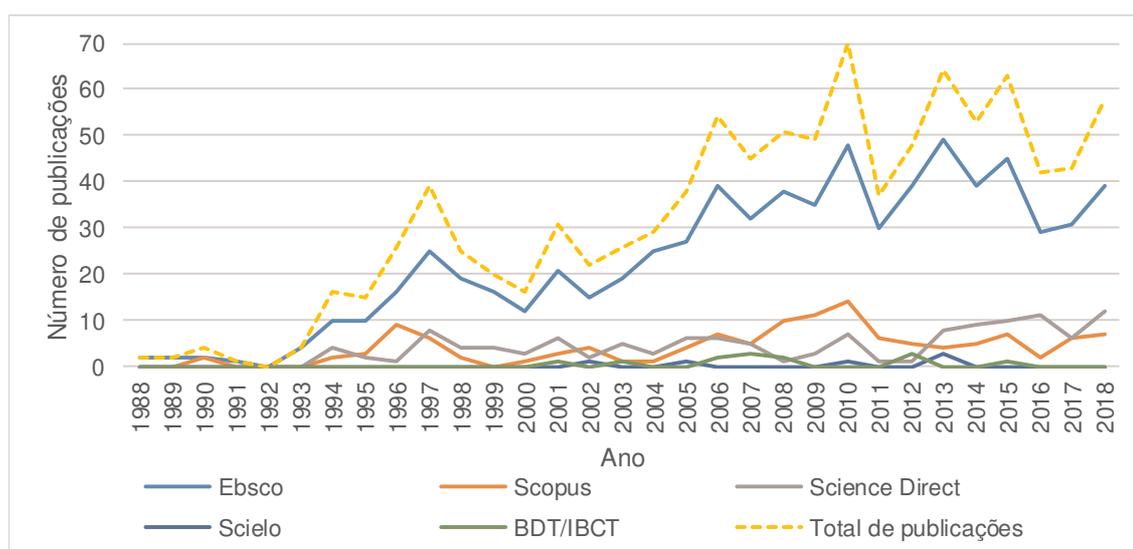
<b>Período</b>	<b>Ebsco</b>	<b>Scopus</b>	<b>Science Direct</b>	<b>Scielo - Nacional Internacional</b>	<b>BDT/IBCT</b>	<b>Total de publicações</b>
2018	39	7	12	-	-	58
2017	31	6	6	-	-	43
2016	29	2	11	-	-	42
2015	45	7	10	-	1	63
2014	39	5	9	-	-	53
2013	49	4	8	3	-	64
2012	39	5	1	-	3	48
2011	30	6	1	-	-	37
2010	48	14	7	1	-	70
2009	35	11	3	-	-	49
2008	38	10	1	-	2	51
2007	32	5	5	-	3	45
2006	39	7	6	-	2	54
2005	27	4	6	1	-	38
2004	25	1	3	-	-	29
2003	19	1	5	-	1	26
2002	15	4	2	1	-	22
2001	21	3	6	-	1	31
2000	12	1	3	-	-	16
1999	16	-	4	-	-	20
1998	19	2	4	-	-	25
1997	25	6	8	-	-	39
1996	16	9	1	-	-	26
1995	10	3	2	-	-	15
1994	10	2	4	-	-	16
1993	4	-	-	-	-	4
1992	-	-	-	-	-	0
1991	1	-	-	-	-	1
1990	2	2	-	-	-	4
1989	2	-	-	-	-	2
1988	2	-	-	-	-	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação à escolha do período de busca, foi limitado pela primeira publicação significativa de Goldratt, a partir do livro *“The Goal”* em 1984. A Tabela 2 relaciona o número de publicações por ano nas bases de dados sobre o tema e o número total de publicações por ano em função dos últimos 29 anos.

Para facilitar a compreensão, o número de publicações sobre TPC é ilustrada no Gráfico 1, que demonstra um contínuo interesse pelo tema pesquisado. Entre as publicações encontradas que apresentaram objetivo, metodologia ou palavras-chave similares à esta pesquisa, abordam assuntos como avaliar a capacidade de prontidão de empresas que utilizam o sistema TPC (WU; LIU, 2008) e contribuem propondo variações do TPC para otimização de sistemas produtivos que possuem ambientes com diferentes máquinas (SIRIKRAI; YENRADEE, 2006; THÜRER et al., 2017).

Gráfico 1 - Número de publicações de TPC



Fonte: Elaborado pelo autor

Manikas, Gupta e Boyd (2015), Kim, Roscoe Davis e COX III (2003), Koh e Bulfin (2004) e Takahashi et al. (2007) comparam o CONWIP com o TPC. Koh e Bulfin (2004) apresentaram uma abordagem utilizando processo de Markov e distribuição de probabilidade, para comparar e otimizar o TPC e CONWIP em uma linha de produção desbalanceada de três estações. Assim, Koh e Bulfin (2004) concluem que o TPC é um método melhor que o CONWIP no resultado de produtos entregues, além de apontarem que é difícil estudar sistemas produtivos complexos por meio de procedimentos analíticos, diferentemente do TPC. Contudo nenhum dos estudos mencionados é conduzido em sistemas produtivos ETO, onde cada produto é

considerado um projeto único. Além disso, não citam quais as variáveis mais prevaletentes pós implantação do TPC.

Votto e Fernandes (2014) realizam uma pesquisa-ação e propõem um método para implantar a produção enxuta e Teoria das Restrições (TOC) na indústria de bens de capital sob encomenda. Os autores concluem que os princípios da produção enxuta em conjunto com a TOC podem ser aplicados em sistemas de produção de bens sob encomenda, com resultados que contribuem para reduzir o tempo de resposta e melhorar a pontualidade de entrega. Entretanto, o trabalho não realiza uma análise sobre a eficiência operacional pós a implantação das melhorias e o trabalho é focado na indústria de bens de capital sob encomenda de grandes projetos, em um processo que possui predominantemente ferramentais para manufatura de produtos mecânicos. A inclusão de um estudo de caso sobre TOC pode contribuir para o setor aeroespacial.

Nas mesmas bases de dados utilizadas no primeiro estágio, efetuou-se um segundo estágio de pesquisa. Nesta fase, buscou-se identificar publicações que avaliaram os efeitos, em geral, da implantação do TPC em empresas ETO na eficiência, em particular. Com a pesquisa combinada das palavras-chave, disponíveis no Anexo I deste trabalho, não foram encontrados estudos relacionando aos efeitos da implantação do TPC na eficiência de empresas ETO. No entanto, outros estudos contemplam a implantação das ferramentas presentes na TOC que levaram ao aumento da eficiência (BETTERTON; COX, 2009; GONZALEZ-R; FRAMINAN; RUIZ-USANO, 2010; MABIN; BALDERSTONE, 2003; RHEE; CHO; BAE, 2010; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2014), inclusive em sistemas produtivos ETO (WAHLERS; COX, 1994).

As principais publicações identificadas no segundo estágio da RSL encontram-se resumidos no Quadro 1 que apresenta, para cada publicação, o autor, ano, título e as principais características.

Quadro 1 - Publicações de maior relevância sobre o tema

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Nome da publicação</b>	<b>Resumo</b>
Wahlers, James L. & Cox, James F.	1994	<i>Competitive factors and performance measurement: Applying the theory of constraints to meet customer needs</i>	Descreve como as modificações no planejamento tradicional são afetadas quando os princípios da TOC são aplicados. Expõem um estudo de caso em uma empresa ETO de como a empresa reduziu o tempo de produção e melhorou seu indicador de entregas.
Mabin, V.J. & Balderstone, S.J.	2003	<i>The performance of the theory of constraints methodology: analysis and discussion of successful TOC applications</i>	Descreve os resultados existentes sobre a aplicação da TOC na literatura e apresenta mais de 80 casos de sucesso, principalmente em organizações industriais.
Betterton, C.E. & Cox III, J.	2009	<i>Espoused drum-buffer-rope flow control in serial lines: A comparative study of simulation models</i>	Analisa a aplicação do TPC em um processo seriado de produto único e debate sobre capacidade protetiva e localização das restrições em um estudo de caso.
Gonzalez, P. & Framinan, J. & Ruiz, R.	2010	<i>A multi-objective comparison of dispatching rules in a drum-buffer-rope production control system</i>	Estudo sobre TPC em um ambiente industrial com multiprodutos. Propõem uma metodologia para obter robustez e aumentar a performance operacional.
Rhee et al.	2010	<i>Increasing the efficiency of business processes using a theory of constraints</i>	Aplicação prática da programação TPC em um gerenciamento de processos de negócio, com resultados positivos na eficiência da empresa.
Umble, M., Umble, E. & Murakami, S.	2014	<i>Implementing theory of constraints in a traditional Japanese manufacturing environment: The case of Hitachi Tool Engineering</i>	Estudo de caso com aplicação da TOC, TPC e gerenciamento de <i>buffer</i> em uma indústria japonesa. Ao final, os gerentes compreenderam que a TOC mudou a cultura comum da empresa.

Fonte: Elaborado pelo autor

A pesquisa realizada por Wahlers e Cox III (1994) apresenta a escolha de fatores competitivos adequados que impactam na medida de desempenho das empresas. O estudo de caso é realizado em uma planta industrial ETO, na qual após aplicados os princípios da TOC foi possível reduzir o tempo de produção e aumentar o desempenho das entregas. Os pesquisadores apontam que a sincronização da produção conforme o pedido dos clientes foi alcançada com a implantação do TPC, trazendo visibilidade e estabilidade nas operações, nos diferentes níveis operacionais. Contudo, não discutem sobre os efeitos das alterações pós a implantação dos princípios da TOC e não apresentam uma análise pré e pós implantação do TPC.

Mabin e Balderstone (2003) abordam o sucesso de aplicação dos princípios da TOC, apresentando uma análise das melhorias encontradas no desempenho operacional e financeiro de empresas *Make-to-Order* (MTO), *Assemble-to-Order* (ATO) e *Make-to-Stock* (STO), porém não em sistemas de Engenharia sob Encomenda (*Engineer-to-Order* - ETO).

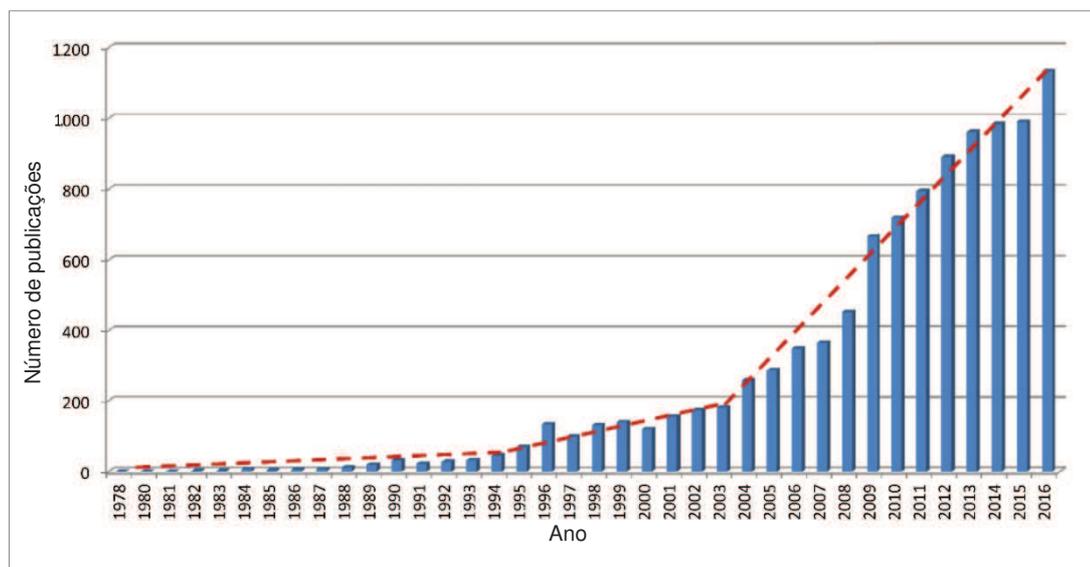
O desenvolvimento de um trabalho em um sistema produtivo ETO se justifica por citar as características existentes e fornecem informações importantes acerca de como o TPC lida com a variabilidade da demanda, como é realizado o gerenciamento das restrições quando a complexidade dos produtos é diferente em linhas de produção com reduzido volume de produção, porém alto valor agregado.

Gonzalez et al. (2010) apresentam um estudo de caso em um ambiente industrial multiprojeto. A performance do sistema TPC é afetada pelas regras fornecidas nas etapas prévias ao recurso gargalo. A pesquisa apresenta uma metodologia para obter robustez e aumentar a performance operacional, no entanto não apresenta quais os fatores que influenciam no resultado, e quais *inputs* e *outputs* apresentam maior impacto na eficiência do sistema.

Baseado nas publicações selecionadas e nos assuntos citados, é possível afirmar que a literatura sobre TPC em sistemas ETO ainda se encontra carente de pesquisas. É relevante avaliar o comportamento da eficiência ao longo do tempo para comprovar as implicações do TPC em sistemas ETO. A eficiência em sistemas produtivos ETO apresenta desafios, dado as características relacionadas a variabilidade e complexidade dos produtos.

A mensuração da eficiência auxilia os gestores na compreensão dos resultados. Klos (2016) e Braglia (2018) utilizam o OEE para mensurar a eficiência produtiva em sistemas ETO. A utilização de mais variáveis para medir a eficiência torna o estudo mais robusto, possibilita compreender os efeitos que influenciam o resultado e fornece parâmetros que podem ser adotados como referência (*benchmarking*). Nesse sentido, nas últimas quatro décadas houve um crescimento do interesse em medir a eficiência, em especial utilizando a análise envoltória de dados (DEA). Conforme pesquisa realizada por Emrouznejad e Yang (2017), desde o início das publicações feitas por Charnes, Cooper e Rhodes em 1978, até o ano de 2016, os estudos sobre o assunto chegaram a um montante de 10.300 trabalhos publicados. O Gráfico 2 mostra a evolução das publicações sobre a DEA no período de 1978 a 2016.

Gráfico 2 - Distribuição de publicações de DEA por ano



Fonte: Emrouznejad e Yang (2017)

As publicações relacionadas à Análise Envoltória de Dados podem ser classificadas em três estágios (EMROUZNEJAD; YANG, 2017): I) 1978-1994: neste estágio o crescimento do número de publicações é relativamente pequeno; II) 1995-2003: no segundo estágio o crescimento de publicações é relativamente estável e mantém uma média de 134 publicações por ano; III) 2004-2017: representa o terceiro estágio, no qual o número de publicações sobre DEA apresenta um crescimento exponencial com uma média de 680 publicações por ano, sendo que apenas no ano de 2016 houve mais de 1.100 publicações.

A DEA vem sendo aplicada nos últimos anos em várias áreas do conhecimento. Dentre os principais campos de atuação estão a indústria, agricultura, setor bancário, área da saúde e educação (EMROUZNEJAD; YANG, 2017). A quantidade total de palavras-chave relacionadas com DEA identificadas por Emrouznejad e Yang (2017) ultrapassa 25.137. Mediante a análise dos estudos incluídos na pesquisa é relevante ampliar o estudo relacionado a mensurar a eficiência em um sistema ETO. O desenvolvimento de um estudo de caso empírico que avalie a eficiência utilizando DEA no período pré e pós implantação do TPC contribui para o crescimento da literatura DEA.

Para a empresa, este estudo contribui por fornecer o uso de métodos para mensurar a eficiência não aplicadas. O uso do DEA auxilia na identificação das folgas das variáveis e na melhoria do processo. Além disso, disponibiliza para a empresa um

método com replicabilidade que pode ser usado para avaliar a eficiência em futuras linhas de produtos ou abranger um período de análise maior. Com isso, fornece aos gestores uma ferramenta para avaliação e tomada de decisão. A informação das folgas existentes nas três linhas de produtos auxilia os gestores a planejarem as linhas de produção. A partir da identificação das folgas é possível compreender quais variáveis *inputs* e *outputs* são mais afetadas pela implantação do TPC.

Do ponto de vista teórico, não foram identificados estudos de caso que avaliem quantitativamente os efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência produtiva de sistemas ETO da forma como esta pesquisa aborda o tema. Nesse sentido, entende-se que o presente trabalho contribui para a sustentação empírica e o avanço da teoria existente. A pesquisa ainda viabiliza a utilização do DEA como ferramentas para análise da eficiência de uma única planta industrial, sem a necessidade de dados produtivos de outras plantas ou organizações para comparação na análise.

Assim, percebe-se que é relevante desenvolver um trabalho que avalie os efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência técnica em um sistema ETO. Entende-se que esta pesquisa apresenta importantes contribuições para a indústria ETO, uma vez que a aplicação de um método de programação eficiente tende a otimizar os recursos. Além disso, este trabalho pode contribuir para a sociedade, podendo ser utilizado como referência para novos estudos voltados à análise de eficiência em outras empresas que implantaram ou pretendem implementar o TPC.

Diante do exposto, entende-se que esta pesquisa tem sua justificativa teórica relacionada à: I) um estudo de TPC no setor aeroespacial contribui para a literatura sobre TOC; II) os estudos sobre TPC em sistemas produtivos ETO são escassos e insuficientes; III) não há estudos que avaliam a implantação do TPC e resultado da eficiência com DEA. Do ponto de vista prático, entende-se que esta pesquisa tem sua justificativa relacionada à: I) analisar a eficiência utilizando o DEA traz informações precisas comparativamente aos indicadores produtivos tradicionais; II) a empresa em estudo não avaliou os resultados da implantação do TPC, e; III) Outras empresas que operam em um sistema ETO podem se beneficiar das resultados encontrados.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo está organizado em sete seções. No primeiro, denominado introdução, apresenta-se a contextualização do tema e abordam-se algumas características relacionadas à Tambor-Pulmão-Corda (TPC) e Análise Envoltória de Dados (DEA), com o propósito de sustentar a questão de pesquisa. Nesta seção também são exibidos o objeto de estudo e o problema de pesquisa, bem como o objetivo geral e os específicos, seguidos da justificativa de pesquisa que aborda a relevância deste trabalho do ponto de vista acadêmico e empresarial.

A segunda seção demonstra o referencial teórico relacionado ao tema de pesquisa, sendo apresentada uma revisão da bibliografia que aborda os principais tópicos relevantes ao tema e ao objeto de estudo. A terceira seção apresenta a metodologia de pesquisa, a qual está dividida em: delineamento da pesquisa, método de trabalho, projeto do modelo DEA, coleta dos dados, análise dos dados e delimitações do trabalho.

A seção quatro contém as informações sobre a empresa em que o estudo foi realizado, contextualizando os produtos comercializados e informações sobre o processo produtivo. Por fim, nesta seção apresenta-se uma breve contribuição para a literatura apresentando como deu-se a implantação do TPC, o método prático adotado pela empresa, os benefícios e dificuldades encontradas e as perspectivas para o futuro.

Posteriormente, na seção cinco efetua-se as análises das eficiências. Primeiramente, são analisados os efeitos da implantação do TPC na linha de computadores, seguido da linha de *displays* e eletrônicos. Na seção cinco também se apresenta as hipóteses testadas no processo produtivo e os testes estatísticos propostos (validação dos pressupostos da ANOVA e Wilcoxon) para verificar se existe diferença significativa entre as médias de eficiência do período anterior e posterior à implantação do TPC.

A seção seis contempla a discussão dos resultados obtidos e busca evidenciar as contribuições da pesquisa para a teoria e para a empresa. Por fim, na sétima seção, são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo, seguido de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para promover a estruturação da pesquisa, apresenta-se o referencial teórico com a descrição dos conceitos de sistemas produtivos de Engenharia sob Encomenda (*Engineer-to-Order* - ETO), Teoria das Restrições (TOC), Tambor-Pulmão-Corda (TPC), métodos para cálculo de eficiência e produtividade com maior ênfase na Análise Envoltória de Dados (DEA) e encerrando o referencial as análises estatísticas Shapiro-Wilk, Levene, Wilcoxon e ANOVA.

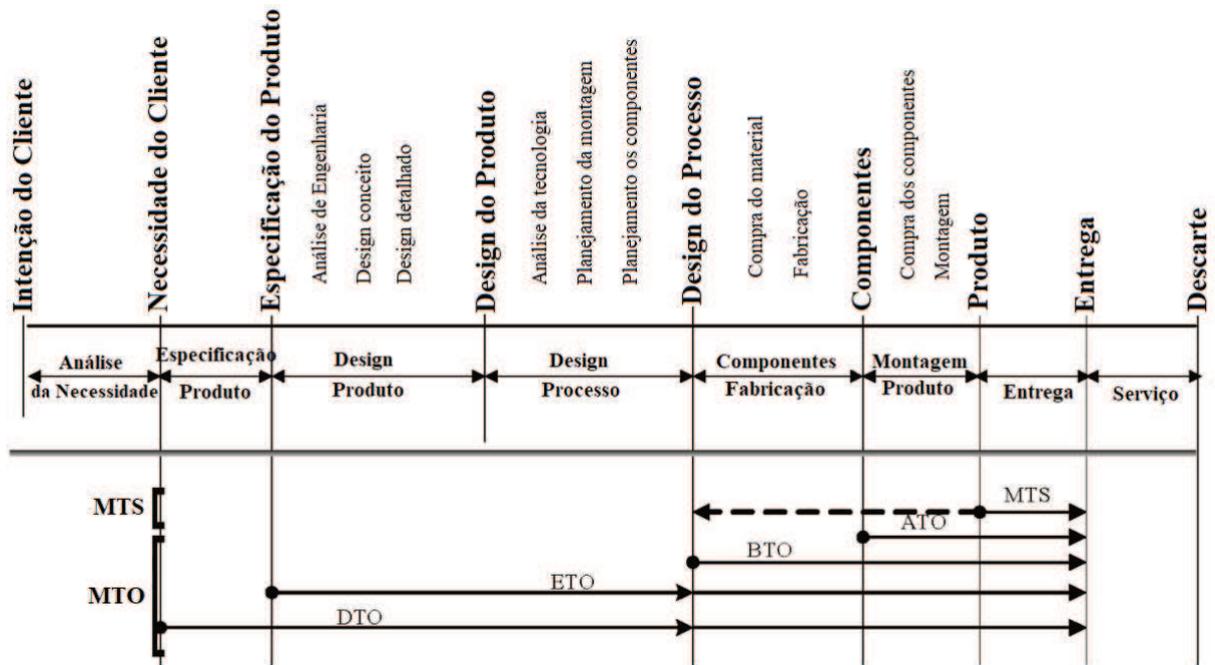
### 2.1 SISTEMAS PRODUTIVOS DE ENGENHARIA SOB ENCOMENDA (ETO)

As características de Engenharia sob Encomenda (*Engineer-to-Order* - ETO) são discutidas por vários autores como Amaro et al. (1999), Chen (2006) e Yang (2013). ETO é um dos cinco conceitos operacionais empresariais citados pela literatura (CHEN, 2006).

O ETO fornece produtos únicos, em geral, altamente customizados para atender os requisitos individuais de clientes e são produzidos em reduzido volume conforme pedido. Para empresas de manufatura ETO, cada produto é resultado de um projeto diferente, com ordens de entrega gerenciadas como um projeto único (YANG, 2013). Ao todo, o processo ETO inclui desde o desenvolvimento de produto, que inicia com as especificações e termina com o desenvolvimento de engenharia e a entrega do produto em si. Normalmente é limitado e passa por um processo de engenharia que envolve as tarefas de análise de engenharia, desenvolvimento do conceito, desenvolvimento da arquitetura, criação de protótipos e o desenvolvimento do processo de fabricação e não inclui as fases de aquisição de material, fabricação e montagem (CHEN, 2006).

Para melhor compreender os cinco conceitos operacionais empresariais, a Figura 2 apresenta o sumário das etapas que envolvem desde a necessidade do cliente até a entrega do produto.

Figura 2 - Sumário dos conceitos operacionais empresariais



Fonte: Adaptado de Chen (2006)

*Make-to-Stock* (MTS) e *Make-to-Order* (MTO) são os modelos operacionais genéricos mais utilizados nas indústrias. MTS geralmente produz produtos em volume. O planejamento é preparado para abrir ordens de produção que manufaturam produtos conforme a previsão de demanda e volume existente do inventário. Os produtos montados são enviados para o almoxarifado e compõem o inventário da empresa que de acordo com as políticas existentes é designado para minimizar o tempo de entrega e custos operacionais. No entanto, neste caso o cliente é limitado a escolher apenas os itens disponíveis no inventário. O preço de venda é o determinante para retirar os produtos do inventário (CHEN, 2006).

O modelo operacional MTO, em contrapartida, busca não manter estoque de produtos prontos e objetiva customizar os produtos para atender as necessidades individuais. O preço de venda de cada produto é estimado e negociado no momento da compra. Tipicamente os custos são maiores e o prazo de entrega também, quando comparado com o MTS. Ainda, dependendo do momento em que o produto MTO foi comprado pode ser classificado como: *Assemble-to-Order* (ATO), *Build-to-Order* (BTO), *Engineer-to-Order* (ETO) e *Develop-to-Order* (DTO) (CHEN, 2006).

As características dos modelos operacionais empresariais, com foco na perspectiva do cliente, produto e processo são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características dos conceitos operacionais empresariais

<b>Classificação II</b>	<b>Cliente</b>	<b>Produto</b>	<b>Processo</b>
<b><i>Develop-to-Order (DTO)</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige customização;</li> <li>- Prazo de entrega longo;</li> <li>- Produtos únicos;</li> <li>- Colaboração do cliente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Customização pura;</li> <li>- Custo unitário elevado;</li> <li>- Dificuldade elevada;</li> <li>- Produzido apenas quando uma ordem é incluída.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Jobshop</i>;</li> <li>- Uso da tecnologia da informação;</li> <li>- Pequeno volume de produção.</li> </ul>
<b><i>Engineer-to-Order (ETO)</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige customização;</li> <li>- Prazo de entrega longo;</li> <li>- Produtos únicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Customização pura;</li> <li>- Dificuldade elevada;</li> <li>- Possui valor agregado;</li> <li>- Produzido apenas quando uma ordem é incluída.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Jobshop</i>;</li> <li>- Pequeno / Médio volume de produção;</li> <li>- Não repetitivo.</li> </ul>
<b><i>Build-to-Order (BTO)</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige customização;</li> <li>- Vários itens em catálogo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo elevado;</li> <li>- Produzido apenas quando uma ordem é incluída;</li> <li>- Inclui modularização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Jobshop</i>;</li> <li>- Pequeno / Médio volume de produção;</li> <li>- Exige flexibilidade.</li> </ul>
<b><i>Assemble-to-Order (ATO)</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige customização;</li> <li>- Prazo de entrega curto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Customização padronizada;</li> <li>- Produzido apenas quando uma ordem é incluída;</li> <li>- Inclui modularização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Linha de produção média;</li> <li>- Automação média.</li> </ul>
<b><i>Make-to-Stock (MTS)</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponível imediatamente;</li> <li>- Padronização elevada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Alto volume de produção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção em massa;</li> <li>- Tempo de ciclo reduzido;</li> <li>- Inclui automação.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Amaro et al. (1999) e Molina et al. (2007).

O ATO é um modelo empresarial operacional que engloba a montagem final do produto com componentes previamente montados, geralmente compartilhado com outros produtos similares. O BTO compreende a fabricação dos componentes e/ou submontagens e a montagem final do produto, com objetivo de não manter componentes em estoque. Para os modelos ATO e BTO a modularização é

considerada chave para as operações. O modelo ETO se dedica ao projeto de produto e processo, de modo que o design do produto e processo podem ocorrer em paralelo a fim de minimizar o tempo de desenvolvimento do produto. O DTO é semelhante ao ETO, exceto que ele começa um passo antes, na fase de especificar as necessidades do cliente ou definir uma especificação do produto. Para este modelo existe geralmente colaboração com o cliente. Para o planejamento das operações empresariais, o DTO pode ser considerado um modelo ETO no qual as atividades de especificação são tratadas como parte da etapa de design de engenharia (CHEN, 2006).

Durante a etapa de cotação do produto ETO, normalmente as especificações são fornecidas pela engenharia e utilizadas pela equipe de vendas para avaliar com os clientes (WENG et al., 2014). Nesta etapa, obter especificações mínimas necessárias para cotação é necessário um longo período de tempo (ELGH, 2012), pois os clientes ainda não possuem as especificações e as propostas iniciais são ofertadas pela equipe de vendas conforme sua experiência com produtos similares (WENG et al., 2014). Pode-se dizer que até o recebimento de um pedido firme do cliente e posterior análise da engenharia, as empresas ETO possuem pouco conhecimento sobre quais componentes são necessários comprar e como produzi-los (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). Além de que, não é possível prever o momento que uma cotação é convertida em um pedido em carteira (MUNTSLAG, 1994).

Os produtos ETO possuem uma estrutura complexa e posteriormente há o desdobramento do processo de montagem que contém uma diversidade de componentes normalmente exigindo uma demanda muito baixa, enquanto outros componentes são necessários em quantidades médias ou grandes. Alguns dos componentes e sistemas são altamente personalizados e tecnicamente avançados (HICKS; MCGOVERN; EARL, 2000). É característico do sistema ETO não possuir a lista de materiais completa nos primeiros estágios de desenvolvimento, como consequência a lista final de preço dos materiais também não existe e os fornecedores precisam ser contatados quando uma nova especificação é definida (ELGH, 2012).

Nas operações clássicas de ETO a funcionalidade do produto é o principal foco durante o seu desenvolvimento. Vários protótipos podem ser criados na etapa de desenvolvimento do design, mas frequentemente podem ser considerados como produtos capazes de serem entregues ao cliente. Na maioria das vezes estes não são desenvolvidos com a padronização do processo. A padronização do processo de

fabricação pode ser um foco durante o desenvolvimento do produto, desde que exista a necessidade de muitos lotes e alto volume de produção (CHEN, 2006).

Nas operações ETO, o tempo para desenvolvimento de um novo produto deve ser otimizado, ao contrário dos produtos padronizado existe a demanda crescente por produtos personalizados. Em particular, destaca-se a flexibilidade do produto, flexibilidade de montagem, flexibilidade da força de trabalho e flexibilidade dos fornecedores (GOSLING; NAIM, 2009). Em contrapartida, o nível de personalização leva a um aumento de custos, riscos e prazos de entrega mais longos. Em vários casos as empresas reconheceram esse custo e investem na padronização de projeto e design modular. Contudo essa abordagem provou ser difícil devido à quantidade de requisitos específicos dos clientes (HICKS; MCGOVERN; EARL, 2000).

No ETO, os projetos de desenvolvimento costumam levar um prazo relativamente longo para serem concluídos, normalmente custam caro (MOLINA et al., 2007) e existe o risco que o cronograma não seja cumprido (WENG et al., 2014). Isto ocorre porque as etapas de desenvolvimento e engenharia são um processo que incluem atividades normalmente desconhecidas na fase inicial e podem consumir mais do que a capacidade estipulada durante o orçamento (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). Os riscos relacionados aos atrasos, variações nas especificações, alterações de engenharia, por exemplo, passam a exigir uma margem de segurança no orçamento junto ao cliente (ELGH, 2012), a fim de cobrir as incertezas (KONIJNENDIJK, 1994). Ou seja, em vários casos os preços e prazos ofertados são superestimados para o fornecedor minimizar os riscos de perder dinheiro com as transações (ELGH, 2012). A inclusão da margem de segurança faz com que mesmo nas empresas mais competentes a maior parte das cotações feitas pelos clientes não chegam a se transformar em ordens de produção (MUNTSLAG, 1994).

Para acelerar a elaboração dos orçamentos, as empresas ETO costumam estimar seus custos baseando-se em produtos semelhantes produzidos no passado. Portanto, a previsão inicial é apenas uma aproximação dos custos do novo projeto (WENG et al., 2014). Contudo, o reduzido nível de precisão das estimativas devido às variações na utilização dos recursos produtivos, alinhado ao reduzido nível das estimativas dos custos de matéria prima, dado o desconhecimento da estrutura final do produto, colaboram para a distorção global dos custos (ELGH, 2012).

É preciso um longo tempo para as definições a fim de esclarecer o que os clientes precisam em um novo pedido na produção (WENG et al., 2014). A taxa de sucesso das cotações no segmento da construção civil, por exemplo, é frequentemente menor que 30%. Isso ocorre, porque o cliente busca considerar o maior número de opções antes de decidir qual o fornecedor final (KONIJNENDIJK, 1994). Para não perderem as oportunidades de aquisição de novas ordens de produção, dado a intensa concorrência do segmento, as empresas ETO costumam firmar contratos com seus clientes antes mesmo de tomarem conhecimento de todas as especificações existentes (WENG et al., 2014). Isto ocorre porque o processo de orçamento não é padronizado (ELGH, 2012), e as especificações iniciais podem requerer uma alocação e disponibilidade de recursos não disponíveis nas etapas iniciais do projeto (WENG et al., 2014).

A qualidade do produto entregue é importante na operação ETO, uma vez que as especificações técnicas do cliente são conferidas nos mínimos detalhes. É preciso ter excelência nos produtos, ainda que a concorrência pelo preço final oferecido seja o primeiro critério pelo qual novos contratos são decididos (HICKS; MCGOVERN; EARL, 2000). Contudo, Votto e Fernandes (2014) apontam que na indústria de bens de capital sob encomenda, por exemplo, a velocidade e o cumprimento dos prazos de entrega são fatores competitivos reconhecidos pelos clientes e, não apenas a qualidade. Uma entrega mais rápida e pontual, permite ao cliente melhor estruturar o fluxo de caixa do projeto e possibilita decidir postergar o investimento ou antecipar o início de uma nova operação. Assinar um pedido no ETO depende do preço ofertado e prazos de entrega que os fornecedores estabelecem para especificar, desenvolver, produzir e entregar os produtos em condição de excelência (AMARO et al., 1999).

Uma das características do sistema ETO é que para oferecer produtos personalizados, busca-se não trabalhar com estoques (MOLINA et al., 2007). Em geral, as empresas não possuem inventário de matéria prima suficiente pra produzir um novo produto, uma vez que a aquisição é realizada após as especificações de engenharia, e assim, não existe inventário de produtos acabados (MATT; DALLASEGA; RAUCH, 2014). Assim, não é possível trabalhar com estoques e satisfazer as necessidades específicas de cada cliente de imediato (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). Por natureza, a produção sob encomenda não permite a manutenção de estoques, independente da etapa do processo (VOTTO; FERNANDES, 2014).

Fazer uma estimativa do tipo e quantidade exata de recursos necessários para atender o pedido torna o planejamento da produção e alocação de capacidade uma tarefa complexa (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). O controle da produção deve liberar ordens de produção para atender os prazos de entrega, quantidades e subcontratações, além de executar suas atividades em consenso com o departamento de marketing e vendas, tendo em vista o impacto nas entregas (KONIJNENDIJK, 1994). Deve-se considerar que uma característica do ETO é possuir processos produtivos pouco automatizados e não repetitivos, com alto valor agregado (MOLINA et al., 2007).

Enfim, devido aos problemas recorrentes do controle de produção, o tempo de processamento necessário para fabricação de um novo produto pode ser maior do que o estipulado na fase de cotação. O que compromete a data de entrega acordada junto ao cliente (MUNTSLAG, 1994). A dificuldade encontrada nas indústrias ETO consiste em que cada setor da produção existe mais de um projeto que deve ser controlado ao mesmo tempo, com diferentes etapas produtivas e datas de entregas (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993). Reservar a capacidade de produção em uma indústria ETO é um processo delicado (MUNTSLAG, 1994). Isto tende a ocorrer devido a restrições de recursos para um determinado projeto, à incerteza existente nas etapas de desenvolvimento e pode comprometer os demais projetos em produção (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993).

## **2.2 TEORIA DAS RESTRIÇÕES (TOC)**

Conforme Watson et al. (2007) e Cox (2013), o desenvolvimento da filosofia de gerenciamento das Teoria das Restrições (TOC) teve início durante os anos oitenta pelo físico Israelense Eliyahu Goldratt e amplamente divulgada a partir do livro de negócios em formato de romance “A Meta”, de (1984).

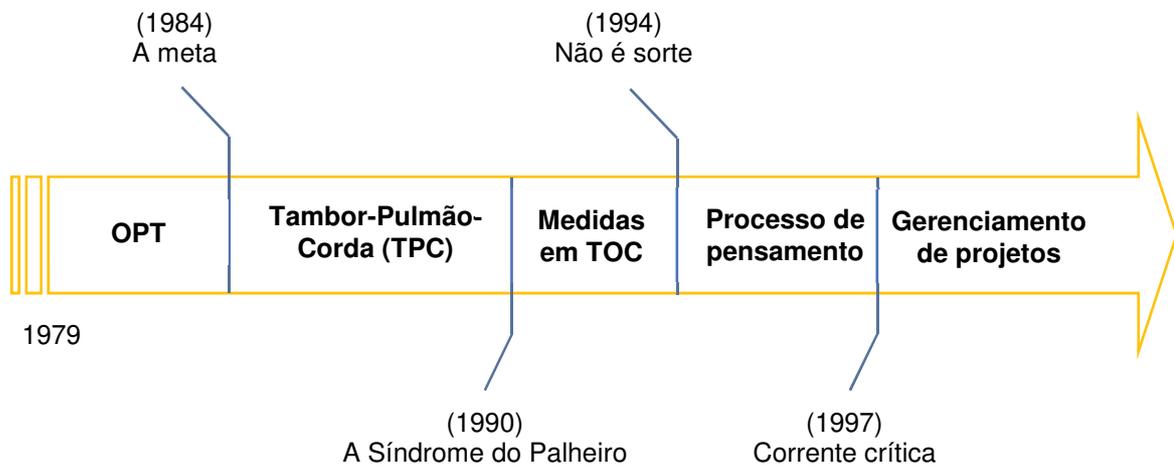
Quando a TOC surgiu, outras práticas de gestão e administração da produção, tal como a Gestão da Qualidade Total ou *Total Quality Management (TQM)* e *Just In Time (JIT)* estavam ganhando popularidade. Diante deste cenário, Goldratt optou por divulgar suas informações e ideias por meio de *workshops* e publicações. Ainda que muitos não tivessem uma verdadeira percepção sobre as implicações da TOC, seus conceitos ganharam notoriedade e publicações acadêmicas sobre seus assuntos começaram a surgir e promover o debate (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013).

Para entendimento sobre a evolução da TOC e suas particularidades, Watson et al. (2007) classificam em ordem cronológica as publicações (em língua inglesa) de Goldratt em cinco momentos (Figura 3):

1. OPT (*Optimized Production Tecnology*) – *software* para programação de produção;
2. A Meta – aborda os conceitos de Tambor-Pulmão-Corda (TPC);
3. A Síndrome do Palheiro – aborda os conceitos de medidas em TOC;
4. Não é Sorte – o processo de pensamento aplicado a vários tópicos;
5. Corrente Crítica – os conceitos de gerenciamento de projetos com o TOC.

De acordo Watson et al. (2007), desde a década de oitenta, o desenvolvimento da TOC obteve crescente reconhecimento no meio acadêmico e dos negócios. Muitas empresas aplicaram suas técnicas e obtiveram resultados expressivos. Dentre elas, pode se citar algumas listadas na Fortune 500 como, 3M, Amazon, Boeing, Delta Airlines, Ford Motor Company, General Eletric e General Motors.

Figura 3 - Momentos no desenvolvimento da TOC



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Watson et al. (2007)

A fim de facilitar a compreensão dos princípios da TOC, Goldratt propôs o desenvolvimento de um *software* de programação de produção que ficou conhecido pela sigla OPT (*Optimized Production Tecnology*), desenvolvido e comercializado inicialmente pela Empresa *Creative output*. Este tinha como objetivo a simulação de algumas rotinas vivenciadas pelos gestores nas organizações e os direcionava para as melhores técnicas com base na filosofia TOC. O *software* OPT também realizava

a integração e gerenciamento em três diferentes áreas: logística/produção, medidas de desempenho e ferramentas para resolução de problemas (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013).

O TPC evoluiu gradualmente da experiência de Goldratt com o *software* OPT, sendo que a primeira versão era basicamente um Kanban automatizado. As primeiras versões do OPT restringiam-se a ambientes de produção repetitivos. Goldratt percebeu que nem todas as máquinas precisam ser utilizadas 100% do tempo, mas apenas as que são a restrição do sistema, e assim lançou novas versões do *software* no qual as operações não restritivas produzissem somente o necessário para garantir o funcionamento das operações restritivas. Constatando que apenas os gargalos (restrições) do sistema deveriam ser programados, as outras estações têm capacidade ociosa e podem manter o ritmo e, portanto, a precisão e análise dos dados era de fato essencial apenas na restrição (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013; GOLDRATT, 1988).

O *software* OPT ainda buscava demonstrar a relação entre os indicadores operacionais e globais do sistema com as nove regras do OPT (GOLDRATT, 1988):

1. Balancear o fluxo, não a capacidade;
2. O nível de utilização de um recurso não gargalo não é determinado por seu potencial, mas pela restrição do sistema;
3. Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos;
4. Uma hora perdida em um gargalo é uma hora perdida no sistema como um todo;
5. Uma hora economizada em um recurso não gargalo é apenas uma miragem;
6. Os gargalos determinam tanto o ganho quanto os estoques;
7. O lote de transferência pode não ser, e muitas vezes não deveria ser, igual ao lote de processamento;
8. Os lotes de processamento devem ser variáveis, e não fixos;
9. As programações devem ser estabelecidas examinando-se simultaneamente todas as restrições. Os tempos de atravessamento resultam da programação e não é possível predeterminá-lo.

Balancear a capacidade não é produtivo quando existem restrições que limitam o crescimento do sistema, uma vez que as restrições determinam o desempenho e deve-se garantir que não fiquem ociosas e estejam protegidas contra eventuais

interrupções. Para balancear o fluxo, a capacidade anterior à restrição deve ser maior que a capacidade da restrição, pois quem limita a utilização dos recursos não gargalos é a restrição e não o potencial de utilização de cada recurso. Em uma linha de montagem simples, pode-se compreender que as restrições determinam o desempenho do recuso não gargalo. Se existir dois ou mais gargalos em uma mesma linha, a restrição será o posto que não consegue atender a demanda. As estações posteriores à restrição não conseguem ter um processamento mais rápido do que a restrição porque o material deve passar pela restrição para chegar a elas (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013).

Na terceira regra, ao ativar um recurso não gargalo para que produza mais do que é possível ser processado pela restrição, não agrega nenhum valor para a empresa. Para um recurso restritivo ser considerado gargalo, não é possível atender a demanda de mercado mesmo que trabalhe 24 horas por dia e 7 dias por semana. Portanto, uma hora perdida na restrição trata-se de uma perda para todo o sistema produtivo, do contrário é apenas uma miragem. Não existe nenhum reservatório de tempo por meio do qual se possa repor uma hora perdida na restrição (GOLDRATT, 1988).

É compreensível que o posto com menor capacidade em uma linha de montagem determina o desempenho da produção. O OPT amplia esse princípio para os fluxos produtivos por encomenda, onde a restrição pode sofrer mudança porque o *mix* de produtos varia de um período para o outro. Contudo, normalmente existe um recurso considerado o coração da fábrica e o motivo pelo qual a maioria dos pedidos é obtida. Esse recurso tende a ser necessário em quase todas os produtos e torna-se a restrição de longo prazo do sistema. Assim, não apenas nas linhas de montagens simples, a restrição determina a produção do sistema (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013).

Quando os lotes de transferência (número de itens transferidos entre duas estações) são menores que os lotes de processamento (número de itens processados entre as preparações), várias estações podem processar simultaneamente um pedido, reduzindo o tempo de atravessamento na fábrica e podendo ser considerado uma vantagem competitiva no mercado. A oitava regra aponta que o lote de processamento deve ser variável e não fixo, a fim de poder acompanhar a demanda do mercado, principalmente para poder lidar com a sazonalidade existente e garantir que não sejam criados grandes estoques no decorrer do ano (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013).

Kim et al. (2008) citam que a TOC pode ser apresentada como um método de estruturação e solução de problemas aplicável a diversas áreas de operações das empresas, desde a produção, projetos, serviços, contabilidade e finanças. Ela considera a empresa como um conjunto de elementos interdependentes responsáveis pelo desempenho global do todo, em formato de um sistema. A TOC presume que os esforços devem ser direcionados no gerenciamento do gargalo do sistema (restrição), ou seja, no elo mais fraco que possa limitar a capacidade de obter o melhor resultado (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013; GOLDRATT, 1988).

Os indicadores de desempenho da TOC são discutidos nos livros *A Meta* (1984), *A Corrida* (1986) e *A Síndrome do Palheiro* (1990), nos quais Goldratt propõe inicialmente que as empresas devem definir com clareza qual a meta global da organização. Segundo Goldratt e Cox (1984) a meta da Empresa consiste em ganhar dinheiro hoje e no futuro. Contudo, há uma dificuldade em mensurar diretamente esta meta e torna-se necessário o desdobramento em indicadores para determinar se as ações gerenciais tomadas no âmbito da Empresa estão levando a organização no caminho da meta.

Goldratt (1990) expõe que deve-se combater ao máximo o aumento da eficiência dos recursos e setores isolados, visto que a soma dos ótimos locais não é igual ao ótimo global. Visando atingir a meta nas empresas a Teoria das Restrições propõe a utilização dos cinco passos de focalização, descritos sucintamente a seguir:

- Passo 1 - **Identificar** as restrições do sistema. As restrições existentes podem ser internas ou externas. Quando a demanda do mercado é maior que a capacidade da fábrica, tem-se um gargalo de produção. Caracterizando uma questão estrutural do sistema produtivo em que a capacidade da fábrica é igual a capacidade do gargalo. Quando a demanda do mercado é menor, há uma capacidade de produção maior que a demanda, ou seja, a restrição é externa a fábrica (a restrição está relacionada com o mercado).
- Passo 2 - Definir como **explorar ao máximo** as restrições do sistema. Se a restrição é interna (gargalos) a melhor decisão consiste em maximizar o ganho no gargalo. Se a restrição for externa, não existem gargalos na fábrica e, assim, o ganho estará limitado pelas restrições do mercado.
- Passo 3 - **Subordinar** todo o resto do sistema à restrição explorada tomada no passo 2. Independentemente se a restrição for externa ou interna, este passo consiste na proposta de reduzir ao máximo os inventários e as despesas

operacionais. Para que isto seja possível, existe a necessidade de uma gestão eficaz da lógica de estoques com objetivo de redução.

- Passo 4 - **Elevar** a capacidade das restrições do sistema. Se a restrição for interna (gargalo) a ideia é aumentar a capacidade de produção dos gargalos. Para que este passo aconteça, pode ser necessário a compra de máquinas (recursos), redução dos tempos de preparação (*setup*) no gargalo, etc. Se a restrição for externa, são necessárias ações para aumento da demanda do mercado, exigindo ações de marketing, alteração no preço dos produtos, criação de novos produtos, etc. A proposta é melhorar o desempenho do sistema para um nível superior ao que é possível com a restrição atual.
- Passo 5 - Se as restrições tiverem sido eliminadas, **voltar ao primeiro passo**, nas não permitir que a **inércia** se torne a restrição do sistema. Na lógica da TOC as melhorias não devem ter fim, ou seja, a TOC visa um processo de melhoria contínua visando o atingimento permanente da meta global da empresa.

A TOC define que as formas convencionais disponíveis não oferecem as respostas necessárias e cita que as organizações são formadas por um conjunto de elos, de processos, de recursos independentes onde a prioridade deve ser despender energia no aumento do ganho ao invés da redução de custos (GUPTA; BOYD, 2008).

### 2.2.1 Indicadores de desempenho da TOC

Para atingir a meta da empresa, Goldratt e Cox (1984) apontam que existem três indicadores globais que são usuais (LL - Lucro líquido, RSI - Retorno sobre o investimento e FC - Fluxo de caixa) e propõem três indicadores operacionais de performance com ações concretas para o dia a dia da empresa (Ganho, Inventário e DO). O Quadro 3 sintetiza o desdobramento da meta, os indicadores aplicáveis e o conceito/aplicação prática dos respectivos indicadores.

Quadro 3 - Desdobramento da meta

<b>Desdobramento da meta</b>	<b>Indicador</b>	<b>Conceito/Aplicação</b>
<b>Indicadores globais</b>	Lucro líquido (LL)	Medidor absoluto do resultado. Insuficiente quando analisado individualmente, uma vez que duas empresas podem ter o mesmo lucro líquido, mas diferentes investimentos envolvidos.
	Retorno sobre o investimento (RSI)	Medidor relativo. Obtido pela divisão do lucro líquido pelo investimento.
	Fluxo de caixa (FC)	Medidor de sobrevivência, ou seja, uma condição necessária. Indicador utilizado no curto prazo.
<b>Indicadores operacionais</b>	Ganho	Receita obtida pelas atividades operacionais. Considerado o primeiro lugar na escala de importância da TOC.
	Inventário/investimento	O dinheiro despendido no que a empresa espera obter retorno. Determina a futura habilidade da empresa em competir em seus mercados.
	Despesa operacional das operações	Capital despendido para transformar o investimento em ganho.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Goldratt e Cox (1984)

Para ligar as decisões gerenciais diárias da organização com os indicadores globais, Goldratt e Cox (1984) expõem três indicadores operacionais. Neste momento há uma divisão conceitual entre o mundo do ganho, com a utilização do indicador operacional Ganho e o mundo dos custos, com os indicadores de Inventário e Despesa operacional. Goldratt (1994) defende que a empresa deve priorizar o mundo dos ganhos em relação ao mundo dos custos, pois não há qualquer limitação intrínseca para aumentar o ganho nas empresas. Desta forma o indicador operacional Ganho é considerado o primeiro lugar na escala de importância da Teoria das Restrições Goldratt (1994).

Em relação aos indicadores do mundo dos custos, Goldratt (1994) aponta que os Japoneses demonstraram os benefícios da redução do inventário no aumento dos ganhos futuros nas empresas, como o aumento na qualidade dos produtos, entrega dos produtos no prazo negociado com os clientes, diminuição do tempo de atravessamento (*Lead time*), redução dos prazos de entrega, entre outros. Gupta et al. (2010) afirmam que a métrica operativa usada em todas essas definições é dinheiro.

O Lucro Líquido (LL) é um medidor absoluto do resultado e representa o Ganho subtraído das Despesas Operacionais (DO). Sua utilização é insuficiente quando analisado individualmente, uma vez que duas empresas podem ter o mesmo lucro líquido, mas diferentes investimentos envolvidos (GOLDRATT; COX, 1984; LOCKAMY; COX, 1994).

$$LL = G - DO \quad (1)$$

Em que:

LL = Lucro Líquido

G = Ganho

DO = Despesas Operacionais

O Retorno sobre o investimento (RSI) é um medidor relativo obtido a partir da relação entre o Lucro Líquido (LL) e o Investimento (LOCKAMY; COX, 1994)

$$RSI = \frac{LL}{I} \quad (2)$$

Em que:

RSI = Retorno sobre o investimento

LL = Lucro Líquido

I = Investimento

O RSI é importante ao relacionar as medidas básicas das empresas, sendo considerado a medida global mais importante. O ideal é uma decisão que aumente o Ganho e diminua a Despesa Operacional (DO), porém qualquer decisão que impacte positivamente no RSI é uma decisão que leva a empresa em direção a meta proposta. Assim, o indicador que aponta se é correta a decisão é o RSI (CORBETT, 2005).

Durante o processo de tomada de decisão é necessário identificar a contribuição das decisões a serem tomadas no RSI geral. Com a identificação do impacto sobre o Investimento (Id), sobre o Ganho (Gd) e sobre a Despesa Operacional (DOd) é possível realizar o cálculo do Retorno Sobre o Investimento da decisão (RSId). As decisões com  $RSId > RSI$  contribuem para que a meta da empresa seja

alcançada. Uma decisão com  $Id \leq 0$  é considerada sempre superior ao RSI geral (CORBETT, 2005).

$$RSId = \frac{(Gd - DOd)}{Id} \quad (3)$$

Em que:

RSId = Retorno Sobre o Investimento da decisão

Gd = Ganho da decisão

DOd = Despesa Operacional da decisão

Id = Investimento da decisão

Goldratt (1986) relata que o Fluxo de caixa (FC) é uma medida fundamental de sobrevivência da organização e caso este indicador não seja atendido os esforços realizados não tiveram a devida importância.

Segundo Goldratt (1990), utilizando os três indicadores gerais globais de performance consegue-se julgar qual o impacto de qualquer ação sobre o sistema. Para uma ação ser viável e atrativa, ela deve aumentar o Ganho e/ou diminuir o Investimento/inventário e a Despesa Operacional (DO).

O Ganho, tradução de *throughput*, em inglês, é entendido como uma taxa de geração de dinheiro por meio das vendas durante o período de análise. O Ganho é calculado pela diferença entre o preço do produto e os Custos Totalmente Variáveis (CTV), que compõem o que realmente varia com a demanda de uma unidade de produto vendido (LOCKAMY; COX, 1994). Corbett (2005) apresenta três fórmulas que ajudam a calcular e entender o Ganho:

$$Gu = P - CTV \quad (4)$$

Em que:

GU = Ganho unitário do produto

P = Preço de venda do produto

CTV = Custos Totalmente Variáveis

Comumente o CTV é composto pelo custo de material direto, impostos e comissões dos vendedores. Não se encontra no CTV nenhuma forma de rateio, nem mesmo os custos de mão de obra direto (LOCKAMY; COX, 1994). Para se obter o ganho total que um produto pode gerar para a empresa, é necessário multiplicar o ganho unitário do produto (GU) pela sua respectiva quantidade vendida.

$$GTp = GU * q \quad (5)$$

Em que:

GTp = Ganho total do produto

GU = Ganho unitário do produto

q = Quantidade vendida do produto

Por fim, o ganho total da empresa pode ser definido pela somatória dos ganhos totais dos produtos.

$$\text{Ganho total da empresa} = \sum GTp \quad (6)$$

Em que:

GTp = Ganho total do produto

Outro indicador da TOC é o Inventário/investimento, definido como todo o dinheiro dispendido pela a empresa com propósito de obter retorno no futuro. Os ativos da empresa como máquinas, móveis de escritórios, computadores, caminhões e outros tipos de instalações se encaixam nesta classificação (GOLDRATT; COX, 1984; GUPTA et al., 2010). O inventário pode ser dividido em duas categorias, a primeira relativa aos estoques de matéria prima, produtos em processo e produtos acabados. O valor pago aos fornecedores dos materiais é o único valor possível de ser atribuído aos estoques desta categoria. Não existe valor agregado aos produtos, porque durante a produção só se agrega custo. A venda é a única etapa na qual se agrega valor para e empresa. A segunda categoria do investimento é relativa aos outros ativos da empresa (CORBETT, 2005).

O valor que se atribui ao estoque em processo e estoque acabado é igual ao seu Custo Totalmente Variável (CTV). Um dos objetivos é eliminar a percepção dos “lucros aparentes”, que podem ser criados a partir do processo de alocação de custos. Não é possível o aumento dos estoques de produtos em processo e de produtos acabados a fim de reduzir os custos do período (CORBETT, 2005).

O terceiro indicador da TOC é a Despesa Operacional (DO), que corresponde ao capital despendido para transformar o Investimento em Ganho, incluindo todos os outros custos que não são totalmente variáveis (GOLDRATT; COX, 1984; LOCKAMY; COX, 1994). Corbett (2005) aponta que a TOC não se preocupa em classificar as despesas em fixas ou semi-variáveis, o que realmente importa é se a despesa pode ser classificada como totalmente variável (CTV) ou não totalmente variável (DO). Ao tomar uma decisão na TOC precisamos medir o impacto desta nas três medidas operacionais, neste momento o necessário é analisar se a DO vai variar ou não.

### 2.2.2 Indicadores de desempenho no nível do processo

Além dos indicadores clássicos da TOC apresentados na seção 2.2.1 Indicadores de desempenho da TOC, existem outros indicadores que podem ser considerados como indicadores de desempenho no nível do processo: Ganho-Dinheiro-Dia (GDD), Inventário-Dinheiro-Dia (IDD) e Despesa Operacional Local (DOL) (GUPTA et al., 2010). Estes são indicadores de níveis táticos utilizados para medir o fluxo dos processos produtivos (GOLDRATT, 1990).

O indicador Ganho-Dinheiro-Dia (GDD), originalmente conhecido como *Throughput-Dollar-Day* foi introduzido por Goldratt em seu livro “A Síndrome do Palheiro” (1990). Neste livro Goldratt afirma que os indicadores de performance locais devem guiar as decisões corretas no dia a dia os gerentes, mostrando o impacto de cada decisão no sistema como um todo. No livro “Necessária, sim, mas não suficiente”, (2000) Goldratt volta a adotar este tópico aplicado à logística de distribuição. Para avaliação de qualquer atividade é necessária uma medida, uma indicação que meça os resultados durante o processo, um exemplo é o percentual das entregas no prazo e atendimento dos pedidos.

A utilização destas medidas aponta que não fazer uma entrega de um pedido de cem dólares é igual a não fazer a entrega de um pedido de dez mil dólares, visto que ao medir o percentual de entregas não considera o valor. Além disso, a utilização

destas medidas não leva em consideração a extensão do atraso. Um atraso de um dia não é tão prejudicial quanto um atraso de uma semana inteira (GOLDRATT et al., 2000). Percebe-se que, em algumas situações, o indicador atual da empresa não esclarece ou orienta qual a melhor decisão para otimizar o resultado da empresa. Então, a TOC aponta a avaliação das medias locais que focalizem o objetivo global da empresa, com o Ganho-Dinheiro-Dia (GDD). Goldratt et al. (2000) propõem a medida de desempenho de entregas GDD medindo os pedidos atrasados pelo seu valor em dólar multiplicado pelo número de dias que o pedido está atrasado.

O GDD é o indicador de performance proposto pela TOC para controlar a execução do programa quanto ao cumprimento das datas de entrega. O objetivo do GDD é alcançar um valor igual a zero. A partir do gerenciamento dos estoques nos pontos de controle, pode-se identificar quais as ordens de produção estão atrasadas. O GDD é uma medida de confiabilidade que mede as falhas em termos de compromissos com os clientes, o resultado de “coisas que deveriam ter sido feitas não foram” (GOLDRATT, 2006).

O Inventário-Dinheiro-Dia (IDD), originalmente conhecido como *Inventory-Dollar-Day* é um indicador da TOC criado para garantir que não sejam criados altos níveis de estoque. O IDD pune o material que está presente na forma de estoque protetor e não deveria estar, ou seja, não deveria ter sido liberado e produzido (GOLDRATT, 1990). O IDD é uma medida de efetividade do sistema, ele mede o valor do estoque e o tempo que ele permanece dentro de um determinado local. Ao se medir o excesso de inventário é importante compreender o tempo até que o inventário se torne necessário e o valor do excesso de inventário. O objetivo é ter o mínimo de IDD necessário para garantir um GDD igual ou próximo a zero (GOLDRATT, 2006). Processar produtos apenas para evitar a ociosidade é um paradigma quebrado pelo IDD. O uso do IDD para eliminar a tendência de os trabalhadores processarem materiais antes da hora é um benefício para o sistema. Com esta medida, os trabalhadores percebem que não é bom trabalhar em avanço a programação da produção, pois o inventário aumentará e o IDD piorar (GOLDRATT, 1990).

Goldratt (2000) afirma que a fábrica não deveria ser julgada apenas pelo inventário que mantém, mas também pela velocidade que o inventário está se movendo pelos processos produtivos. O IDD é calculado multiplicando-se o valor do inventário em excesso pelo número de dias parado. Então, o principal objetivo das

fábricas é tentar zerar o Ganho-Dinheiro-Dia (GDD) e o segundo tentar fazer isso com o menor IDD possível (GOLDRATT et al., 2000).

Outra medida de desempenho baseada na TOC é a Despesa Operacional Local (DOL), originalmente conhecido como *Local Operating Expenses*. Esta medida compara as variações entre despesas reais e despesas planejadas em uma área de controle. Um pressuposto para sua aplicação é que os gestores não devem ser responsabilizados pelas despesas que ocorrem fora de sua área de controle, e sim pelas despesas dos elos mensurados, tais como salários e despesas, porém sem nenhum tipo de alocação (GOLDRATT et al., 2000).

### 2.2.3 Tambor-Pulmão-Corda (TPC)

Para entender o mecanismo do TPC, torna-se necessário a compreensão do desenvolvimento histórico deste conceito. Ao final da década de 1950 existiam duas abordagens para resolver os problemas relacionados a programação da produção (GOLDRATT, 1988). A primeira abordagem utilizava computadores para manipular uma grande quantidade de dados e executar muitas operações matemáticas, sem que ocorressem erros de cálculo. Esta abordagem ficou conhecida durante a década de 1960 como planejamento das necessidades de materiais (*material requirements planning - MRP*). A segunda abordagem teve seu desenvolvimento feito primariamente na Alemanha ocidental e consistia em detalhar a programação dos recursos fabris levando em consideração a capacidade finita de todas as máquinas e, ficou conhecida como programação finita (*finite scheduling*). Na década de 1970 surgiu então a terceira abordagem alternativa que tornou-se conhecida comercialmente com o nome de OPT (*optimized production technology*) (GOLDRATT, 1988).

A lógica de programação do *software* OPT na primeira versão era basicamente um Kanban automatizado (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013). Segundo Goldratt (1984) as primeiras versões do OPT restringiam-se a ambientes de produção repetitivos e para expandir a aplicação o *software* foi modificado. Com as modificações, a produção de determinada estação é interrompida sempre que existirem dois pulmões cheios nas máquinas que seguem o sentido do fluxo de produção (jusante), ao contrário do Kanban, onde os postos de trabalho param de produzir somente quando todos os pulmões estiverem abastecidos (cheios) (GOLDRATT, 1988).

Com as novas versões do OPT nas empresas, a importância dos gargalos na determinação da performance global começou a se tornar cada vez mais clara (GOLDRATT, 1988). Ainda, Goldratt (1988) relata a sua dificuldade em convencer os gestores a funcionar com as máquinas não gargalos com uma eficiência menor que 100% e realizar um número maior de preparações (*setups*) nas máquinas não gargalo para obter um fluxo de produção mais suave. Goldratt buscou uma série de justificativas para explicar teoricamente os pressupostos que sustentavam as ações propostas pelo *software* OPT (GOLDRATT, 1988). Finalmente, Goldratt alcança aplicações teóricas e práticas do *software* OPT e propõe a lógica do Tambor-Pulmão-Corda (TPC).

O Tambor-Pulmão-Corda (TPC) ou em inglês *Drum-Buffer-Rope (DBR)* é um mecanismo de programação e controle utilizado para implementar a filosofia da Teoria das Restrições (TOC) em sistemas produtivos ou estabelecimentos de serviço (COX III, J. F., SCHLEIR, 2013). Segundo Goldratt (1986), podem existir recursos nas fábricas que a capacidade seja inferior a demanda de mercado. Estes recursos limitarão as entregas da fábrica, tornando a capacidade da fábrica igual a capacidade do recurso com menor capacidade de produção. As restrições da fábrica podem estar nos processos internos, quando a capacidade de produção for inferior a demanda ou, no mercado, quando a capacidade de produção da fábrica é superior a demanda existente.

Goldratt (1984) exemplifica as limitações de um sistema a partir de uma analogia realizada com um grupo de escoteiros, no qual o posto de trabalho mais lento restringe o sistema e estabelece o ritmo (tambor). A lógica do TPC reconhece que o recurso de menor capacidade (restrição) definirá o índice de produção da fábrica inteira, portanto, este recurso deve dar a “batida” da produção da fábrica, ou seja, deve ser considerado o tambor da fábrica. Quando localizada a restrição, os recursos que o antecedem devem ser puxados (programação para trás, *backward*) a um ritmo igual ou pouco superior. As etapas posteriores a restrição devem empurrar os componentes (programação para frente, *forward*) e se ajustar ao ritmo dela, evitando assim o desbalanceamento no fluxo de produção e a formação de estoques intermediários (GOLDRATT; FOX, 1986).

A restrição existente no sistema deve receber uma análise especial na fábrica, uma vez que seu funcionamento é importante para a determinação do desempenho do sistema como um todo. O tambor deve ser protegido contra eventuais problemas

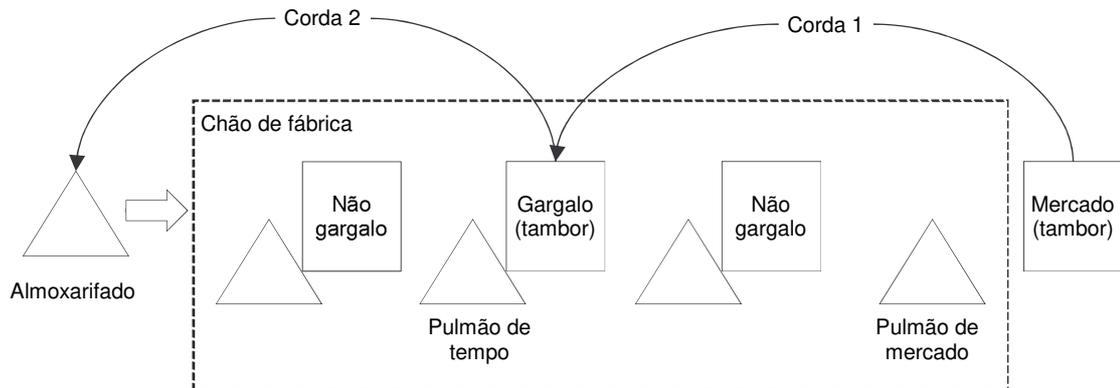
que possam ocorrer nos processos que o antecedem, por exemplo, problemas de qualidade, falta de matéria prima, quebra de máquinas, variabilidade de tempos de ciclo, etc. (GOLDRATT; COX, 1984; GOLDRATT; FOX, 1986).

Esta proteção é o pulmão (*buffer*), no qual o material anterior ao tambor, em forma de estoque, garante que o recurso crítico nunca fique parado por falta de material e é representado pelo tempo, ou seja, denominado pulmão de tempo (*time-buffer*). O propósito deste é estar posicionado estrategicamente para abastecer constantemente o recurso crítico e protegê-lo contra eventuais variações e anomalias que o antecedem. O dimensionamento deste pulmão de tempo está relacionado com o grau de confiabilidade das operações que antecedem a restrição. O pulmão de montagem (*assembly buffer*) é aplicado para assegurar que todas as peças que passam pelo gargalo sejam realmente montadas, estabelecendo um pulmão em frente a todas as outras linhas de montagem. O pulmão de entrega/mercado (*shipping buffer*) é colocado no final do fluxo produtivo, objetivando atender as oscilações do mercado e entregar os produtos dentro do prazo (GOLDRATT; COX, 1984; GOLDRATT; FOX, 1986).

Por fim, a corda é associada ao mecanismo de emissão de material para a produção, liberando-o conforme a demanda da primeira operação antes do recurso crítico, de modo que o fluxo de produção seja ajustado à velocidade de processamento deste recurso (WATSON et al., 2007). Os materiais devem ser fornecidos de forma sincronizada ao fluxo produtivo pela corda, auxiliando a sincronização das operações não gargalo com a cadência do tambor (GOLDRATT; COX, 1984). A corda atua para manter os níveis de inventário mínimos e constantes no sistema (GUPTA; BOYD, 2008).

As cordas ligam as operações onde existem pulmões de tempo com as operações iniciais do sistema produtivo, ou seja, as operações que liberam a matéria prima e materiais. A Figura 2 apresenta o esquemático do método TPC.

Figura 4 - Tambor-Pulmão-Corda (TPC)



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Thüerer et al. (2017)

Cox (2013) define restrição como qualquer elemento ou fator que limita o sistema de alcançar o melhor nível de desempenho possível. Para implantação e gerenciamento dos sistemas produtivos via o método TPC, deve-se operacionalizar os cinco passos da focalização da TOC. O primeiro visa identificar a restrição. O segundo passo, pode-se atribuir um pulmão para garantir o abastecimento do recurso crítico. Watson et al. (2007) mostram que o termo pulmão é usualmente relacionado e adotado como sinônimo de matéria prima em processo (*Work-in-Process, WIP*) ou seja, material finalizado em inventário. Lockamy e Cox (1994) apontam que menos de 10% dos recursos das plantas industriais são compostos pelos pontos de controle adotados na TOC, que são: pulmões junto aos gargalos, pulmões de tempo, pulmões de montagem e pontos de liberação de materiais no início da linha.

Conforme Watson et al. (2007), a inutilização dos recursos não gargalos podem ser feitos previamente sem afetar o cronograma das entregas. Como o recurso crítico é um limitante ao crescimento do sistema como um todo, de nada adianta abastecê-lo com matéria prima defeituosa que não será transformada plenamente. Goldratt (1984) cita que devem ser realizadas inspeção de qualidade antes dos recursos críticos visando a garantia da produtividade do sistema.

O terceiro passo consiste em subordinar todo o sistema à restrição. A quantidade de inventário em processamento no sistema (*WIP*) está relacionado com o “comprimento” da corda e é determinado pela proteção exigida no pulmão do recurso crítico (WATSON et al., 2007). As cordas são utilizadas para a liberação de material, e devem seguir a taxa de consumo existente na restrição (GOLDRATT; COX, 1984).

Dada as características do TPC, o sistema deverá almejar aumentar sua capacidade produtiva em um ciclo de melhoria contínua, dentro de um limite aceitável imposto inicialmente pelo recurso crítico e seguindo as cinco regras propostas por Goldratt (1984) para não permitir que a inércia torne-se uma restrição do sistema.

Para implantação prática da lógica do TPC, Lockamy e Cox (1994) propõem os passos apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Desdobramento da meta

Passo	Descrição
1º	Identificas as restrições do sistema produtivo.
2º	Determinar o tamanho do pulmão de tempo (timer buffer). Para esta determinação é recomendado adotar a soma dos tempos de preparação (setup) e do tempo de processamento entre a primeira operação até a restrição e multiplicar este tempo por cinco. Então, divide-se o pulmão de tempo em três regiões: A primeira contém os materiais que serão processados nas restrições imediatamente, enquanto a região três contém os materiais recém liberados pelas primeiras operações. Durante a produção, caso não existam faltas na região um e poucas faltas na região dois, o pulmão estará sempre cheio e pode ser reduzido. Do contrário, se estão sendo feitas contínuas expedições de peças da região um, então o pulmão é muito pequeno e deve ser aumentado.
3º	Para determinar o tempo de liberação no recurso inicial, remover do tempo de início da ordem na programação o pulmão de tempo na restrição.
4º	Determinar o tamanho do pulmão de entrega/mercado (shipping buffer). Utilizar a mesma lógica do pulmão de tempo.
5º	Dimensionar os pontos de divergência e convergência do sistema de fabricação visando prever as eventuais faltas de materiais.

Fonte: Lockamy e Cox (1994)

A lógica do TPC propõe que os sistemas industriais que aplicam seus pressupostos atuem em busca de um melhor desempenho dos seus resultados e, para isso, mantenham o processo de melhoria contínua para elevar as capacidades restritivas e não sejam afetados pela inércia do sistema (GOLDRATT; COX, 1984). A próxima seção reforça a sustentação teoria do trabalho e apresenta os conceitos sobre análise de eficiência.

## 2.3 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

A competitividade do mundo globalizado está conectada aos mercados financeiros e exercem pressão sobre organizações de todos os tipos, demandando mais resiliência e prontidão do desempenho especialmente para manter as medidas e controle quando submetidas a crises e eventos inesperados (LAMPE; HILGERS, 2015). As próximas seções propõem um melhor entendimento sobre as análises de eficiência existentes na literatura e servem de base para o desenvolvimento das análises apresentadas na sequência.

### 2.3.1 Métodos para Cálculo de Eficiência

O crescente aumento de publicações interdisciplinares e interesse em medidas de desempenho nas últimas três décadas mostram a importância deste assunto. A melhoria individual, em grupo e organizacional da eficiência são consideradas muito importantes, com resultados positivos nos ganhos e relevante para melhor utilizar recursos considerados restritos e manter as empresas competitivas (LAMPE; HILGERS, 2015).

Os primeiros estudos básicos relacionados com o cálculo de eficiência foram apresentados no estudo seminal de Farrel (1957) no artigo "*The Measurement of Productive Efficiency*". O autor utilizou como base os trabalhos desenvolvidos por Debreu (1951) e Koopmans (1951) sobre o conceito de análise de atividades e propondo desenvolver melhores métodos para avaliação da produtividade. Este método se tornou a abordagem mais utilizada para mensurar a eficiência e usualmente referido simplesmente por "eficiência de Farrel", com ideia central de verificar se é possível reduzir de forma simples as entradas sem comprometer os resultados (FÄRE et al., 1985).

Este assunto foi amplamente abordado por Färe et al. (1985) que destacaram a eficiência como uma característica importante no desempenho produtivo e mensurada com o uso de indicadores que auxiliam os gestores na compreensão dos resultados. Os autores ainda definem como a qualidade de produção de efeitos desejados, ou seja, um produtor é eficiente quando os objetivos são alcançados e ineficiente quando não.

Os métodos estatísticos para cálculo de eficiência podem ser classificados quanto à natureza dos dados e quanto ao método. Quanto à natureza dos dados podem ser paramétricos ou não paramétricos e quanto ao método, podem ser de fronteira e não fronteira (COELLI et al., 2005).

Em relação à natureza, os métodos paramétricos estão associados à mensuração de dados que utilizam uma escala de intervalo ou de razão, suportados em parâmetros que partem de pressupostos para testar a amostra. Os métodos paramétricos ainda supõem que existe uma relação funcional e de correlação entre a produção e os insumos. Os métodos de cálculo não paramétricos são utilizados quando a exigência em relação aos dados utilizados na análise é inferior, violando os pressupostos da amostra (FERREIRA; GOMES, 2009)

No que diz respeito ao método, os dados de fronteira pressupõem que a eficiência máxima é atingida quando uma ou mais unidades de análise obtém um desempenho com resultado superior as outras unidades de análise. Ainda consideram que os desempenhos das outras unidades não demonstram que os insumos ou produtos da unidade de análise eficiente possam ser melhorados. Os métodos de não fronteira sugerem que a eficiência máxima (1 ou 100%) é conhecida. Deste modo, a eficiência definida pode ser atingida pela unidade de análise desde que os insumos não sejam reduzidos sem redução nos produtos finais ou também, os produtos finais não aumentem sem que incremento na quantidade de insumos também (FERREIRA; GOMES, 2009).

As principais técnicas de cálculo de eficiência e produtividade e suas respectivas classificações são exibidas no Quadro 5.

Quadro 5 - Principais técnicas para cálculo de eficiência e produtividade

Técnica	Característica	
	Natureza	Método
Análise Envoltória de Dados (DEA)	Não paramétrico	Fronteira
Índice de Laspeyres	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Paasche	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Fischer	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Törnqvist	Paramétrico	Não Fronteira

Técnica	Característica	
	Natureza	Método
Índice de Malmquist	Paramétrico	Não Fronteira
Processo de Análise Hierárquica (AHP)	Não paramétrico	Não Fronteira
Mínimos Quadrados Ordinais (OLS)	Paramétrico	Não Fronteira
Mínimos Quadrados Ordinais Corrigidos (COLS)	Paramétrico	Fronteira
Análise de Fronteira Estocástica (SFA)	Paramétrico	Fronteira
<i>The Frontier Approach (TFA)</i>	Paramétrico	Fronteira
<i>Distribution Free Approach (DFA)</i>	Paramétrico	Fronteira

Fonte: Adaptado de Von Gilsa (2012)

Deste modo, é possível compreender que o cálculo de eficiência é um tema em discussão desde a década de 50 com os estudos seminais de Farrel (1957) e a evolução trouxe diferentes técnicas para mensuração da eficiência produtiva, cabendo aos pesquisadores compreender as características e necessidades existentes e relacionar a técnica mais apropriada. Na próxima seção, será apresentado o referencial teórico com enfoque na Análise Envoltória de Dados (DEA).

### 2.3.2 Análise Envoltória de Dados (DEA)

A Análise Envoltória de Dados (DEA, sigla inglesa de *Data Envelopment Analysis*) é baseada em modelos matemáticos não paramétricos, ou seja, não utiliza referências estatísticas ou medidas de tendência central. As relações funcionais entre os insumos e produtos não são necessárias na DEA e também não se restringe a medidas únicas, singulares dos insumos e produtos (FERREIRA; GOMES, 2009).

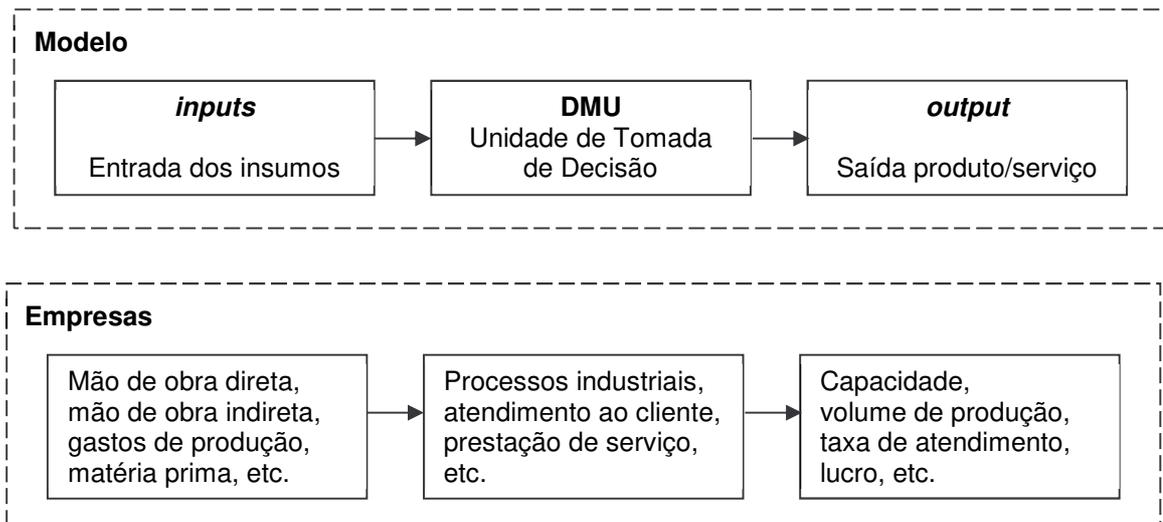
O primeiro registro sobre a Análise Envoltória de Dados (DEA) foi em 1978 com o estudo seminal de Charnes, A., Cooper e Rhodes, E.L. intitulado “*Measuring the efficiency of decision making units*”. Este estudo utilizou com base as ideias de Farrel (1957) e identificou a necessidade de procedimentos satisfatórios para avaliar a eficiência em unidades de produção com múltiplas entradas e múltiplas saídas por meio de um único indicador de desempenho, denominado nível de eficiência (FERREIRA; GOMES, 2009).

Rhodes utilizou seus estudos sobre DEA no desenvolvimento de sua dissertação, que abordava a avaliação de um programa de acompanhamento na educação dos EUA. O objetivo do trabalho era desenvolver um método que pudesse comparar a eficiência de escolas públicas que participavam de um programa educacional para alunos carentes, então conhecido por *Program Follow Through*, patrocinado pelo governo norte americano. O problema abordado discutido por Rhodes em sua dissertação estava em desenvolver um método capaz de comparar a eficiência (*Decision Making Units – DMUs*) levando em conta “*outputs*” como: Escores aritméticos; melhoria de autoestima medida em testes psicológicos; habilidade psicomotora, e “*inputs*” como: número de professores-hora; e tempo gasto pela mãe em leituras com o filho (LINS; MEZA, 2000; ZHU, 2014).

A definição entre minimizar os *inputs* maximizar os *outputs* é determinada pela orientação do modelo escolhido. Se o objetivo é manter o nível de consumo de recursos (por exemplo, matérias-primas) e maximizar as saídas (por exemplo, o volume de produção de um determinado item), o modelo deve ser orientado à saída (*output*). Em contrapartida, se o objetivo for manter as saídas constantes e verificar melhor aproveitamento dos insumos utilizados no processo (por exemplo, matéria prima, mão de obra, tempo de produção), o modelo deve ser orientado à entrada (*input*) (ZHU, 2014).

As unidades de tomada de decisão (DMU) são os elementos ou unidades produtivas (restaurante, escola, hospital, banco, indústria entre outros) (FARRELL, 1957). A ideia original da DEA é fornecer um método que dentro de um conjunto de unidades de tomada de decisão (DMU) possibilite identificar as que apresentam melhores práticas e formam uma fronteira eficiente. O método também permite medir o nível de eficiência das unidades fora da fronteira de eficiência e identificar pontos de referência para que estas sejam comparadas (COOK; SEIFORD, 2009).

Assim, ao definir uma fronteira de eficiência, a ineficiência de uma DMU é determinada pela distância da fronteira, o que indica o potencial aumento de eficiência (LAMPE; HILGERS, 2015). A Figura 5 mostra a associação entre a DMU e os *inputs* e *outputs* utilizados na Análise Envoltória de Dados (DEA).

Figura 5 - Relação entre *input*, DMU e *output* - DEA

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Von Gilsa (2012)

Para realizar *Benchmarking* entre diferentes organizações as DMUs são comumente definidas para medir a eficiência relativa, com possibilidade de aplicar várias diferentes abordagens (LAMPE; HILGERS, 2015). O *Benchmarking* pode ser entendido como um processo contínuo de avaliação de produtos, serviços e melhores práticas de trabalho em relação aos mais fortes concorrentes, ou em relação às empresas reconhecidas como líderes em sua área de atuação, com o propósito de buscar os parâmetros para estabelecer metas que proporcionem uma melhoria organizacional (ZHU, 2014).

De acordo com Camp (1998) existem quatro tipos de *benchmarking*: I) *benchmarking* interno; II) *benchmarking* com concorrentes diretos externos; III) *benchmarking* com as melhores operações funcionais externas ou líderes da indústria; e IV) *benchmarking* de processos genéricos.

O *benchmarking* interno quando executado na Análise Envoltória de Dados (DEA) possibilita comparar e avaliar se uma determinada DMU está próxima ou não da DMU referência de maior destaque, ou seja, se a DMU em análise está na fronteira eficiente. Quando são comparadas diversas DMUs de um mesmo grupo ou processo essa avaliação é útil. As DMUs de maior destaque podem fornecer informações importantes que possibilitam direcionar ações para melhorias das DMUs ineficientes (FERREIRA; GOMES, 2009).

No estudo realizado por Lampe e Hilgers (2015) foi realizado um levantamento das citações sobre eficiência entre os anos 1980 e 2010, o propósito foi listar os autores dos artigos mais citados sobre DEA.

Quadro 6 - Artigos mais citados sobre DEA

Rank	Autores	Ano
1	Banker et al.	1984
2	Andersen and Petersen,	1993
3	Berger and Humphrey	1997
4	Charnes et al.	1981
5	Charnes et al.	1985
6	Simar and Wilson	1998
7	Banker	1984
8	Seiford	1996
9	Simar and Wilson	2007
10	Banker	1993
11	Doyle and Green	1994
12	Dyson and Thanassoulis	1988
13	Banker and Thrall	1992
14	Charnes et al.	1989
15	Tone	2001
16	Banker and Morey	1986
17	Boussofiane et al.	1991
18	Banker et al.	1986
19	Allen et al.	1997
20	Deng et al.	2000

Fonte: Adaptado de Lampe e Hilgers (2015)

No Quadro 6 são exibidos os 20 autores mais citados sobre DEA, definidos como seminais no assunto. Lampe e Hilgers (2015) comentam que a classificação destes autores foi levando em consideração duas variáveis. Primeiro o número absoluto de citações como medida do impacto da publicação. Segundo, foi utilizado a média de citações por ano, normalizando o efeito de artigos que foram publicados há muitas décadas. A seguir são listados os assuntos propostos a serem discutidos ainda relacionados a análise de eficiência.

### 2.3.2.1 Modelo Retorno Constante de Escala (CCR - CRS)

O modelo CCR (**C**harnes, **C**ooper e **R**hodes) apresentado originalmente por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) propõem uma abordagem orientada a entradas (*inputs*) para medir a eficiência, também conhecido como CRS (**C**onstant **R**eturns to **S**cale). O modelo de retorno constante de escala assume que qualquer variação nos *inputs* implica uma variação proporcional no *output* e é uma generalização do trabalho de Farrell (1957), para múltiplos insumos e múltiplos produtos. No modelo CRS existe uma função de produção linear. A inclinação da reta representa essa função de produção que determina os rendimentos constantes de escala. O índice de eficiência é obtido por meio da combinação linear dos *outputs* dividida pela combinação linear dos *inputs* de uma determinada DMU (COOK; SEIFORD, 2009; FERREIRA; GOMES, 2009). O modelo CRS pode ser ilustrado pelas Equações (7), (8) e (9).

$$MAX_{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{i0}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{j0}} \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{jk}} \leq 1 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (8)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0 \quad (9)$$

Em que:

$u_i$  = peso calculado para o *output*  $i$

$v_j$  = peso calculado para o *input*  $j$

$x_{jk}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$y_{ik}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$x_{j0}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade em análise

$y_{i0}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade em análise

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

A equação (7) representa a função objetivo (FO) do modelo de programação matemática que deve ser maximizado. A equação (8) representa o conjunto de restrições (um para cada DMU, até mesmo para aquela que está sendo avaliada) que tem o objetivo de limitar a produtividade de todas as DMUs a 1. Com a resolução do modelo, é possível avaliar a eficiência da DMU. Deste modo, se o resultado da função objetivo for igual a 1, a DMU é considerada eficiente, pois nenhuma restrição limitou seu valor e sua produtividade atingiu o valor máximo. Do contrário, se o resultado for menor que 1, a DMU é considerada ineficiente, pois mesmo com as utilidades que maximizem sua produtividade existem DMUs mais produtivas que ela. Essas DMUs que limitam a função objetivo servem de *benchmarking* (referência) da DMU analisada, que serão modelos para que a DMU ineficiente se torne eficiente (MARIANO et al., 2006).

A equação (9), indicada por  $u$  e  $v$ , se refere aos pesos ou multiplicadores estabelecidos aos *inputs* e *outputs*. Neste modelo, todos os itens devem ser menores ou iguais a 1. O objetivo do modelo está em encontrar o valor dos pesos, representados pelas variáveis  $u_i$  e  $v_j$ , maximizando a soma ponderada dos *outputs* dividida pela soma ponderada dos *inputs* de uma determinada DMU, respeitando a restrição em que seu quociente seja menor ou igual a 1. Com essa condição, todas as eficiências irão variar entre 0 e 1. Esse processo é repetido para todas as DMUs que, nesse caso, acabam obtendo valores diferenciados para  $u_i$  e  $v_j$  (LINS; MEZA, 2000).

O modelo original CCR é um modelo de programação fracionária muito difícil de ser resolvido porque possui infinitas soluções. Sendo assim, existiu a necessidade de linearizar o modelo, transformando esse modelo de programação fracionária em um modelo de programação linear para então ser resolvido por meio *softwares* computacionais. A linearização pode ser feita mantendo-se os *inputs* constantes e maximizando os *outputs* ou mantendo-se os *outputs* constantes e minimizando os *inputs* (MARIANO et al., 2006).

A eficiência de uma DMU no modelo CRS orientada ao *input* é calculada por meio do problema de programação linear, conforme Equações (10), (11), (12) e (13).

$$MAX_{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{i0}}{1} = \sum_{i=1}^m u_i * y_{i0} \quad (10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n v_j * x_{j0} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{jk}} \leq 1 = \sum_{i=1}^m u_i * y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j * x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (12)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0 \quad (13)$$

Em que:

$u_i$  = peso calculado para o *output*  $i$

$v_j$  = peso calculado para o *input*  $j$

$x_{jk}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$y_{ik}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$x_{j0}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade em análise

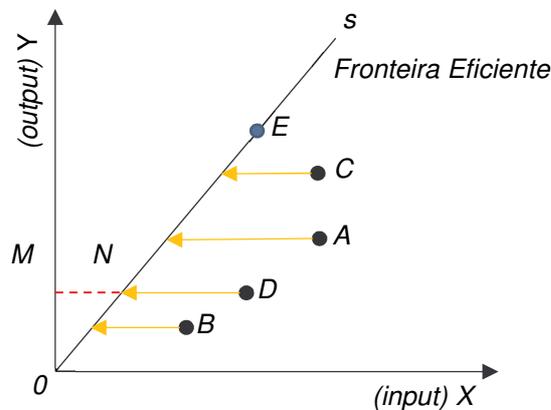
$y_{i0}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade em análise

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

A única diferença entre esse modelo e o de programação fracionária é o acréscimo da equação (11) ao modelo. A partir dessa equação a função objetivo é transformada em uma equação linear (MARIANO et al., 2006). O Gráfico 3 representa um modelo hipotético de duas variáveis constituídas por um *input* e um *output* com cinco DMUs. Nesse exemplo, a fronteira CRS é representada pela reta “s”, em que a DMU eficiente E é mais eficiente do que as DMUs A, B, C e D.

Gráfico 3 - Fronteira CRS com orientação para *input*

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Lins e Meza (2000, p. 33)

A reta “s” é a fronteira eficiente ou, fronteira de produção, que determina a produção máxima que pode ser obtida com dada tecnologia. Por essa razão a DMU que se encontra sobre ela é eficiente e as demais que se posicionam abaixo dela, são ineficientes. A eficiência da DMU D é fornecida pela distância do eixo Y até o ponto N, dividida pela distância do eixo Y até o ponto D (LINS; MEZA, 2000).

Para Mariano et al. (2006), o mesmo procedimento utilizado para minimização dos *inputs* poderia ser utilizado para maximização dos *outputs*. Nesse caso a função objetivo seria a equação (14), enquanto as restrições seriam como a equação (15), (16) e (17). Nesse modelo o resultado da função objetivo será o inverso da eficiência relativa como pode ser observado na equação (14).

$$MAX P_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{j0}} = MIN F_0 = \sum_{j=1}^n v_j * x_{j0} \quad (14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^m u_i * y_{i0} = 1 \quad (15)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{jk}} \leq 1 = \sum_{i=1}^m u_i * y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j * x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (16)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0 \quad (17)$$

Em que:

$u_i$  = peso calculado para o *output*  $i$

$v_j$  = peso calculado para o *input*  $j$

$x_{jk}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$y_{ik}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$x_{j0}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade em análise

$y_{i0}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade em análise

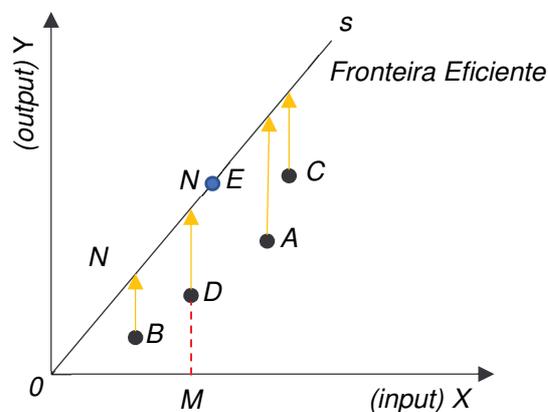
$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

O Gráfico 4 representa um modelo com orientação para *output*. O objetivo é maximizar as saídas (*outputs*) de modo que as entradas (*inputs*) permaneçam inalteradas. Na orientação para *output*, a eficiência da DMU D é dada pela distância MD/MN.

Gráfico 4 - Fronteira CRS com orientação para *output*



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Lins e Meza (2000, p. 33)

Após apresentar o modelo com retornos constantes de escala (CRS) com orientação para *input* e *output*, na próxima seção será exibido o modelo com retornos variáveis de escala (BCC - VRS)

### 2.3.2.2 Modelo Retorno Variável de Escala (BCC - VRS)

O modelo BCC (**B**anker, **C**harnes e **C**ooper), também conhecido como modelo de retornos variáveis de escala (VRS - **V**ariable **R**eturns to **S**cale) Banker é uma generalização do modelo anterior de retornos constantes de escala. No VRS Charnes e Cooper (1984) expõem que uma DMU não pode ser comparada com todas as DMUs de um determinado setor, mas com as DMUs que operam em escala semelhante a sua (MARIANO et al., 2006).

Ao contrário do modelo CRS, no modelo VRS a função produção não adota um crescente linear, podendo ser dividida em dois tipos de rendimentos de escala na fronteira eficiente. O primeiro tipo seria com retorno decrescente de escala, no qual um aumento nos *inputs* provoca um aumento proporcionalmente menor nos *outputs*. O segundo tipo seria o modelo com retorno crescente de escala, no qual um aumento nos *outputs* é proporcionalmente maior ao aumento nos *inputs* (COOK; SEIFORD, 2009; FERREIRA; GOMES, 2009). O modelo VRS é representado pelas equações.

$$MAX_{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{i0} + u}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{j0}} \quad \text{ou} \quad MAX_{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{i0}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{j0}} + v \quad (18)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{jk}} + u \leq 1 \quad \text{ou} \quad \frac{\sum_{i=1}^m u_i * y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j * x_{jk}} + v \leq 1 \quad \text{para } k = 1, 2 \dots z \quad (19)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0; u \text{ e } v \text{ sem restrição de sinal} \quad (20)$$

Em que:

$u_i$  = peso calculado para o *output*  $i$

$v_j$  = peso calculado para o *input*  $j$

$x_{jk}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$y_{ik}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$x_{j0}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade em análise

$y_{i0}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade em análise

$u$  = variável de retorno de escala do numerador

$v$  = variável de retorno de escala do denominador

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

Mariano et al. (2006) indicam que as variáveis  $u$  e  $v$  possuem a função de garantir que as restrições da DMUs que operam com escala diferente da DMU da análise não limitem sua função objetivo. Lins e Meza (2000) indicam que a inclusão das variáveis  $u$  e  $v$  servem para definir a combinação linear convexa no modelo VRS. Porém, se o valor de  $u$  for maior que zero, a DMU opera com retornos decrescentes à escala; se o valor de  $u$  for menor que zero, opera com retornos crescentes à escala; e se o valor for igual a zero, considera-se que a DMU opera com retornos constantes à escala (COOK; SEIFORD, 2009).

Assim como a variável  $u$ , a variável  $v$  também pode ser utilizada para indicar (estimar) o tipo de escala no qual uma DMU está operando. Para isso, é necessário que ela seja interpretada de maneira oposta em relação à variável  $u$ , sendo:  $v > 0$  = retornos crescentes;  $v < 0$  = retornos decrescentes; e,  $v = 0$  = retornos constantes à escala. Assim, os retornos de escala não podem ser iguais para as duas orientações (MARIANO et al., 2006).

O processo de linearização do modelo VRS utiliza os mesmos procedimentos adotados no modelo CRS. A convexidade do modelo VRS é gerada por meio da inclusão das variáveis  $u$  e  $v$ . A eficiência de uma DMU no modelo VRS orientada ao *input* é representada pelas Equações (21), (22) e (23).

$$MAX_{P_0} = \sum_{i=1}^m u_i * y_{i0} + u \quad (21)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n v_j * x_{j0} = 1 \quad (22)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0; u \text{ e } v \text{ sem restrição de sinal, } i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (23)$$

Em que:

$u_i$  = peso calculado para o *output*  $i$

$v_j$  = peso calculado para o *input*  $j$

$x_{jk}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$y_{ik}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$x_{j0}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade em análise

$y_{i0}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade em análise

$u$  = variável de retorno de escala do numerador

$v$  = variável de retorno de escala do denominador

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

E para um modelo VRS orientada ao *output* é representado pelas Equações (24), (25), (26) e (27).

$$MAX_{P_0} = \sum_{j=1}^n v_j * x_{j0} + v \quad (24)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m u_i * y_{ik} - v - \sum_{j=1}^n v_j * x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^m u_i * y_{i0} = 1 \quad (26)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0; u \text{ e } v \text{ sem restrição de sinal, } i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (27)$$

Em que:

$u_i$  = peso calculado para o *output*  $i$

$v_j$  = peso calculado para o *input*  $j$

$x_{jk}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade  $k$  de um determinado setor

$y_{ik}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade  $k$  de um determinado setor

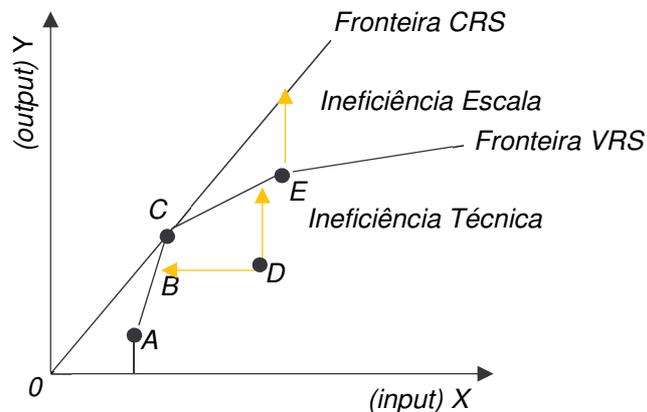
$x_{j0}$  = quantidade do *input*  $j$  para unidade em análise

$y_{i0}$  = quantidade do *output*  $i$  para unidade em análise

$u$  = variável de retorno de escala do numerador  
 $v$  = variável de retorno de escala do denominador  
 $z$  = número de unidades em avaliação  
 $m$  = número de *outputs*  
 $n$  = número de *inputs*

Nesse modelo não há a relação de proporcionalidade entre os *inputs* e *outputs*, ou seja, não é considerada que a relação existente de eficiência seja mantida linear de zero a infinito e sim alterações nos *inputs* ou *outputs* da curva no decorrer do tempo. O Gráfico 5 ilustra a relação hipotética da fronteira de eficiência dos modelos VRS e CRS. Também é exibido a eficiência de escala, representada no gráfico pela distância das unidades eficientes do modelo com retornos variáveis de escala (VRS) para a linha da fronteira com retornos constantes de escala (CRS).

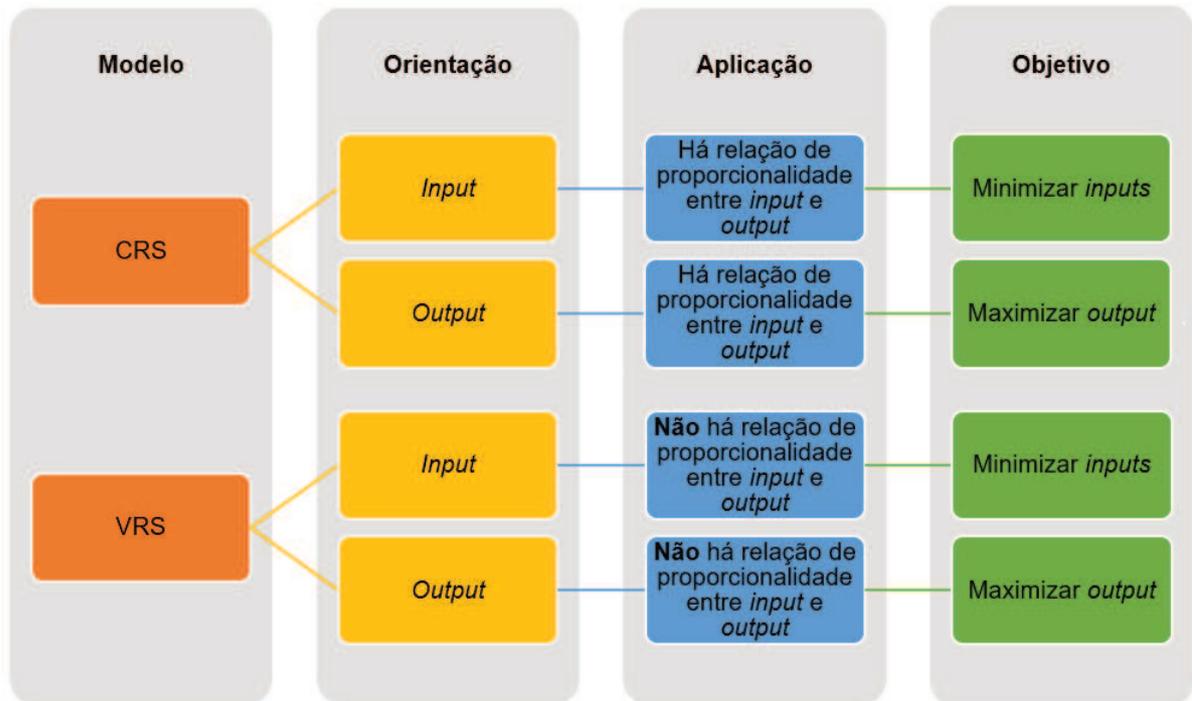
Gráfico 5 - Fronteira VRS e CRS



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ferreira e Gomes (2009, p. 124)

A Figura 6 apresenta um resumo das técnicas tradicionais de análise envoltória de dados, suas orientações, aplicações e objetivos.

Figura 6 - Aplicações dos modelos DEA



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Gilsa (2012)

Após a apresentação dos modelos CRS e VRS, nas próximas seções são apresentados tópicos adicionais, iniciando-se pelos os conceitos referentes aos tipos de eficiência que são calculados pela técnica da análise envoltória de dados.

### 2.3.2.3 Eficiência e Rendimento de escala

O conceito de eficiência de uma DMU por ser calculado pela divisão entre um indicador de desempenho e sua produtividade máxima (MARIANO et al., 2006). Esse conceito é demonstrado na Equação (28).

$$Eficiência = \frac{P}{P_{max}} \quad (28)$$

Em que:

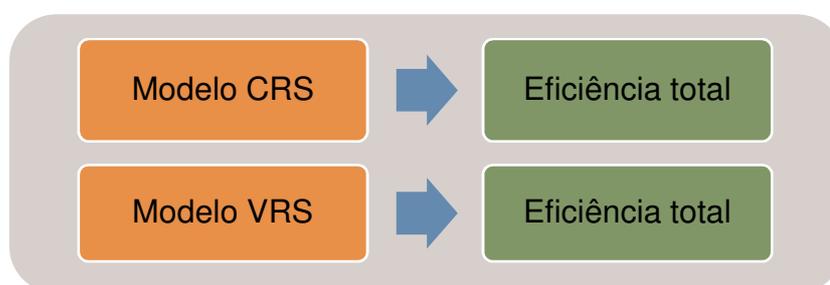
$P$  = Produtividade atual da DMU

$P_{max}$  = Produtividade máxima que pode ser alcançada por essa DMU

O resultado do cálculo de eficiência é sempre um valor entre 0 e 1, sendo muitas vezes expresso em termos percentuais para facilitar a compreensão. Além disso, é possível calcular dois tipos de eficiência: (a) a eficiência absoluta e a (b) eficiência relativa. Na eficiência absoluta a produtividade máxima ( $P_{max}$ ) é um valor utópico impossível de ser alcançado. Na eficiência relativa o  $P_{max}$  é a produtividade da concorrente mais eficiente dessa DMU. Sendo assim, caso a eficiência de uma DMU seja igual a 1 significa que essa unidade é eficiente e se for menor que 1 é considerada ineficiente (MARIANO et al., 2006).

Färe et al. (2013) comentam que a principal causa de ineficiência de uma determinada DMU normalmente está associada à escala de produção, à ineficiência técnica ou à ineficiência operacional. Mariano et al. (2006) apontam que devido a diferença entre o tipo de retorno de escala, os modelos CRS e VRS são utilizados para cálculo de tipos distintos de eficiência. Assim, o CRS calcula a eficiência total e o VRS calcula a eficiência técnica, como ilustrado pela Figura 7.

Figura 7 - Modelos matemáticos e tipo da eficiência calculada



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Mariano et al. (2006)

No cálculo da eficiência total a DMU em análise é comparada com todas as concorrentes do grupo estudado enquanto na eficiência técnica a DMU é comparada apenas com aquelas que operam em escala semelhante à sua. Após realizar o cálculo da eficiência técnica e da eficiência total, pode-se calcular a eficiência de escala (MARIANO et al., 2006).

A eficiência de escala depende da condição da empresa de estar produzindo abaixo ou acima de sua escala ótima de produção e pode ser calculada a partir da eficiência técnica e da eficiência total de uma DMU por meio da equação (29).

$$Eficiência\ de\ escala = \frac{Eficiência\ total}{Eficiência\ técnica} \quad (29)$$

Em que:

Eficiência total = a eficiência calculada pelo modelo CRS

Eficiência técnica = a eficiência calculada pelo modelo VRS

Quando o quociente da equação 29 atinge o valor igual a um, existem indicações de que a DMU está operando em sua máxima escala de produção possível (MPSS - *Most Productive Scale Size*) ou escala ótima de produção (FERREIRA; GOMES, 2009). Quando os resultados da são diferentes de um, Banker, Charnes e Cooper (1984) apontam três tipos de retorno à escala: (I) retornos constantes de escala; (II) retornos crescentes de escala; e (III) retornos decrescentes de escala.

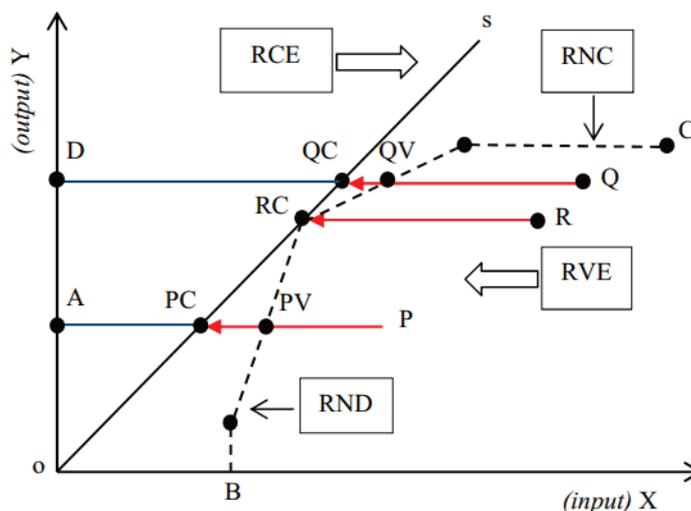
Quadro 7 - Tipos de retorno à escala existentes

Tipo de retorno	Equação	Descrição
(I) Retornos Constantes de escala	$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$ $\Lambda \geq 0 \forall k$ (30)	O aumento nos números de <i>inputs</i> resulta em variações proporcionais nos <i>outputs</i> , quando uma DMU está operando na sua capacidade ótima.
(II) Retornos crescentes de escala;	$\sum_{k=1}^n \lambda_k > 1$ $\Lambda \geq 0 \forall k$ (31)	O aumento nos números de <i>inputs</i> resulta em variações desproporcionalmente maiores nos <i>outputs</i> . Isso ocorre quando uma DMU opera significativamente abaixo da sua capacidade ótima.
(III) Retornos decrescentes de escala.	$\sum_{k=1}^n \lambda_k < 1$ $\Lambda \geq 0 \forall k$ (32)	O aumento nos números de <i>inputs</i> resulta em variações desproporcionalmente menores nos <i>outputs</i> , quando uma DMU está operando acima de sua capacidade ótima.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ferreira e Gomes (2009)

O Gráfico 6 ilustra os conceitos de eficiência técnica e eficiência de escala, sendo que as siglas significam: RCE (Rendimentos Constantes de Escala); RNC (Rendimentos Não Crescentes); RVE (Rendimentos Variáveis de Escala) e RND (Rendimentos Não Decrescentes).

Gráfico 6 - Eficiência técnica e eficiência de escala



Fonte: Ferreira e Gomes (2009, p. 193)

No Quadro 8, são descritas as possíveis combinações de insumo e produto das DMUs nos modelos DEA, pressupondo-se rendimentos constantes e variáveis

Quadro 8 - Combinações possíveis

Tipo de retorno	Condição da DMU segundo a pura eficiência técnica	
	Eficiente	Ineficiente
Constante	Trata-se da melhor situação. A DMU utiliza os recursos sem desperdício e opera em escala ótima. O aumento da produção deve ocorrer mantendo-se a proporção de uso dos fatores, e os aumentos de custos são proporcionais aos aumentos de produção. Ponto RC no Gráfico 6.	Apesar de estar operando na escala ótima, existe ineficiência técnica. Isso significa que se pode reduzir o uso dos insumos e continuar produzindo a mesma quantidade (orientação insumo). De maneira equivalente, a produção pode crescer utilizando-se os mesmos insumos (orientação produto). Ao eliminar as ineficiências técnicas, a DMU torna-se eficiente, com retornos constantes. Ponto R no Gráfico 6.
Crescente	Apesar de tecnicamente eficiente, não existem insumos utilizados em excesso e o volume de produção está abaixo da escala ótima. Isso significa que a DMU pode aumentar a produção a custos decrescentes. Assim, o aumento da produção deve ocorrer mediante incorporação de insumos, porém mantendo as relações entre as quantidades de produtos e os insumos. Ponto PV no Gráfico 6.	Nessa situação, existem dois problemas: Ineficiência técnica, devido ao uso excessivo de insumos, e eficiência de escala. Essa última ocorre porque a DMU está operando abaixo da escala ótima. Para aumentar a eficiência técnica, devem-se eliminar os excessos de uso de insumos. Para operar em escala ótima, é necessário aumentar a produção. Em síntese, a DMU deve aumentar a produção, porém esse aumento deve ocorrer a fim de que as relações entre quantidades utilizadas de

Tipo de retorno	Condição da DMU segundo a pura eficiência técnica	
	Eficiente	Ineficiente
		insumo e volume de produção sejam reduzidas. Ponto P no Gráfico 6.
Decrescente	DMU tecnicamente eficiente, porém operando acima da escala ótima. Uma alternativa é reduzir o volume de produção da DMU, mantendo-se a relação entre insumos e produtos. Uma vez que não há ineficiência técnica, a superutilização da planta poderá ser vantajosa. Uma alternativa para aumentar a produção seria a adoção de políticas quantitativas, pois o aumento da produtividade dos fatores possibilitaria o crescimento da produção sem necessidade de utilizar mais insumos. O fato é que, nessa situação, o aumento da produção dar-se-á a custos crescentes. Ponto QV, no Gráfico 6.	Nesse caso, a DMU está operando acima da escala ótima e tem ineficiência técnica. É preciso corrigir os dois problemas. Para aumentar a eficiência técnica, devem-se eliminar os excessos de utilização de insumos. Com relação à escala, pode-se reduzir a produção em cada DMU ou utilizar um número maior de DMUs menores para produzir a mesma quantidade anterior. Isso dependerá das condições objetivas de mercado, da competitividade e da estrutura do setor. Pode-se, ainda, melhorar a tecnologia aumentando a produtividade dos fatores de produção ou insumos. Ponto Q, no Gráfico 6.

Fonte: Ferreira e Gomes (2009, p. 202)

#### 2.3.2.4 Alvos

Os alvos são valores utilizados na Análise Envoltória de Dados referente aos *inputs* ou *outputs* de uma determinada DMU, que permitem tornar uma DMU considerada ineficiente em uma DMU eficiente (FERREIRA; GOMES, 2009). Para isso, os valores alvo elevariam a eficiência da DMU ao valor um. Para realizar o cálculo do alvo de uma determinada DMU é necessário realizar o produto da posição atual de um determinado insumo pelo valor ( $\lambda$ ) pertencente às DMUs de referência (*benchmarking*) (HAYNES, E.; DINC, 2005).

$$Alvo = \sum_{k=1}^n x_{ik} * \lambda_k \quad (33)$$

Com o uso dos alvos é possível verificar quais insumos estão sendo consumidos em excesso e direcionar ações para reduzir o consumo e melhorar a eficiência da unidade de análise (FERREIRA; GOMES, 2009). Na próxima seção, é apresentado o referencial teórico das análises estatísticas que fundamentam o desenvolvimento do trabalho.

## 2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A informação disponível para tomada de decisões aumentou e irá continuar assim no futuro, provavelmente até mais rapidamente. Muitas das informações desapareciam, não eram coletadas ou simplesmente eram descartadas. Essas informações estão sendo coletadas e armazenadas em banco de dados e estão disponíveis para serem “garimpadas” para fins de melhoria na tomada de decisões. Parte dessas informações podem ser analisadas e compreendidas com estatística simples, mas parte demanda técnicas estatísticas multivariadas mais complexas para converter os dados em conhecimento compreensível (HAIR et al., 2009).

As técnicas de análise multivariada tornaram-se populares porque permitem que as organizações criem conhecimento, melhorando sua tomada de decisões. Exemplos de sua aplicação podem ser identificadas em indústrias com processos de fabricação em lote, a fim de avaliar a reprodutibilidade e em procedimentos estatísticos para estudo da homogeneidade de variâncias. A análise multivariada refere-se a todas as técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre os objetos de investigação. Deste modo, qualquer análise simultânea de duas ou mais variáveis pode ser considerada, a princípio, como multivariada (BROWN; FORSYTHE, 1974; HAIR et al., 2009).

Os escores de eficiência resultantes dos cálculos da Análise Envoltória de Dados (DEA) são submetidos a análises estatísticas. Um maior aprofundamento das análises estatísticas utilizadas neste trabalho é apresentado nas seções a seguir.

### 2.4.1 Teste de Shapiro-Wilk

Samuel Sanford Shapiro e Martin Bradbury Wilk (1965) publicaram seus estudos sobre um novo procedimento estatístico para testar a normalidade de uma amostra completa. Este teste foi o primeiro capaz de detectar as saídas da normalidade devido à obliquidade ou à curtose (medida de forma que caracteriza o achatamento da curva da função de distribuição de probabilidade), ou ambas. Tornou-se amplamente conhecido e preferido, sendo considerado como um dos procedimentos mais comuns e disponíveis na maioria dos *softwares* estatísticos atuais (RAZALI; WAH, 2011).

O teste de Shapiro-Wilk, como ficou conhecido, é uma modificação do teste de Kolmogorov-Smirnov (teste KS ou teste K-S) com propósito de calcular o nível de significância para as diferenças em relação a uma distribuição normal. Este teste, assim como outros testes de significância, é menos útil em amostras menores de 30 e muito sensível em amostras que excedem 1.000 observações (HAIR et al., 2009).

Dada uma amostra ordenada  $y_1 < y_2 < \dots < y_n$ , o teste estatístico Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) é definido por meio da equação (34).

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (34)$$

Em que:

$y_i$  = ordem das amostras

$\bar{y}$  = média das amostras

$a_i$  = valores esperados da ordem das amostras estatísticas das variáveis aleatórias independentes e distribuídas por igual às amostradas da distribuição normal

O valor de W situa-se entre zero e um. Pequenos valores de W levam à rejeição da normalidade enquanto que um valor de um indica a normalidade dos dados (RAZALI; WAH, 2011). Na próxima seção, são apresentados os conceitos referentes ao teste de Levene.

#### 2.4.2 Teste de Levene

Em aplicações estatísticas a questão diz respeito em saber se as variações de k amostras são iguais. Existem testes que podem analisar esta questão, porém vários deles dependem da suposição da normalidade e não são robustos. O professor Howard Levene propôs em 1960 uma nova abordagem para este problema, aplicando o teste F aos desvios absolutos às médias das observações de cada grupo. A abordagem de Levene tornou-se uma poderosa e robusta análise da não-normalidade, além de ser popularmente reconhecida como uma ferramenta para verificar a homogeneidade de variâncias (GASTWIRTH et al., 2009).

A presença de variâncias desiguais (heteroscedasticidade) é considerada uma das violações mais comuns de suposições. O diagnóstico pode ser feito a partir da análise dos gráficos de resíduos ou testes estatísticos simples. O teste de Levene fornece uma análise para homogeneidade de variância, que mede a igualdade de variâncias para um par de variáveis. Seu uso é recomendado porque é menos afetado por desvios da normalidade, outro problema comum em regressão (HAIR et al., 2009).

A proposta inicial do teste de Levene foi para amostras iguais, mas posteriormente foi generalizado para amostras de tamanhos desiguais. A estatística é obtida a partir da aplicação do *one-way* ANOVA entre os grupos, no qual cada observação é substituída pelo desvio absoluto da média de cada grupo. Para amostras muito pequenas a alta correlação entre os desvios do mesmo grupo destrói e invalida do teste. Contudo, em amostras com dez ou mais observações por grupo este problema não ocorre (BROWN; FORSYTHE, 1974).

Os testes estatísticos para igual dispersão de variâncias avaliam a igualdade de variâncias existentes dentro de grupos formados por variáveis não-métricas. Nestes casos o teste de Levene é usado para avaliar se as variâncias de uma variável métrica são iguais em qualquer número de grupos (HAIR et al., 2009). A facilidade para aplicação do teste fez com que se tornasse popular e utilizado em pesquisas relacionadas à mudanças climáticas, geologia, qualidade de alimentos, negócios empresariais, genética, medicina, esportes entre outros (GASTWIRTH et al., 2009)

No teste de Levene e Shapiro-Wilk, quando a hipótese nula  $H_0$  for verdadeira indica que os dados são provenientes de uma distribuição normal e são homogêneos, respectivamente. Assim, a condição para aceitabilidade que valida as hipóteses  $H_0$  e  $H_1$  é dependente do valor de significância obtido no teste, que para ser significativo deve ser maior ou igual a 0,05 (Sign.  $\geq 0,05$ ) (HAIR et al., 2009).

#### 2.4.3 Análise de Variância (ANOVA)

A técnica estatística análise de variância (ANOVA) é usada para determinar se as amostras de dois ou mais grupos surgem de populações com médias iguais, ou seja, se as médias dos grupos diferem significativamente. A análise de variância faz múltiplas comparações de grupos de tratamento, determinando em um único teste se o conjunto inteiro de médias de amostras sugere que as amostras foram obtidas a partir da mesma população geral, ou seja, sendo empregada para determinar

probabilidades de que diferenças em médias ao longo de diversos grupos ocorrem apenas devido a erro amostral. Assim, a análise de variância examina uma medida dependente, ao passo que a análise multivariada de variância compara as diferenças de grupos quanto a duas ou mais variáveis dependentes existentes (HAIR et al., 2009).

Para utilizar esta técnica existe uma exigência de tamanho de amostra, para cada grupo é recomendado uma amostra de aproximadamente 20 observações. Desse modo, aumentar o número de níveis em qualquer fator demanda um aumento do tamanho da amostra (HAIR et al., 2009). O procedimento para utilização, como o próprio nome sugere (análise de variância) propõem que duas estimativas independentes da variância para a variável dependente sejam comparadas. A primeira reflete a variabilidade geral de respondentes dentro dos grupos ( $MS_W$ ), e a segunda representa as diferenças entre grupos atribuíveis aos efeitos de tratamento ( $MS_B$ ). Assim, tem-se o Quadro 9.

Quadro 9 - Estimativa de variâncias existentes no teste estatístico ANOVA

<b>Estimativa de variância dentro de grupos (<math>MS_W</math>)</b>	Essa estimativa de variabilidade de média dos respondentes quanto à variável dependente dentro de um grupo de tratamento é baseada em desvios de escores individuais a partir de suas respectivas médias de grupo. O valor $MS_W$ é chamado muitas vezes de variância de erro.
<b>Estimativa de variância dentro de grupos (<math>MS_B</math>)</b>	Essa estimativa é a variabilidade das médias de grupos de tratamento quanto à variável dependente. É baseada em desvios de médias de grupos a partir da média geral de todos os escores. Sob a hipótese nula de inexistência de efeitos de tratamento ( $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$ ) essa estimativa de variância reflete diferenças em médias e aumentam o valor esperado da $MS_B$ .

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hair et al. (2009, p. 309)

O cálculo da estatística F é obtido pela razão entre  $MS_B$  e  $MS_W$ , conforme demonstrado na equação (35). Esta medida representa o quanto de variância é atribuível aos diferentes tratamentos versus a variância esperada a partir de amostragem aleatória. Como as diferenças em médias aumentam o valor esperado da  $MS_B$  (ver Quadro 9), grandes valores da estatística F levam à rejeição da hipótese nula de inexistência de diferença em médias dos grupos (HAIR et al., 2009).

$$Estatística F = \frac{MS_B}{MS_W} \quad (35)$$

Para interpretar o resultado da estatística  $F$  e verificar se é suficientemente grande para justificar a rejeição da hipótese nula (que significa que as diferenças estão presente entre os grupos) sugere-se os passos: (I) Determinar o valor crítico para a estatística  $F$  ( $F_{crit}$ ), usando a distribuição  $F$  com  $(k - 1)$  e  $(N - k)$  graus de liberdade para um nível especificado de  $\alpha$ ; (II) Calcule a estatística  $F$  ou encontre o valor  $F$  calculado pelo programa de computador; (III) Se o valor calculado da estatística  $F$  exceder  $F_{crit}$ , concluir que as médias ao longo de todos os grupos não são todas iguais (HAIR et al., 2009). (HAIR et al., 2009).

Assim, quando a hipótese nula  $H_0$  é verdadeira, indica que não existe diferença entre as médias das amostras. O valor  $p-value$  é a condição que valida as hipóteses  $H_0$  e  $H_1$ , sendo considerado significativo um  $p-value$  menor ou igual a 0,05 ( $p-value \leq 0,05$ ). Quanto maior o escore de  $F$ , pode-se afirmar que mais significativo é o  $p-value$  do teste ANOVA efetuado (HAIR et al., 2009). Apresenta-se, a seguir, os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa.

#### 2.4.4 Teste de Wilcoxon

O teste de Wilcoxon, também conhecido como teste dos postos sinalizados de Wilcoxon, foi desenvolvido por Frank Wilcoxon em 1946 e publicado no artigo intitulado “*Individual comparisons of grouped data by ranking methods*”, que propôs o teste de soma dos postos para duas amostras independentes (WILCOXON, 1946).

Para sua utilização, alguns pressupostos precisam ser respeitados (SIEGEL, 1956): I) os dados são pareados e provem da mesma população; II) cada par é escolhido aleatoriamente e de forma independente e; III) os dados são medidos pelo menos em uma escala ordinal (não podem ser nominais).

O teste de Wilcoxon é um teste de hipóteses não paramétrico utilizado para comparação de duas amostras pareadas quando se pretende comparar a medida de tendência central da população em estudo, uma vez que quando sua distribuição não é normal a tendência central é a mediana. O objetivo do teste de Wilcoxon é comparar as performances de cada elemento no sentido de verificar se existem diferenças significativas entre seus resultados nas duas situações analisadas (DALGAARD, 2008; WILCOXON, 1946). Após descrição dos conceitos teóricos, a próxima seção apresenta os procedimentos metodológicos e etapas adotadas para o desenvolvimento da pesquisa.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

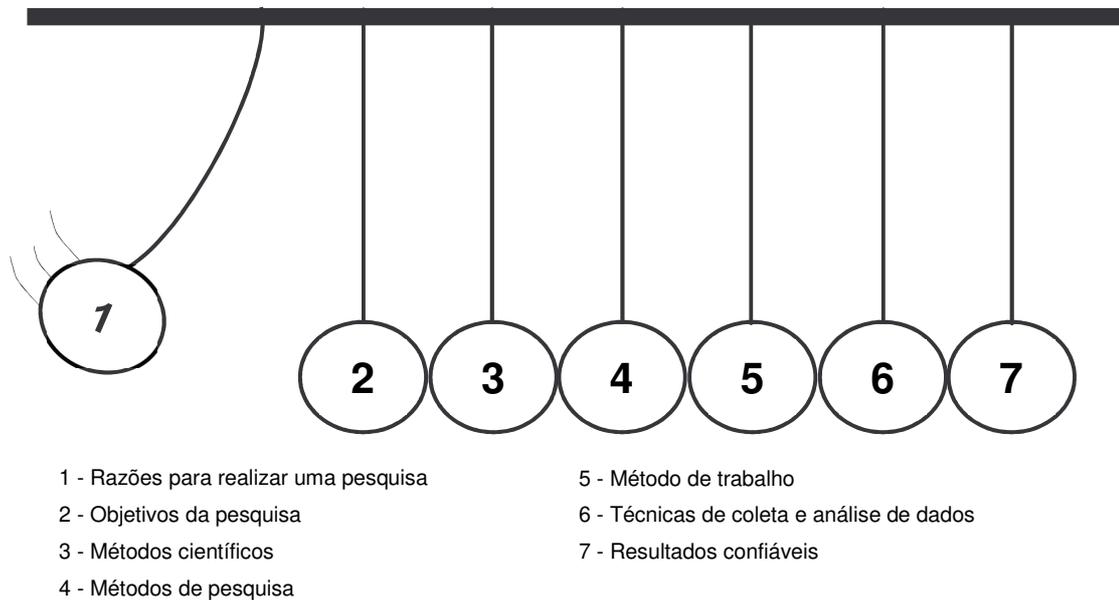
Na área de gestão, a pesquisa científica deve buscar conciliação entre a teoria e prática, pois ambas geram conhecimentos que visam melhorar os sistemas existentes ou auxiliar no desenvolvimento de novos sistemas, produtos ou serviço (DRESCH et al., 2015). Para garantir que uma pesquisa científica seja reconhecida como sólida e potencialmente relevante, tanto pelo campo acadêmico quanto pela sociedade, a pesquisa deve demonstrar que foi desenvolvida com rigor e que é passível de debate e verificação (LACERDA et al., 2013). É nesse âmbito que os procedimentos metodológicos proporcionam que um conjunto de informações possa ser coletado para servir de suporte ao cumprimento dos objetivos da pesquisa (BARNES, 2001).

Em função da relevância do procedimento metodológico, nesta seção são descritos os procedimentos e as etapas propostas para realização desta pesquisa. Desta forma, a seguir, apresenta-se o delineamento da pesquisa, pelo qual se procura explicar um conjunto de decisões que sustentem os procedimentos adotados na investigação.

#### **3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA**

O delineamento de uma pesquisa refere-se ao planejamento do estudo em uma visão mais ampla, auxiliando o pesquisador a planejar o trabalho, definir a coleta de dados e interpretar as informações obtidas. Essa proposta tem como principal objetivo considerar o ambiente no qual os dados serão coletados, analisando as formas de controle das variáveis envolvidas e quais os procedimentos adotados para a coleta desses dados (YIN, 2001). A condução das pesquisas científicas possui uma ordem prioritária de elementos que precisam ser considerados e a Figura 8 exhibe a estratégia do pêndulo proposto por Dresch et al. (2015) para condução de pesquisas científicas.

Figura 8 - A estratégia para condução de pesquisas científicas



Fonte: Dresch et al. (2015, p. 16).

As razões existentes para realizar uma pesquisa podem constar no desejo dos investigadores de compartilhar uma nova informação, buscar a resposta para uma questão importante ou mesmo compreender um fenômeno em profundidade (DRESCH et al., 2015). As razões para o desenvolvimento desta pesquisa estão descritas na seção 1. Após definir uma razão para efetuar a pesquisa, o pesquisador deve estabelecer seus objetivos que deseja alcançar com a investigação (DRESCH et al., 2015).

Os objetivos podem estar associados a explorar, descrever, explicar ou prever um algum fenômeno (DRESCH et al., 2015). Esta pesquisa é considerada explicativa, por ter o objetivo de explicar a razão de um fenômeno, aprofundando o conhecimento de uma determinada realidade (YIN, 2001). Neste caso, o fenômeno está associado com a eficiência em operações e a realidade é o contexto da empresa analisada. A pesquisa também pode ser considerada exploratória, pois identifica as variáveis que contribuem na eficiência em operações.

O método científico é uma perspectiva ou premissa sobre como o conhecimento é construído. A escolha do método científico leva em conta o ponto de partida da pesquisa e o objetivo da pesquisa (DRESCH et al., 2015). Esta pesquisa utiliza o método científico hipotético-dedutivo, pois são consideradas hipóteses para

avaliação da eficiência em operações. O método hipotético-dedutivo foi definido pelo filósofo Karl Popper na tentativa de desenvolver um método científico adequado na busca da verdade (PRODANOV; FREITAS, 2013). Este método sugere que a partir de um conhecimento previamente construído e com uma lacuna observada, o pesquisador pode propor novas teorias formando hipóteses ou preposições e colocá-las a prova (DRESCH et al., 2015). O método hipotético-dedutivo inicia-se com um problema no conhecimento científico, passando pela formulação de hipóteses e por um processo de inferência dedutiva, o qual testa a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pela hipótese (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Ainda sobre a estratégia para condução de pesquisas científicas (Figura 8), a próxima etapa diz respeito a definição do método de pesquisa adotado. Segundo Dresch et al. (2015), a definição de um método de pesquisa ajuda o pesquisador a garantir que sua investigação de fato irá resolverá o problema de pesquisa. Este trabalho é caracterizado como um estudo de caso. O estudo de caso consiste em um estudo profundo de um ou poucos objetos, de maneira que seja possível o amplo e detalhado conhecimento, uma tarefa praticamente impossível de ser realizada mediante outros delineamentos de pesquisa existente na literatura (BARRATT; CHOI; LI, 2011; CAUCHICK, 2007). O objeto deste trabalho é o entendimento das variáveis que influenciam na eficiência técnica em um sistema ETO, sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de um estudo de caso em profundidade e não apenas baseado em percepções existentes.

Estudos de caso sobre os princípios da TOC são amplamente discutidos na literatura, a fim de descrever modificações após sua implantação (WAHLERS; COX, 1994), apresentar os resultados de sucesso em organizações industriais (MABIN; BALDERSTONE, 2003) e analisar aplicações do TPC em processos seriados de produtos únicos (BETTERTON; COX, 2009) ou multiprodutos para aumentar a performance operacional (GONZALEZ-R; FRAMINAN; RUIZ-USANO, 2010).

Estudos de caso relacionados a eficiência, com a aplicação de DEA, apresentam crescimento nos últimos anos (EMROUZNEJAD; YANG, 2017). As medidas de desempenho possuem um interesse para as empresas e são consideradas importantes para manter as empresas competitivas (LAMPE; HILGERS, 2015). A utilização de DEA está presente nos estudos de caso apresentado por Lu e Hung (2010), Li e Amini (2012), Safak et al. (2014), Hafezalkotob e Haji-Sami (2015),

Kengpol e Tuammee (2015), Zadmirzaei et al. (2015), Piran (2016), Alirezaee (2016), Park et al. (2017) e Duman et al. (2017).

Os estudos de caso são constituídos de uma combinação de métodos de coleta de dados, como entrevistas, questionários, observações, etc. As evidências coletadas servem de subsídio para o pesquisador, podendo ser tanto quantitativa quanto qualitativa (DRESCH et al., 2015). Autores (CLAASEN et al., 2015; DUNNING et al., 2008; OLISTAD et al., 2012; POWELL et al., 2013) indicam o uso de uma abordagem mista. Para o presente trabalho, considerou-se a abordagem mista, pois propõe-se o uso de técnicas matemáticas e estatísticas para avaliar quais as variáveis que influenciam na eficiência técnica em um sistema produtivo. Ainda que em menor grau, também se utiliza a abordagem qualitativa para melhor compreender as variáveis empregadas no estudo.

Para Cauchick (2007), o ato de mensurar variáveis de pesquisa é a característica mais marcante da abordagem quantitativa. Um dos elementos importantes do rigor é a objetividade da pesquisa científica, alcançável com o uso da linguagem matemática. Mensurar as variáveis de pesquisa é explorado na literatura especializada em metodologia de pesquisa, tanto em trabalhos de cunhos teóricos quanto trabalhos de aplicação e destacam-se as publicações de Eisenhardt (1989), Leonard-Barton (1990), Van de Ven e Huber (1990), McCutcheon e Meredith (1993), Jayanthi e Sinha (1998), Lewis (1998), Hill et al. (1999), Sousa e Voss (2001), Voss et al. (2002), Yin (2001), entre outros.

O estudo de caso quantitativo apresentado por Jayanthi e Sinha (1998) foi realizado em uma empresa industrial de tecnologia com o objetivo de contextualizar o processo de implementação de inovações. A introdução de produtos com ciclo de vida cada vez menor força as empresas para inovarem seus processos. Para suportar o estudo, a utilização de dados históricos possibilitou a realização das análises estatísticas e proposições de inovações. Sousa e Voss (2001) pesquisaram se as práticas de gerenciamento de qualidade dependem do contexto da estratégia de manufatura, e destacam a importância dos critérios de seleção das amostras respondentes/entrevistados, as principais variáveis e suas unidades de medidas e os procedimentos de coleta de dados aplicáveis. A partir de um estudo de caso foi possível examinar o uso de práticas de gerenciamento de qualidade de processo em fábricas com diferentes estratégias de manufatura.

Para que um estudo de caso alcance os objetivos, é necessário que se cumpram as etapas essenciais na condução da pesquisa. Essas etapas são: a definição da estrutura conceitual teórica, o planejamento dos casos, a condução do teste piloto, a coleta e análise de dados e a confecção de relatório com os resultados encontrados. A Figura 9 apresenta o detalhamento das etapas que devem ser desenvolvidas para aplicação de um estudo de caso.

Figura 9 - Etapas para aplicação de um estudo de caso



Fonte: Adaptado de Cauchick et al. (2012, p. 134).

Sendo assim, a classificação geral da pesquisa é exibida no Quadro 10, demonstrando a classificação em relação a natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos adotados.

Quadro 10 - Classificação geral da pesquisa

<b>Classificação</b>	<b>Tipo de pesquisa</b>	<b>Descrição</b>
Natureza	Aplicada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objetiva gerar conhecimento para a aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos.</li> <li>• Analisar os efeitos da implantação do TPC na eficiência técnica em um sistema produtivo ETO.</li> </ul>
Abordagem	Quantitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesquisa aplicada por meio de estudos estatísticos voltados à quantificação do objeto de estudo.</li> <li>• Uso de técnicas matemáticas e estatísticas para avaliar quais as variáveis que influenciam na eficiência técnica em um sistema produtivo.</li> </ul>
	Qualitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesquisa onde o processo de interpretação dos fenômenos e atribuição de significados são básicos no processo de pesquisa.</li> <li>• Melhor compreender as variáveis empregadas no estudo.</li> </ul>
Objetivos	Explicativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objetiva explicar a razão de um fenômeno, aprofundando o conhecimento de uma determinada realidade.</li> <li>• O fenômeno está associado com a eficiência em operações, a realidade é o contexto da empresa analisada.</li> </ul>
	Exploratória	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visa identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos.</li> <li>• Identifica as variáveis que contribuem na eficiência em operações.</li> </ul>
Procedimentos técnicos	Estudo de caso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que seja possível o amplo e detalhado conhecimento.</li> <li>• Necessário o desenvolvimento de um estudo de caso em profundidade e não apenas baseado em percepções existentes.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor com base Cauchick (2007), Dresch et al. (2015) e Yin (2001)

Após considerações sobre o método de pesquisa, na próxima seção é apresentado o método de trabalho.

### 3.2 MÉTODO DE TRABALHO

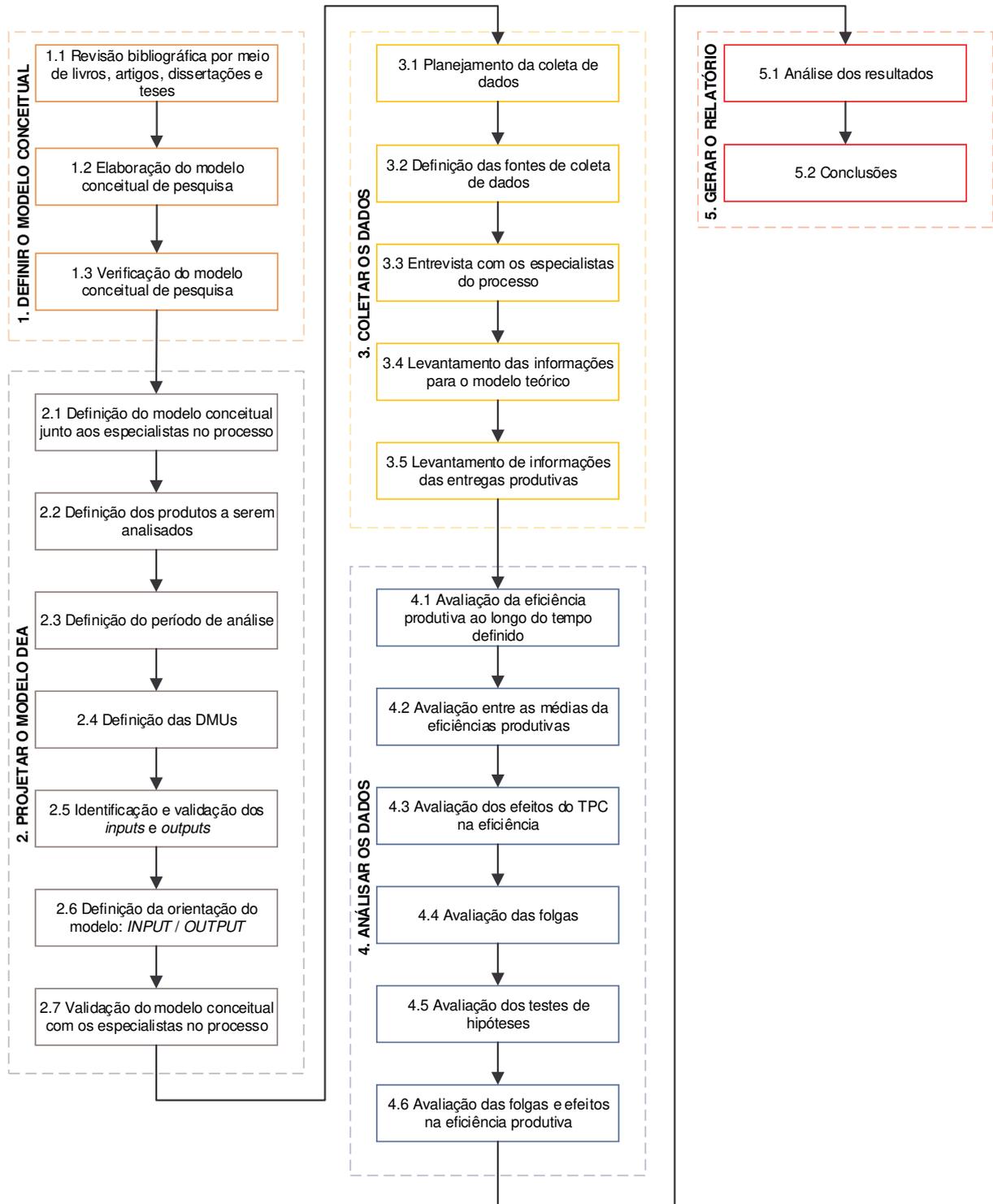
O método de trabalho possui o propósito de definir a sequência de passos lógicos que o pesquisador deve executar para atingir os objetivos de sua pesquisa. Nesta etapa, o pesquisador deve detalhar como o método de pesquisa apresentado anteriormente será desdobrado, fundamentando-se no método científico definido (DRESCH et al., 2015; YIN, 2001).

O método de trabalho proposto para a pesquisa foi elaborado baseado nas etapas para aplicação de um estudo de caso mencionado por Cauchick et al. (2012) e exibido na Figura 9, com adaptações. O método de trabalho é composto por cinco etapas: 1) Definir o modelo conceitual; 2) Projetar o modelo DEA; 3) Coletar os dados; 4) Analisar os dados, e; 5) Gerar o relatório e é apresentado na Figura 10.

A fase 1 do método de trabalho consiste na definição do modelo conceitual teórico da presente pesquisa. Esta etapa contempla uma Revisão Sistemática da Literatura que inclui artigos, dissertações, teses e livros em bases de dados nacionais e internacionais relevantes sobre o tema. Nesta etapa, é realizada uma pesquisa dos conceitos referentes a Teoria das Restrições (TOC), Tambor-Pulmão-Corda (TPC), Engenharia sob Encomenda (*Engineer-to-Order* - ETO), análise de eficiência e produtividade em operações e aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) em operações produtivas. Após esta etapa, são realizados o delineamento prévio e a avaliação do modelo conceitual de pesquisa. O modelo conceitual de pesquisa é apresentado na seção 1 do trabalho.

A fase 2 do trabalho tem como objetivo projetar o modelo DEA. Após a definição do modelo conceitual de pesquisa, esta fase é realizada com auxílio de seis especialistas no processo investigado (indústria eletrônica), sendo informado quais são os especialistas e os critérios de seleção na seção 3.3 projeto do modelo DEA. Na sequência, com base na literatura e com o apoio dos especialistas da empresa, é elaborado o projeto do modelo DEA, com definição dos produtos a serem analisados, definição do período de análise, definição das DMUs, identificação dos *inputs* e *outputs*, e demais atividades exibidas na Figura 10. Após o desenvolvimento do modelo DEA, são realizados ajustes e uma avaliação final. Além disso, o modelo conceitual DEA é validado com os especialistas da empresa que auxiliaram no desenvolvimento do estudo.

Figura 10 - Método de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

O planejamento e a execução da coleta de dados para o método de trabalho ocorrem na fase 3. Antes de iniciada a coleta dos dados é necessário realizar o planejamento detalhado de como será realizado, abordando os passos que o pesquisador deve seguir para realizar a coleta e como se dá sua condução. Logo em seguida são definidas as fontes para coleta dos dados, ou seja, quais são os participantes do estudo de caso que irão proporcionar por meio de entrevistas as informações para construção do modelo teórico.

Na fase 4 os resultados obtidos são analisados por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA). É realizada uma avaliação para verificar o comportamento da eficiência técnica em um sistema produtivo ao longo do tempo definido. Posteriormente, são realizadas análises estatísticas com o objetivo de quantificar os efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência produtiva. Assim, é possível realizar uma avaliação entre as médias da eficiência produtiva, analisar as folgas e avaliar as variáveis que afetam a eficiência.

Por fim, na fase 5 que corresponde a gerar o relatório são apresentados os resultados e discussões sobre a pesquisa. Os resultados gerados nessa fase são apresentados para os especialistas no processo com propósito de gerar um debate. De tal modo que se identifique quais foram as contribuições desta pesquisa para a empresa analisada e para a teoria. No fechamento, a conclusão sobre o problema estudado é escrita, sendo apresentadas as delimitações do estudo e sugestões de pesquisas futuras. Na próxima seção, são descritos os processos referentes ao projeto do modelo DEA.

### **3.3 PROJETO DO MODELO DEA**

A empresa no qual é desenvolvido o estudo é uma indústria que na busca de aumento da produtividade e eficiência iniciou no ano de 2016 a implantação do TPC nos processos industriais. A seleção da empresa é suportada por autores encontrados na literatura que destacam a possibilidade de aumento da eficiência nos processos quando utilizado um mecanismo de programação e controle de produção adequado (BETTERTON; COX, 2009; COX III, J. F., SCHLEIR, 2013; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2014). Além disso, a escolha da empresa deve-se à possibilidade de acesso as informações necessárias para desenvolvimento do modelo DEA.

Após a definição da empresa e da estrutura conceitual teórica do trabalho, inicia-se a fase de projeto do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA), que é utilizada para efetuar a medição dos efeitos da implantação do TPC. Para esta etapa, é definido o modelo conceitual com o auxílio de seis especialistas no processo produtivo de montagens eletrônicas da empresa em estudo.

A escolha dos profissionais especialistas é atribuída a experiência nas atividades produtivas, conhecimento dos processos da empresa, por terem aceito participar no apoio do desenvolvimento da pesquisa e, principalmente, por terem participado ativamente na implantação do TPC na empresa. Durante as reuniões com os seis especialistas busca-se orientações preliminares quanto à definição das variáveis e quanto ao processo de coleta e tratamento dos dados. Os profissionais da empresa consultados nesta etapa de pesquisa também participam nas etapas subsequentes. No Quadro 11 é exposto o cargo de cada profissional, sua participação no projeto, o tempo de atuação na empresa e formação superior.

Quadro 11 - Profissionais da empresa

<b>Cargo na empresa</b>	<b>Participação no projeto</b>	<b>Tempo de empresa</b>	<b>Formação superior</b>
Analista de PCP	Apoio na definição do modelo, coleta de dados do processo produtivo e interpretação dos resultados.	8 anos	Administração
Analista de PCP	Apoio na definição do modelo e coleta de dados do processo produtivo.	7 anos	Administração
Engenheiro de Manufatura	Apoio na definição do modelo e coleta de dados do processo produtivo e interpretação dos resultados.	15 anos	Engenharia Elétrica
Engenheiro de Manufatura	Apoio na definição do modelo e coleta de dados do processo produtivo e interpretação dos resultados.	12 anos	Engenharia de Produção
Coordenador da Engenharia de Manufatura	Apoio na definição do modelo, validação do modelo e interpretação dos resultados.	15 anos	Engenharia Elétrica
Diretor Industrial	Apoio na definição do modelo e validação do modelo.	18 anos	Engenharia Elétrica

Fonte: Elaborado pelo autor

Os profissionais selecionados formam uma equipe multidisciplinar, visto que exercem cargos operacionais (por exemplo, analista de PCP), táticos (coordenador) e estratégico (diretor). A formação de uma equipe multidisciplinar auxilia o pesquisador em ter conhecimento maior sobre o assunto a ser estudado, com diferentes opiniões (PRODANOV; FREITAS, 2013). Após definir os especialistas do processo, inicia a fase de desenvolver o projeto DEA. Na próxima seção são discutidas as características referente as definições dos produtos a serem analisados.

### 3.3.1 Definição dos produtos a serem analisados

A indústria eletrônica analisada possui três linhas de produtos, que são: computadores, *displays* e eletrônicos. A implantação do TPC foi realizada e abrangeu a programação de produção de todas as linhas de produtos. Os especialistas no processo recomendaram que o estudo fosse desenvolvido levando em conta as três linhas de produtos, visto que possuem a mesma importância para as diferentes linhas. Ainda, os especialistas aconselharam desconsiderar os produtos de engenharia e protótipos, uma vez que estes utilizam processos especiais ainda não estabelecidos ou em desenvolvimento pela engenharia.

Os especialistas da empresa também apontaram que realizar o estudo nas três linhas de produtos permite uma análise do comportamento ao longo do tempo de cada uma das linhas. Nessa análise longitudinal, é possível identificar se a implantação do TPC proporcionou efeitos na eficiência técnica do sistema produtivo. Tal situação pode ser comprovada analisando-se o comportamento da eficiência técnica do sistema produtivo no período pré e pós a implantação do TPC para cada linha de produto avaliado.

Foi comentado com os especialistas que outras mudanças e melhorias efetuadas no período pesquisado impactam igualmente em ambas as linhas de produtos, podendo isolar os efeitos da implantação do TPC. Assim, as melhorias no sistema de *software* ERP, mudanças gerenciais ou renovação do quadro funcional não foram consideradas. Foi apontado que a empresa não apresentou significativas mudanças de gestão no período proposto de análise, além de possuir rotatividade de funcionários inferior a 5% ao ano. Desta forma, os especialistas corroboram que as três linhas de produtos possuem características similares que permitem a análise proposta.

### 3.3.2 Definição do período de análise

Como a pesquisa é longitudinal, abrangendo o período pré e pós a implantação do TPC, uma das etapas é a determinação do período de análise. O primeiro aspecto que envolve esta decisão é avaliar quando ocorreu a implantação do TPC e se houve alteração na classificação dos produtos nas três linhas (computadores, *displays* e eletrônicos). Após consulta aos especialistas da empresa, verificou-se que a programação de produção com uso do TPC iniciou em janeiro de 2016, objeto de estudo desta pesquisa. Ainda, os especialistas apontaram que as três linhas de produtos existiam no período antes da implantação do TPC e mantêm-se ativas.

Com essas informações, verificou-se com os especialistas da empresa o período no qual existiam informações disponíveis para efetuar a coleta de dados. Obteve-se a informação de que em janeiro de 2013 a empresa efetuou a alteração do *software* ERP, responsável pelo gerenciamento da matéria prima, recursos, ordens de produção, entre outros elementos. Em relação a esta alteração, os especialistas apontaram que o novo *software* utilizado a partir do início de 2013 fornece informações mais detalhadas e confiáveis sobre as três linhas de produtos, contudo durante o primeiro ano de utilização houve dificuldades para estabelecer os processos de programação da produção. Dessa maneira, definiu-se o período inicial de análise como julho de 2014 e o período final como junho de 2018. A escolha de tal período, pressupõe que a programação da produção estava estável após dezoito meses da alteração do *software* ERP e que a coleta de dados foi efetuada nos meses de julho, agosto e setembro de 2018.

### 3.3.3 Definição das unidades de tomada de decisão (DMUs)

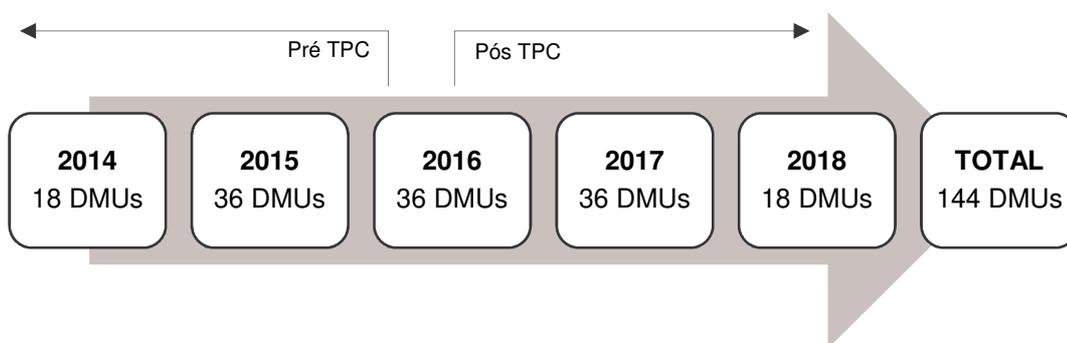
Após a definição do período de análise, propõem-se definir as DMUs com base longitudinal no período de quatro anos (segundo semestre de 2014, 2015, 2016, 2017 e primeiro semestre de 2018) de análise dos dados de produção das três linhas de produtos (computadores, *displays* e eletrônicos).

A proposta inicial foi considerar cada produto como uma DMU. Contudo, após argumentos dos especialistas do processo verificou-se a impossibilidade dessa proposta, embora cada produto seja desenvolvido conforme a ordem do cliente, produtos de reduzido volume tendem a exigir maior tempo de produção do que um

produto de alto volume. Ou seja, determinado cliente pode assinar um acordo para desenvolvimento e produção de um produto e comprar somente duas unidades. Do contrário, existem clientes que compram dezenas de produtos iguais após o desenvolvimento. Essa realidade faz com que a manufatura de reduzido volume demande maior envolvimento dos funcionários e apresente tempos de produção maiores do que os produtos de alto volume, apresentando DMUs com características diferentes e inviabilizando a utilização da DEA.

Nesse sentido, para formação das DMUs foi sugerido pelos especialistas no processo as entregas mensais que uma determinada linha de produto produziu. Logo, a avaliação mensal de cada linha de produto é importante para a empresa no sentido de comparar os resultados desta avaliação com os indicadores utilizados por ela. Também pode ser analisado qual o mês teve o melhor ou pior resultado em relação à eficiência. A Figura 11 mostra o período de análise e a quantidade de DMUs consideradas.

Figura 11 - Período de análise e quantidade de DMUs



Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma, a análise do processo produtivo contempla 144 DMUs, sendo que: I) 18 DMUs referente aos meses do ano de 2014; II) 36 DMUs referente aos meses do ano de 2015; III) 36 DMUs referente aos meses do ano de 2016; IV) 36 DMUs referente aos meses do ano de 2017; e V) 18 DMUs referente ao primeiro semestre do ano de 2018.

As DMUs são segregadas em três períodos: I) Anterior à implantação do TPC (jul/14 até dez/15); II) Transição (jan/16 até jun/16) e; III) Posterior à implantação do TPC (jul/16 até jun/18). Na seção seguinte, são descritos os procedimentos de definição das variáveis do modelo DEA.

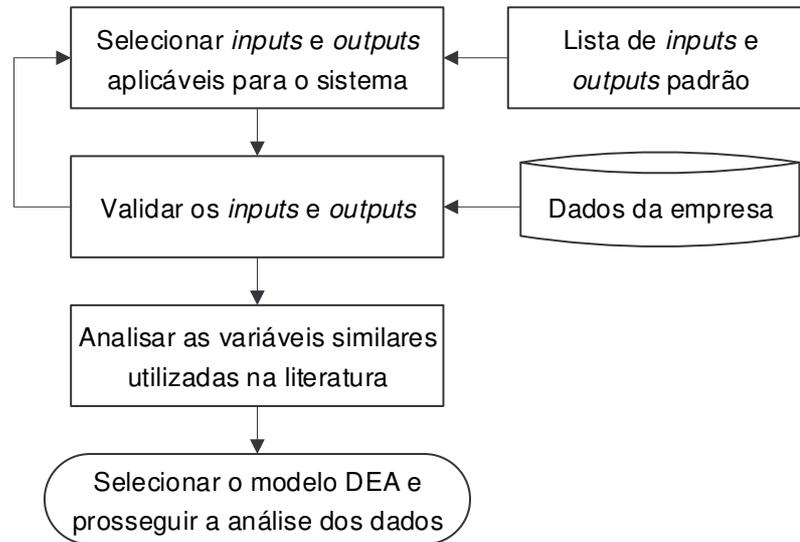
### 3.3.4 Definição das variáveis do modelo DEA (*input* e *output*)

Cook et al. (2014) apontam que a análise utilizando DEA em processos produtivos tendem a ter os *inputs* e *outputs* mais facilmente identificáveis, no qual os recursos utilizados representam os *inputs* e os produtos finalizados os *outputs*. Ainda assim, Cook et al. (2014) destacam que em análises utilizando DEA não é possível ter completa certeza de que todas as variáveis relevantes foram incluídas no modelo definido, porém é relevante que sejam feitos todos os esforços para incluir as variáveis que fazem sentido prático para o estudo.

Em relação ao número de variáveis *input* e *output*, Cook et al. (2014) afirmam que um elevado número de *inputs* e *outputs* comparado ao número de DMUs pode causar erros de discriminação na análise DEA. Uma regra geral sugerida por Golany (1989) é que o número de DMUs seja pelo menos o dobro do número de *inputs* e *outputs* combinados. Banker (1989), por outro lado, afirma que o número de DMUs deve ser pelo menos três vezes o número de *inputs* e *outputs* combinados. Cook et al. (2014) comentam que esta regra não tem base estatística, mas é usualmente imposta por conveniência, pois caso contrário pode causar erros de discriminação na análise DEA.

Nesse sentido, Liu et al. (2016) afirmam que o resultado do modelo DEA pode variar conforme o número e qualidade das variáveis *input* e *output* escolhidas e, recomenda um procedimento para decidir quais das variáveis correlacionadas originais podem ser omitidas com menor perda de informação e quais devem ser retidas. Para estudos com muitas variáveis em relação ao número de DMUs, Jenkins e Anderson (2003) descrevem um método estatístico sistemático para priorizar a escolha. Wagner e Shimshak (2007) propõem a aplicação do método *stepwise* para comparação entre as variáveis e Meng et al. (2008) apresentam uma avaliação piloto com um método hierárquico. A seleção das variáveis desta pesquisa (Figura 12) é baseada no framework proposto por Jain et al. (2011), cuja fase inicial estrutura a necessidade de selecionar uma lista padrão de *inputs* e *outputs* do sistema em estudo e realizar a posterior validação dos dados. Adicionalmente, a literatura é analisada em busca de variáveis similares utilizadas, para então selecionar o modelo DEA e iniciar a análise dos dados.

Figura 12 - Definição das variáveis DEA



Fonte: Elaborado pelo autor com base Jain et al.(2011)

A seleção da lista padrão e validação das variáveis *inputs* e *outputs* aplicáveis para as três linhas de produtos (computadores, *displays* e eletrônicos) em estudo, foi realizada com o apoio dos especialistas do processo mencionados previamente no Quadro 11. Entende-se que este procedimento reforça o rigor da modelagem. Deste modo, a lista primária das potenciais variáveis aplicáveis para as três linhas de produtos seguido da definição conhecida na empresa, é apresentada no Quadro 12. Posteriormente, as variáveis são validadas se estão alinhadas com o processo produtivo estudado. Além disso, é verificada a disponibilidade dos dados na empresa.

Quadro 12 - Variáveis primárias informadas pelos especialistas

Nome	Descrição	Unidade
Horas de trabalho na produção	Quantidade de horas registradas no sistema interno utilizada para fabricação de cada produto	Horas
<i>Lead time</i>	Tempo de atravessamento de cada produto, considerando desde a abertura da ordem de produção até fechamento no sistema ERP	Dias
Número de falhas técnicas reportadas	Quantidade de falhas reportadas no sistema da qualidade para cada produto	Peças
Número de itens comprados	Quantidade de partes compradas de cada produto	Peças

Nome	Descrição	Unidade
Número de pessoas utilizadas no processo	Pessoas consideradas como mão de obra direta	Pessoas
Número de produtos reclamados pelos clientes em garantia	Quantidade de produtos que apresentaram falhas no cliente no período em garantia	Peças
Número de produtos reclamados pelos clientes no recebimento	Quantidade de produtos que apresentaram falhas no cliente na primeira utilização	Peças
<i>Part number</i> (PN)	Número de diferentes produtos produzidos pela empresa	Peças
YIELD	Índice de produtos que completam o processo sem apresentar falhas	Peças
Refugo	Quantidade de produtos refugados no processo produtivo.	Peças
WIP	Quantidade de produtos em processamento	Peças
Cumprimento do prazo de entrega dos pedidos	Pedidos entregues na data planejada ou atrasados	Percentual
Número de itens produzidos	Quantidade de partes produzidas de cada produto	Peças

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo conceitual com as variáveis primárias não pôde ser aplicado completamente devido à falta de dados da empresa ou restrição de acesso às informações, contudo fornece uma orientação para o processo inicial de verificação das variáveis. Para suportar a escolha das variáveis buscou-se analisar a literatura, considerando pesquisas que empregam DEA para avaliar a eficiência de processos, em especial os produtivos.

Para uma avaliação do processo produtivo, Jain et al.(2011) apontam que as variáveis primárias de *input*, como por exemplo, os principais materiais utilizados na fabricação dos produtos devem ser consideradas para elaboração do modelo DEA. Essas variáveis também foram utilizadas em outras pesquisas para composição do custo do produto (COOK; TONE; ZHU, 2014; DÜZAKIN; DÜZAKIN, 2007; FRIEDMAN; SINUANY-STERN, 1998; PARK; LEE; ZHU, 2014).

O tempo de produção necessário para entregar um produto (*labor time* em inglês), foi utilizado como variável *input* nesta pesquisa. Utilizado por Friedman e Stern (1998), esta variável representa unicamente as horas gastas na manufatura, incluindo

horas extras, sem considerar horas não trabalhadas (como férias, afastamentos, etc.). A variável tempo de produção também foi considerada nos estudos de Jain et al.(2011) e Park et al.(2014).

O *Lead time*, termo inglês para tempo de atravessamento, representa no estudo o tempo entre a abertura e encerramento da ordem de produção de um determinado produto, apontado como variável relevante pelos especialistas entrevistados. Buscou-se, na literatura, suporte em pesquisas que contemplam avaliação do processo produtivo com o uso da DEA (COOK; TONE; ZHU, 2014; JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011). Park et al.(2014) realizaram uma avaliação no processo de fabricação de uma empresa industrial coreana utilizando DEA e afirmam que a redução do tempo total de atravessamento na fabricação (compreendido como *Lead time*) é uma das variáveis mais críticas que senão otimizadas causam a ineficiência na performance do processo de fabricação.

Os especialistas entrevistados recomendaram que fossem consideradas variáveis relacionadas à dimensão qualidade. Nesse sentido, indicaram o número de produtos reclamados pelos clientes em garantia, número de produtos reclamados pelos clientes no recebimento, YIELD e refugo como variáveis que influenciam na qualidade dos produtos. Para validar, com base na literatura, o número de produtos reclamados pelos clientes em garantia e número de produtos reclamados pelos clientes no recebimento foram consolidados para representar a variável *input04*, Número de reclamações. Nanci et al.(2004) destacam a utilização de variáveis relacionadas a qualidade, como atrasos na entrega e produtos entregues em condições inadequadas, pois quanto menor for o valor destas variáveis supõe-se que melhor será o cálculo de eficiência da empresa.

Nesse sentido, Seiford e Zhu (2002) comentam que durante a modelagem DEA existem variáveis desejáveis (boas) e indesejáveis (ruins), onde, por exemplo, há ineficiência em processos produtivos que a manufatura gera resíduos e refugos, sendo almejada a redução para melhorar a performance. Wu et al.(2017) consideraram no DEA a quantidade de água gerada pelo processo de fabricação de ligas de aço que não pode ser reutilizada ou reciclada. Jain et al.(2011) aplicaram a modelagem DEA em um processo de manufatura de chips eletrônicos, no qual a variável refugo (*scrap*) foi adotada para quantificar o número de produtos com problemas de qualidade durante a produção ou que apresentaram falhas nos testes e foram descartados. A quantidade de produtos descartados durante a produção (*scrap*)

representa a variável *output03*, sendo os resultados apresentados pelo seu valor inverso ( $1/x$ ) para garantir a maximização da variável no cálculo efetuado na Análise Envoltória de Dados (DEA).

O que indica ser comum entre os estudos é tipicamente utilizar o Número de Funcionários e Ativos das empresas como variável *input* e Receita como *output* (CHANDRA et al., 1998; DÜZAKIN; DÜZAKIN, 2007; KEH; CHU, 2003; WU et al., 2017). Entretanto, as variáveis Ativos e Receita não podem ser determinadas devido a indisponibilidade e restrição de dados pela empresa em estudo. Chandra et al.(1998) apontam que a redução da variável *input* Número de Funcionários pode trazer benefícios na redução das despesas, porém para contratar novos funcionários existem custos adicionais (administrativos, treinamentos, etc.).

A quantidade de produtos em processamento, WIP, é apontada pelos especialistas entrevistados como relevante, dado as características do processo produtivo que são divididas em muitas etapas. Keh e Chu (2003) consideraram analisar esta variável para acompanhar a quantidade dos estoques intermediários. Jain et al.(2011) apontam que a quantidade de produtos entregues no final está relacionada a quantidade de etapas produtivas e estoques intermediários existentes e, a redução da quantidade de produtos em processamento possibilitou alcançar um número maior de produtos entregues.

A variável Produto Acabado também é encontrada como quantidade produzida, produtos entregues, pedidos finalizados e é utilizada com frequência na literatura, como um *output* primário aplicável a diferentes modelos DEA de sistemas produtivos, em geral com objetivo de maximização (COOK; TONE; ZHU, 2014; JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; NANCI; AZEVEDO; SOARES DE MELLO, 2004; PARK; LEE; ZHU, 2014). Segundo os especialistas entrevistados, esta variável é acompanhada na empresa em estudo pelo indicador Pedidos no Prazo (variável *output01* do modelo), sendo considerado um indicador de performance produtivo. Nanci et al.(2004), apontam que a variável produtos entregues compõe o resultado de toda a operação e das variáveis *input*. Cook et al.(2014), afirmam que ao utilizar o DEA para representar um processo produtivo, o *output* deste processo é facilmente identificável e deve ser levado em consideração para desenvolvimento da modelagem.

Após a definição das variáveis, foi decidido quais seriam utilizadas como entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) do modelo. O Quadro 13 apresenta a lista final de variáveis do modelo DEA, seguido da denominação que cada variável representa na

pesquisa, a unidade de medida utilizada e o embasamento da literatura proveniente de estudos anteriores.

Quadro 13 - Lista final de variáveis do modelo DEA

Variável	Nome	Descrição	Unidade	Embasamento
<i>input01</i>	Tempo de Produção	Tempo utilizado na manufatura de um produto.	Horas	Friedman e Stern (1998); Jain et al.(2011); Park et al.(2014).
<i>input02</i>	<i>Lead time</i>	Tempo de atravessamento de um produto.	Dias	Jain et al.(2011); Park et al.(2014); Cook et al.(2014).
<i>input03</i>	Número de Funcionários	Quantidade de funcionários envolvidas no processo produtivo.	Pessoas	Chandra et al.(1998); Keh e Chu (2003); Düzakin e Düzakin (2007); Wu et al.(2017).
<i>input04</i>	Número de Reclamações	Quantidade de produtos reclamados pelos clientes.	Peças	Nanci et al.(2004).
<i>input05</i>	WIP	Quantidade de produtos em processamento.	Peças	Keh e Chu (2003); Jain et al.(2011).
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	Quantidade percentual de produtos entregues no prazo.	Percentual	Keh e Chu (2003).
<i>output02</i>	Produto Acabado	Número total de produtos produzidos.	Peças	Jain et al.(2011); Park et al.(2014); Cook et al.(2014); Nanci et al.(2004).
<i>output03</i>	Refugo	Quantidade de produtos descartados durante a produção ( <i>scrap</i> ).	Peças	Jain et al.(2011); Wu et al.(2017).

Fonte: Elaborado pelo autor

Posteriormente a escolha das variáveis a serem utilizadas na análise, a próxima etapa é a definição do modelo DEA a ser empregada e a orientação final do modelo *input* ou *output*.

### 3.3.5 Definição do modelo DEA (CRS/VRS)

A literatura sobre DEA aponta dois modelos que são usados na aplicação da técnica. O primeiro é o CRS (*Constant Returns to Scale*), apresentado por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) que propõem uma abordagem orientada a entradas (*inputs*), recomendado quando o objetivo é comparar unidades de tomada de decisão (DMU) de variáveis com amplitudes similares. O segundo é o VRS (*Variable Returns to Scale*) apresentado por Charnes e Cooper (1984), em que uma DMU não pode ser comparada com todas as DMUs de um determinado setor, mas com as DMUs que operem em uma escala semelhante a sua, recomendado quando o objeto é comparar DMUs de variáveis com amplitudes diferentes.

O modelo utilizado neste trabalho é o CRS, visto que é efetuada uma análise comparativa interna na empresa em estudo. Desta forma, a amplitude e escala das variáveis escolhidas são similares entre as DMUs, indicando a utilização do modelo CRS. Sendo assim, utiliza-se o modelo CRS para avaliar a implantação do TPC na eficiência técnica produtiva.

### 3.3.6 Definição da orientação do modelo DEA (*input* ou *output*)

O modelo DEA apresenta duas possibilidades de orientação: entrada (*input*) ou saída (*output*). Se o objetivo é manter o nível de consumo de recursos (por exemplo, matérias-primas) e maximizar as saídas (por exemplo, o volume de produção de um determinado item), o modelo deve ser orientado à saída (*output*). Em contrapartida, se o objetivo for manter as saídas constantes e verificar melhor aproveitamento dos insumos utilizados no processo produtivo, o modelo deve ser orientado à entrada (*input*). Nesse segundo caso (*input*), os resultados DEA retornam ao pesquisador e tomador de decisão o montante que poderia ser produzido com a mesma quantidade de insumos utilizados (ZHU, 2014).

A presente pesquisa é orientada a *input*. A razão para esta escolha deve-se ao objetivo em comparar o aproveitamento dos insumos pelas DMUs, e por consequência a eficiência, no decorrer do período de análise pré e pós a implantação do TPC. Para opinar e validar a utilização desta orientação, os especialistas da empresa foram consultados.

### 3.3.7 Classificação geral do modelo DEA

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é baseada em modelos matemáticos não paramétricos, ou seja, não utiliza referências estatísticas ou medidas de tendência central. As relações funcionais entre os insumos e produtos não são necessárias na DEA e também não se restringe a medidas únicas, singulares dos insumos e produtos (FERREIRA; GOMES, 2009).

Para desenvolver o projeto do modelo DEA são consideradas características para sua elaboração, sendo necessário definir estas características antes de iniciar a fase de coleta e análise dos dados. As características propostas para o modelo DEA desenvolvido neste estudo e as descrições são sintetizados no Quadro 14.

Quadro 14 - Visão geral do modelo DEA

<b>Pressupostos</b>	<b>Descrição</b>
Definição dos produtos a serem analisados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definido três linhas de produtos: computadores, <i>displays</i> e eletrônicos.</li> <li>• Desconsiderados produtos de engenharia e protótipos.</li> </ul>
Definição do período de análise	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definido o período inicial de análise como julho de 2014 e o período final como junho de 2018.</li> </ul>
Definição das unidades de tomada de decisão (DMUs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerado a produção mensal que uma determinada linha de produto produziu.</li> <li>• A análise do processo produtivo contempla 144 DMUs.</li> </ul>
Definição das variáveis do modelo DEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apresenta potenciais variáveis informadas pelos especialistas no processo.</li> <li>• Analisada a literatura, considerando trabalhos sobre TPC em pesquisas que empregam o DEA.</li> </ul>
Definição do modelo DEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O modelo utilizado neste trabalho é o CRS.</li> <li>• É efetuada uma análise comparativa interna na empresa em estudo.</li> </ul>
Definição da orientação do modelo DEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A orientação utilizada neste trabalho é <i>input</i>.</li> <li>• Comparar a eficiência das DMUS no decorrer do período de análise pré e pós a implantação do TPC.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

Após apresentação do modelo DEA, na próxima seção são discutidos os procedimentos de coleta e análise dos dados.

### 3.4 COLETA DOS DADOS

A etapa de coleta dos dados é fundamental para garantir a operacionalização dos métodos de pesquisa e do método de trabalho definido pelo pesquisador (DRESCH et al., 2015). Para cumprimento desta etapa foi realizado um contato inicial com o diretor industrial para autorizar a condução da coleta de dados da pesquisa e sugerir quais os especialistas ou respondentes principais que devem ser entrevistados. A importância de contatar um executivo sênior é reforçada por Cauchick et al. (2012) para “abrir portas”, a fim de permitir o acesso aos dados e resolver impasses, caso ocorram. Assim, o planejamento foi realizado por meio de uma reunião com os especialistas no processo, com objetivo de definir: a) as fontes de coletas de dados; b) o período de coleta dos dados, e; c) as formas de mascaramento dos dados para preservar as informações da empresa em estudo.

A técnica de coleta de dados documental costuma ser o primeiro passo para operacionalizar uma pesquisa, pois permite coletar informações prévias sobre tópicos que serão pesquisados. As fontes documentais são muito numerosas, uma vez que qualquer elemento portador de dados pode ser considerado como documento (DRESCH et al., 2015). São utilizados documentos de trabalho da empresa que de alguma forma estejam associados às operações industriais. Entre os documentos analisados, a quantidade de produtos entregues é essencial para estabelecer comparativos entre o período pré e pós implantação do TPC.

Após realizar o levantamento das informações para compor as variáveis do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA), inicia a análise e interpretação dos dados. Com base na pesquisa documental, que se vale principalmente de dados quantitativos, obtidos sob forma de registros, tabelas, gráficos ou banco de dados, o processo analítico envolve procedimentos estatísticos. Quanto aos documentos que se referem a textos, anotações de campo realizadas, comunicação não verbal, como gestos e posturas, o procedimento analítico mais utilizado é a análise de conteúdo (DRESCH et al., 2015). As técnicas, fontes de dados e informações coletadas utilizadas nesta pesquisa são apresentadas no Quadro 15.

Quadro 15 - Técnicas, fontes e informações

<b>Técnica</b>	<b>Fonte</b>	<b>Informações coletadas</b>
Documental	Sistema ERP utilizado pela Empresa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de produtos entregues;</li> <li>• Quantidade de ordens de produção;</li> <li>• <i>Lead time</i> dos produtos entregues.</li> </ul>
Documental	Documentos da Empresa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodologia utilizada para implantação TPC;</li> <li>• Assuntos abordados durante reuniões TPC;</li> <li>• Número de funcionários;</li> <li>• Cronograma de implantação TPC.</li> </ul>
Entrevistas	Especialistas da Empresa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auxiliar na definição das variáveis do modelo DEA;</li> <li>• Auxiliar na definição da orientação do modelo DEA;</li> <li>• Auxiliar na definição das DMUs;</li> <li>• Definir as fontes de coleta de dados;</li> <li>• Definir o período de coleta de dados;</li> <li>• Definir a forma de mascarar os dados.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

As técnicas de coletas de dados na forma de entrevistas e documental são comumente empregadas em pesquisas realizadas no campo da gestão, elas abrangem uma série de instrumentos utilizados pelos pesquisadores para conduzir as atividades precisas em suas investigações. A coleta pode ser realizada de diversas maneiras, variando de acordo com o objetivo da pesquisa e com o método de pesquisa utilizado (DRESCH et al., 2015).

Para as entrevistas, é importante o pesquisador desenvolver a capacidade de fazer questões adequadas aos objetivos do trabalho e interpretar as respostas; ser um bom ouvinte e não trazer nenhum tipo de preconceito; estar embasado teoricamente no tema; ser receptível e sensível a evidências contraditórias; ser adaptável e flexível à novas situações não previstas e vê-las como oportunidades e não como ameaças (YIN, 2001). As entrevistas foram realizadas em local e horário pré-definido. Quanto ao registro dos dados, existem várias formas de fazê-los. Para esta pesquisa, mediante autorização prévia do entrevistado, foi priorizada a utilização de um gravador digital de áudio para melhoria na precisão da análise posterior. O uso do gravador pode ser considerado como “intrusivo” por alguns entrevistados e inibir a vontade de expressar suas opiniões e caberá ao pesquisador demonstrar a relevância do seu uso (CAUCHICK et al., 2012). Outra forma de realizar os registros utilizada são as anotações de campo, onde o pesquisador toma notas dos registros no momento

em que ocorreram ou se não for possível tão logo quando possível para evitar a perda de informações importantes.

A coleta de dados deve ser dada como concluída quando se atingir a “saturação teórica”, ou seja, quando a coleta de dados adicionais não acrescenta nenhuma informação relevante e se considera que os dados são suficientes para a questão de pesquisa proposta (CAUCHICK et al., 2012).

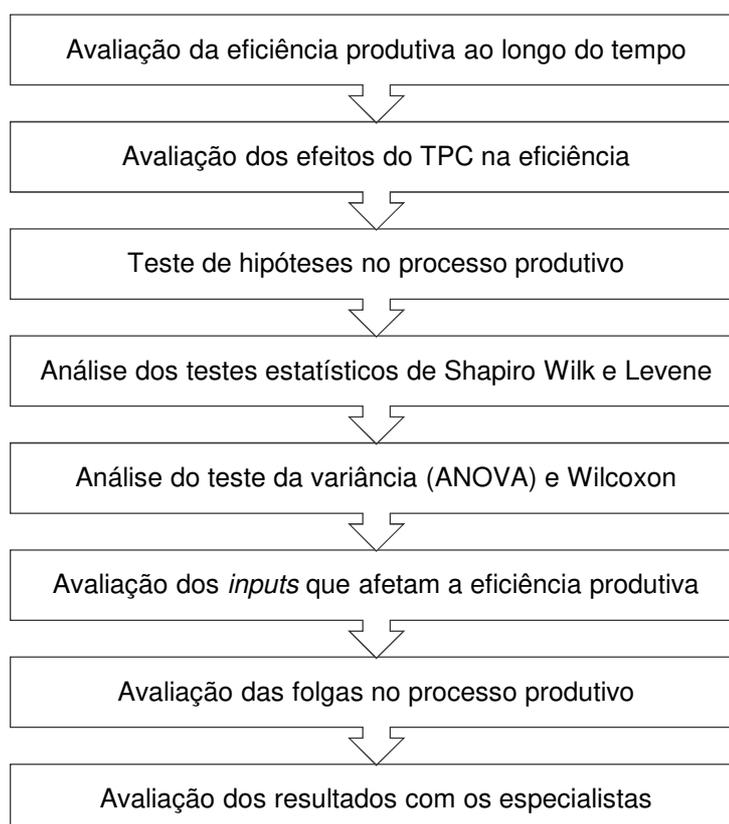
Inicialmente, foi realizada uma reunião com o diretor industrial para expor a proposta do projeto de pesquisa, o cronograma das atividades, autorizar a coleta dos dados e sugerir os especialistas que pudessem participar. Em seguida foi realizada uma reunião com os especialistas (apresentados no Quadro 11). Nesse encontro foi apresentada a proposta do projeto de pesquisa, o cronograma de trabalho, foram discutidas as orientações para a coleta de dados, o período de análise e a proposta a definição do modelo DEA apresentado na seção anterior.

Foram realizados mais dois encontros com os especialistas no processo para coletar os dados das variáveis *input* e *output* do processo analisado, a fim de desenvolver o modelo DEA. No primeiro encontro, o Analista do PCP informou ser possível extrair do sistema ERP as informações relativas as horas trabalhadas na produção, *Lead time*, cumprimento do prazo de entrega dos pedidos e número de itens produzidos. Ainda, um dos Engenheiros de manufatura afirmou que possui a estrutura (BOM - *Bill of Material*) de todos os produtos, sendo possível identificar o número de itens comprados e fabricados de cada produto das três linhas de produção analisadas. A coleta de dados na empresa ocorreu nos meses de julho, agosto e setembro de 2018, utilizando as técnicas propostas no Quadro 15.

### 3.5 ANÁLISE DOS DADOS

Após a coleta de dados, definido o período e produtos a serem analisados inicia a análise dos dados. Nesta etapa, foram realizadas as atividades da Figura 13.

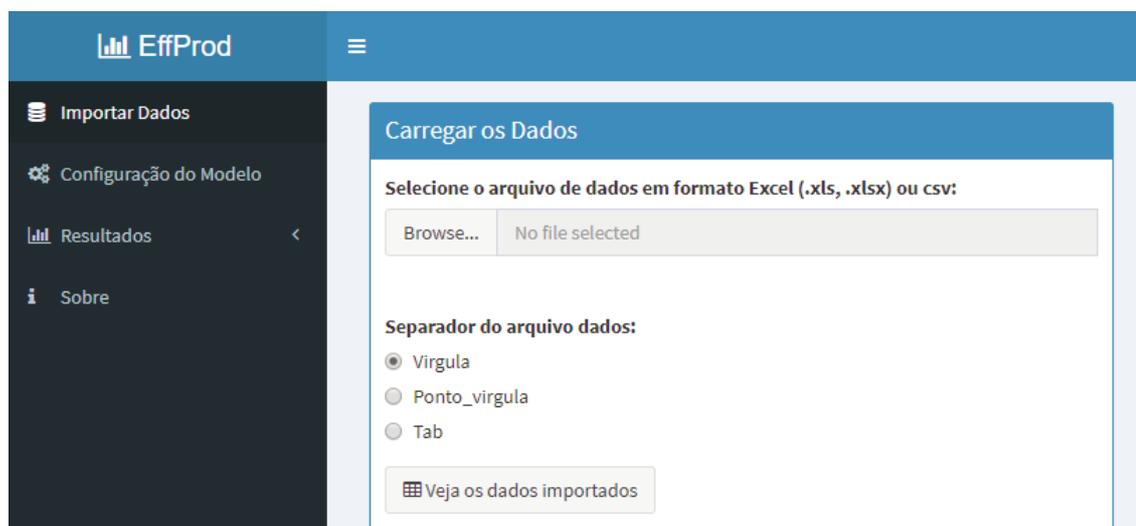
Figura 13 - Atividades de análise dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor

Para desenvolver a análise dos dados, cabe ao pesquisador categorizar, classificar em tabelas, testar ou recombinar as evidências quantitativas e qualitativas para tratar as proposições iniciais do estudo (YIN, 2001). Nesse sentido, após o levantamento dos dados, é iniciado o processo de avaliação. Os dados obtidos foram organizados em uma planilha eletrônica para calcular o desempenho de cada DMU. Nesta etapa seguiu-se as orientações descritas no livro “Análise e Gestão da Eficiência” (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018) e utilizou-se o *software* SAGEPE (Sistema para Análise e Gestão da Produtividade e Eficiência) disponível em <<http://www.sagepe.com.br>> e ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Interface SAGEPE



Fonte: SAGEPE (2017)

Na etapa de análise e interpretação dos dados do modelo DEA, as informações do *software* SAGEPE foram organizadas em planilhas eletrônicas. Inicialmente, é analisada a eficiência produtiva ao longo do tempo definido e para isso foi adotado os dados da eficiência composta para calcular os valores mínimos, máximo, média e desvio padrão. Essa análise demonstrou uma variação pós a implantação do TPC. A eficiência composta é um índice agregado, que corresponde à composição entre eficiência padrão e eficiência da fronteira invertida (SOUZA et al., 2018). A eficiência composta tem sido usada para análises no campo de gerenciamento de operações (BARBOSA et al., 2017; GILSA et al., 2017; PIRAN et al., 2016; SOUZA et al., 2018).

A escolha da eficiência composta deve-se por problema de discriminação quando realizado os testes com as demais eficiências. Além disso, para não perder a capacidade analítica, visto que não existem variáveis *input/output* necessárias, o processo *stepwise* (passo a passo) não foi utilizado. Este processo considera que variáveis podem ser excluídas até que o modelo apresente uma única entrada e uma única saída (WAGNER; SHIMSHAK, 2007).

Posteriormente, com o resultado do modelo DEA das três linhas de produtos as hipóteses a serem testadas para rejeitar ou aceitar estatisticamente as evidências dos efeitos da implantação do TPC são desenvolvidas. O Quadro 16 apresenta as hipóteses testadas.

Quadro 16 - Linha de produtos e hipóteses testadas

<b>Linha de produto</b>	<b>Hipótese testada</b>
Computadores	<b>H<sub>0</sub> (hipótese nula):</b> Não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.
	<b>H<sub>1</sub> (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.
<i>Displays</i>	<b>H<sub>0</sub> (hipótese nula):</b> Não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.
	<b>H<sub>1</sub> (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.
Eletrônicos	<b>H<sub>0</sub> (hipótese nula):</b> Não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.
	<b>H<sub>1</sub> (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.

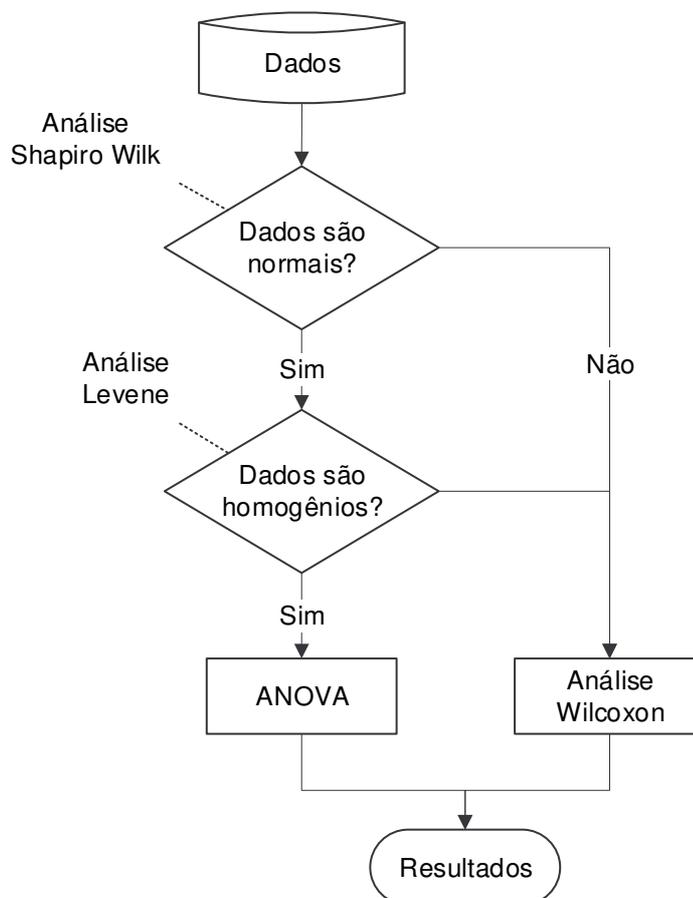
Fonte: Elaborado pelo autor

Após iniciou o processo de análises estatísticas. Nesta etapa foi utilizado o *software* estatístico Action Stat, um sistema estatístico desenvolvido pela Estatcamp. O Action Stat utiliza o R, a principal linguagem de programação estatística de uso mundial. Por meio de um sistema próprio, o R é conectado com o Microsoft Excel para aplicações estatísticas utilizando a interface do próprio Excel (PORTAL ACTION, 2018).

Inicialmente são aplicado os testes considerados pressupostos para utilização da ANOVA, como Shapiro Wilk e Levene, a fim de verificar se os dados obtidos são provenientes de uma distribuição normal e homogênea (HAIR et al., 2009), e do contrário é realizada a aplicação do teste não paramétrico Wilcoxon. Para identificar se existem diferenças significativas entre as médias dos períodos de análise é realizado o teste ANOVA. Este teste faz múltiplas comparações de grupos de tratamento, determinando se o conjunto inteiro de médias de amostras sugere que as amostras foram obtidas a partir da mesma população geral (HAIR et al., 2009).

O desenvolvimento dos testes estatísticos é suportado na revisão da literatura apresentada na seção 2.4 análises estatísticas deste trabalho e ilustrado no fluxograma da Figura 15.

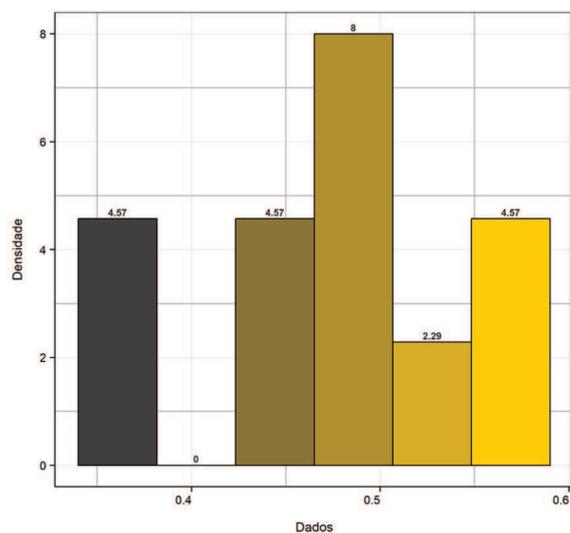
Figura 15 - Processo de análises estatísticas



Fonte: Elaborado pelo autor

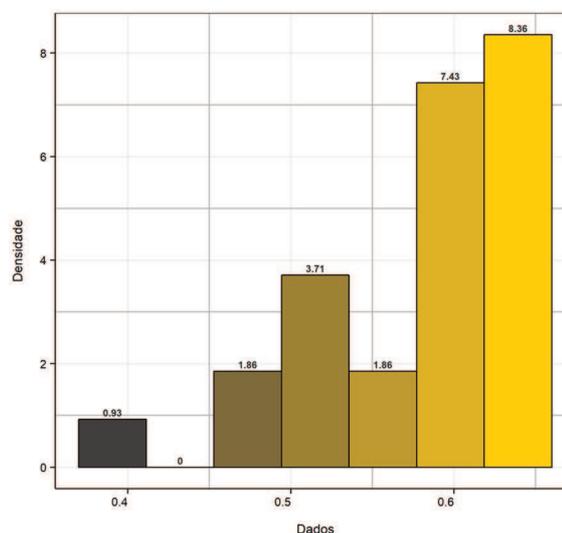
No desenvolvimento das análises estatísticas, foi identificado com a aplicação do teste de normalidade dos dados Shapiro Wilk que a eficiência das linhas de computadores e *displays* apresentaram dados que diferem de uma distribuição normal, ou seja, os dados não são normais (heterogêneos) com um nível de significância menor que 0,05 (5%). Deste modo, não se pode aceitar a hipótese de que os dados constituem uma distribuição normal, e para tal, buscou-se realizar uma análise gráfica da distribuição com um histograma. A Figura 16 e Figura 17 exibem os histogramas dos resultados da eficiência pré e pós TPC na linha de computadores.

Figura 16 - Histograma da eficiência pré TPC na linha de computadores



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 - Histograma da eficiência pós TPC na linha de computadores

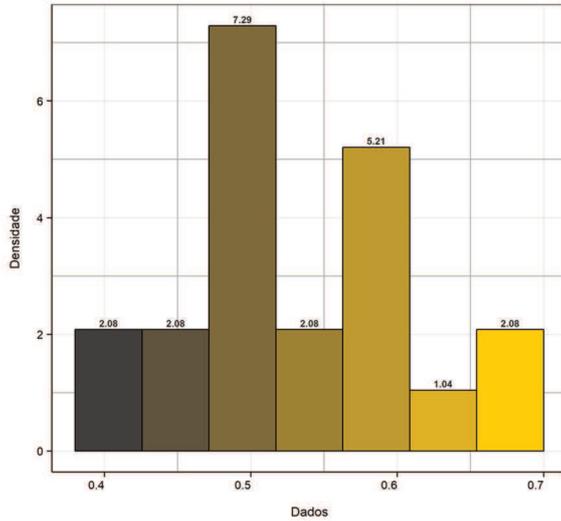


Fonte: Elaborado pelo autor

Com base na Figura 16, é possível identificar que a eficiência das DMUs no período antes da implantação do TPC estava concentrada no valor central, com uma média de 0,47, justificando a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro Wilk. Na Figura 17, no período pós implantação do TPC a eficiência média das DMUs apresentou valor médio de 0,57 e dados concentradas à direita do histograma. Assim, os dados são considerados heterogêneos e não é possível dar continuidade para aplicação do teste paramétrico ANOVA, uma vez que um dos critérios para escolha do teste estatístico não pôde ser atendido.

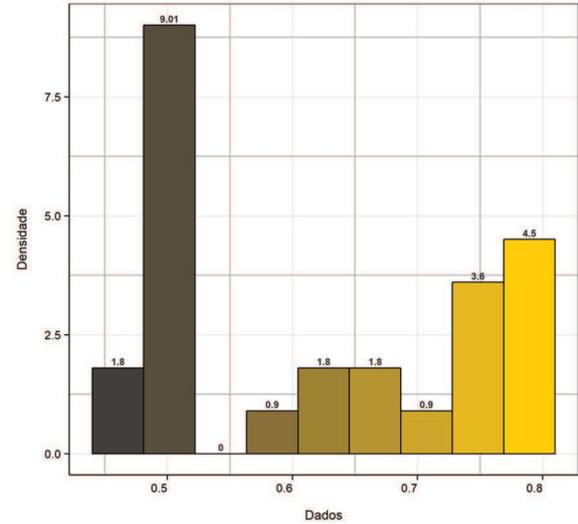
Resultados equivalentes e dados heterogêneos foram encontrados ao realizar o teste de Shapiro Wilk para verificar a normalidade na linha de *displays*. O histograma dos resultados da eficiência pré e pós TPC na linha de *displays* são apresentados na Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 - Histograma da eficiência pré TPC na linha de *displays*



Fonte: Elaborado pelo autor

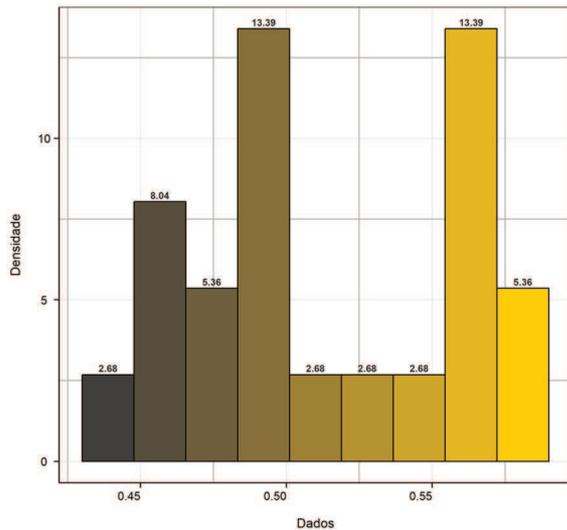
Figura 19 - Histograma da eficiência pós TPC na linha de *displays*



Fonte: Elaborado pelo autor

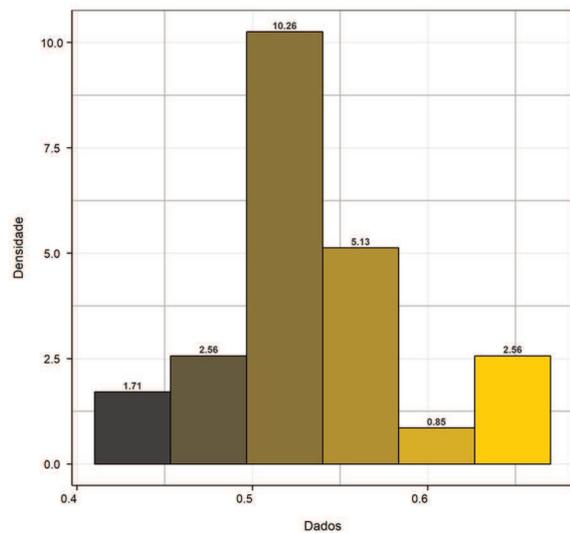
O histograma dos resultados da eficiência pré e pós TPC na linha de eletrônicos são apresentados na Figura 20 e Figura 21.

Figura 20 - Histograma da eficiência pré TPC na linha de eletrônicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 - Histograma da eficiência pós TPC na linha de eletrônicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Para realizar o teste estatístico na linha de computadores e *displays*, buscou-se um teste não paramétrico utilizado para situações com duas amostras dependentes pareadas. Contudo, devido a tamanhos de amostras diferentes no período pré e pós TPC a igualdade das proporções não é atendida,  $n_{1ij} \neq n_{2ij}$ . A estatística do teste para amostras dependentes trabalha com a quantidade de resultados iguais antes e depois,  $n_{1ij} = n_{2ij}$  (LANDIM, 2018). Sendo assim, utilizou-se o teste para amostras independentes dos postos sinalizados de Wilcoxon. Para a linha de eletrônicos o teste de Shapiro Wilk demonstrou normalidade e o teste de Levene homogeneidade dos dados, possibilitando assim, a realização do teste ANOVA.

Além dos dados de eficiência, o modelo DEA fornece também os resultados das folgas para cada variável analisada. As informações das folgas das três linhas de produtos são analisadas para compreender quais as variáveis *inputs* e *outputs* são mais afetadas pela implantação do TPC. A análise das folgas comparando o período pré e pós TPC também é realizada, com finalidade de identificar a relevância no processo analisado. Após aplicação dos testes estatísticos para as folgas somente são analisadas as que apresentaram resultados significativos.

Entre as últimas etapas propostas, a análise das variáveis que afetam a eficiência produtiva é conduzida, com objetivo de compreender as causas que levam a recorrência das variáveis no período analisado. Com base nas variáveis coletadas que afetam a eficiência e entrevistas com os especialistas no processo, as DMUs com melhores resultados são identificadas e servem de referência (*benchmarking*) para as demais. Por fim, após analisar os resultados foi realizada uma apresentação aos especialistas da empresa que participaram da etapa exploratória. Na próxima seção, são descritas as delimitações do trabalho.

### 3.6 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Com o objetivo de tornar claros e explícitos a abrangência e o escopo deste trabalho, nesta seção são apresentadas as delimitações da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliar os efeitos da implantação do Tambor-Pulmão-Corda (TPC) em uma indústria eletrônica do setor aeroespacial.

O trabalho avalia somente as mudanças relacionadas ao processo produtivo. Demais modificações, tais como mudanças de gestão, fatores externos da empresa, como fatores de mercado, não foram considerados na pesquisa. As mudanças gerenciais ou renovação do quadro funcional não foram consideradas, pois, a empresa não apresentou mudanças significativas de gestão no período proposto de análise, além de possuir baixa rotatividade de funcionários. Os fatores externos como, por exemplo, a demanda de mercado não foi considerada na análise.

Foi avaliada somente uma planta produtiva, não sendo possível a replicação dos resultados para as demais unidades industriais internacionais. Na matriz, a extensão desse trabalho não é possível devido às diferenças nos processos produtivos e restrições de informações. Destaca-se que o pesquisador visitou a matriz e pôde observar as diferenças do processo produtivo, causadas prioritariamente devido à família produtos desenvolvidos e produzidos. Descrever e analisar essas diferenças, no entanto, está fora do escopo deste trabalho. A análise foi realizada para as três linhas de produtos de série (computadores, *displays* e eletrônicos), sendo desconsiderado os produtos de engenharia e protótipos, uma vez que estes utilizam processos especiais ainda não estabelecidos ou em desenvolvimento.

Para mensuração da eficiência, foi considerada a técnica da Análise Envoltória de Dados (DEA), outras técnicas que também se propõem a medir a eficiência não são abordadas. Na análise dos resultados, o trabalho não pretende identificar as causas que impactam na ineficiência das linhas produtivas, mas avaliar o efeito da implantação do TPC em um sistema ETO.

Na próxima seção, é apresentada a empresa que as atividades desta pesquisa foram conduzidas. Além disso, para contextualizar o estudo de caso também são apresentados os principais produtos, seguido pelo processo produtivo e a caracterização do TPC

#### 4 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ANALISADA

A presente pesquisa é realizada em uma empresa fabricante de equipamentos eletrônicos do setor aeroespacial. Fundada em 1982, é subsidiária de um grupo empresarial internacional dedicado ao projeto, desenvolvimento, fabricação, suporte logístico e manutenção de equipamentos para aeronaves.

O grupo empresarial conta com mais de 15.000 funcionários e a subsidiária com aproximadamente 300 funcionários, possui ações negociáveis nas principais bolsas de valores do mundo, como na NASDAQ em Nova York, e apresentou faturamento anual em 2017 próximo a US\$ 3,4 bilhões e conta com US\$7,6 bilhões em pedidos firmes. A subsidiária brasileira apresentou faturamento anual em 2017 próximo a R\$ 24 milhões.

Entre os produtos desenvolvidos e produzidos pela empresa, destaca-se a categoria de equipamentos eletrônicos utilizados em aeronaves, tanto para fins civis quanto militares. Sua aplicação inclui sistemas de comunicação, navegação, monitoramento e controle das demais funções, tanto eletrônicas quanto mecânicas de aeronaves. O setor de aplicações aeronáuticas possui requisitos específicos quanto à utilização de materiais e componentes mecânicos e eletrônicos. Devido à essa característica, a empresa possui majoritariamente fornecedores internacionais. Além disso, é uma característica do setor de aplicações aeronáuticas a confidencialidade e sigilo das informações dos clientes, o que dificulta a obtenção de dados de outras empresas, inclusive dentro do mesmo grupo empresarial, para realização de *benchmarking* das boas práticas empresariais.

O principal mercado de atuação da subsidiária brasileira é nacional, no entanto a organização também exporta para países americanos, europeus e asiáticos. Foi reconhecida em 2018, no segmento de atuação, como uma das empresas que obtiveram o melhor resultado mercadológico e estratégia para expor e comercializar seus produtos no mercado internacional pelo Prêmio Exportação RS (ADVB/RS, 2018). A próxima seção apresenta a caracterização dos produtos e do processo produtivo.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS

Os produtos eletrônicos produzidos pela empresa são classificados como classe III e seguem padrões de montagem internacional definidos na IPC (*Association Connecting Electronics Industries*). Para melhor compreender a classificação de produtos eletrônicos, é apresentado no Quadro 17 as características e aplicações para cada classe de produto.

Quadro 17 - Classificação de produtos eletrônicos

Classe	Característica/Aplicação
I	Produtos para consumo, computadores e periféricos para aplicação onde as imperfeições não são importantes e o principal requisito é o funcionamento de todo o conjunto eletrônico.
II	Produtos de comunicação, máquinas sofisticadas para negócios e instrumentos onde o alto desempenho e vida útil prolongada são requeridas para o serviço contínuo, porém não é fator crítico e algumas imperfeições são permitidas.
III	Produtos médicos de suporte à vida ou sistemas de controle de voos, onde o desempenho sob demanda é crítico. A paralisação dos produtos não pode ser tolerada e devem funcionar sempre que requerido. Os produtos desta classe são adequados para aplicações com altos níveis de confiabilidade, o serviço é essencial ou o ambiente de uso final seja extremamente severo.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IPC (2018)

A empresa é referência em projeto e desenvolvimento de produtos eletrônicos e teve sua atuação consolidada ao se tornar uma das principais fornecedoras dos aviões A-29 Super Tucano, F-5M, A-1M e C/P-95M Bandeirante para a Força Aérea Brasileira (FAB) e do AF-1 para a Marinha do Brasil. Com relevante participação nos principais projetos estratégicos da indústria aeroespacial brasileira, fornece equipamentos eletrônicos para o avião de treinamento T-27 Tucano e o caça subsônico AMX da FAB. A empresa fornece avançados sistemas eletrônicos para o programa Embraer KC-390 e SAAB Gripen NG da FAB.

A aeronave Super Tucano A-29, ilustrada na Figura 22, projetada e produzida pela Embraer é um dos projetos relevantes que a empresa mantém com clientes brasileiros. É uma aeronave turboélice para missões de ataque leve e treinamento de pilotos reconhecida por incorporar eletrônica e armamentos avançados disponíveis anteriormente apenas em aeronaves maiores, com propulsão a jato. A empresa desenvolveu e fabricou os *displays*, computadores e eletrônicos utilizados no *cockpit*

da aeronave, ilustrado à direita na Figura 22. Os equipamentos fabricados são utilizados em mais de 250 aeronaves e operados por 18 países entre os principais estão: Brasil, Equador, Chile, Colômbia e Estados Unidos.

Figura 22 - Aeronave Embraer Super Tucano A-29



Fonte: A Empresa

Entre os projetos mais recentes está o *cockpit* do novo caça da FAB, o SAAB Gripen NG, que dispõe de um display panorâmico WAD (*Wide area display*), ilustrado na Figura 23. Este produto otimiza a apresentação de simbologias/imagens de alta resolução e permite a operação pelo manche/manete e/ou diretamente na tela (*touchscreen*). Além disto, o desenvolvimento das aplicações específicas de *software* possibilita projetar, e assim, ampliar a capacidade da aeronave, simplificar o processo decisório do piloto e tornar a operação da aeronave mais eficiente.

A tecnologia empregada no desenvolvimento e produção deste produto, destaca a empresa no âmbito internacional, sendo este produto um dos mais avançados do segmento. Em 2018 a empresa foi selecionada para equipar o *cockpit* dos novos caças Gripen E, da empresa sueca SAAB, e tornou-se parte da cadeia de produção global. Assim, todos os pedidos futuros do caça serão equipados com o produto desenvolvido e fabricado no Brasil.

Figura 23 - Display panorâmico WAD



Fonte: A Empresa

A empresa é uma das fornecedoras da aeronave KC-390, ilustrada na Figura 24. A aeronave KC-390 é projetada para transporte tático e reabastecimento em voo desenvolvido e fabricado pela Embraer. O KC-390 estabelece um novo padrão para o transporte militar médio, visando atender aos requisitos operacionais da Força Aérea Brasileira, em substituição ao C-130 Hercules. Cabe destacar que consiste no maior avião produzido na América Latina.

Figura 24 - Aeronave KC-390



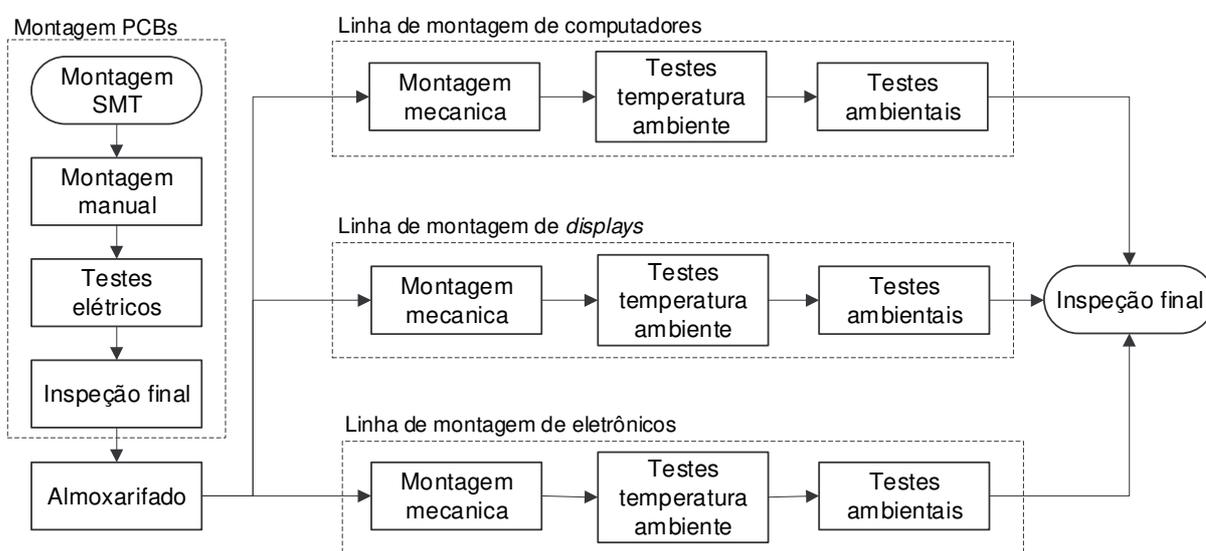
Fonte: A Empresa

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

Os insumos utilizados no processo produtivo são compostos primariamente de componentes eletrônicos, armazenados em ambientes com temperatura e umidade relativa do ar (UR) controladas na faixa de 15 a 25°C e 40 a 60%, sendo que existem componentes, como placas de circuito impresso (PCB), que exigem limites de UR máxima de 5%.

O processo de montagem eletrônica é dividido em montagem de PCBs (Placas de circuito impresso) e montagem de produtos finais. O processo de montagem de PCBs inicia com a montagem SMT (*Surface Mount Technology*) e segue para montagem manual, testes elétricos, inspeção final e, por fim, armazenamento. Posteriormente, as PCBs necessárias para montagem de um produto final são separadas em *kits* e entregues para as linhas de montagem mecânica de computadores, *displays* e eletrônicos, seguido pelos os testes em temperatura ambiente, testes ambientais e, finalmente, a inspeção final. O processo produtivo da empresa é ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Processo de montagem eletrônica

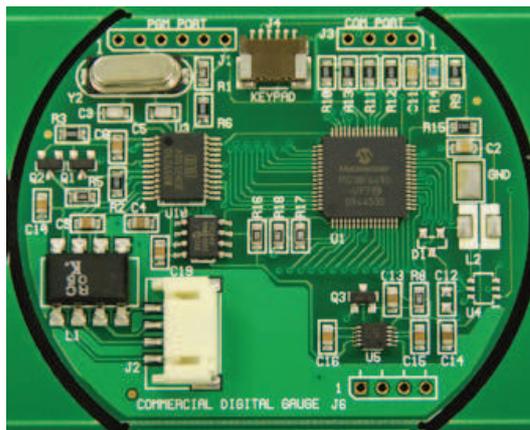


Fonte: Elaborado pelo autor

O processo denominado Montagem SMT, também conhecido como tecnologia de montagem de superfície, consiste no posicionamento de componentes SMD (*Surface mount devices*) sobre PCBs e soldagem em fornos de refusão. Este processo é automatizado e geralmente segue um fluxo que inicia com a aplicação da pasta de

solda na PCB na máquina *printer paste* e segue para o posicionamento dos componentes SMD na máquina *pick and place*. Por fim, a PCB passa pelo forno de refusão a temperaturas próximas de 240°C, para refundir a pasta de solda aplicada na primeira etapa e formar a ligação intermetálica com os componentes SMD. A Figura 26 ilustra componentes SMD após montados em uma PCB.

Figura 26 - Componentes SMD montados em PCB



Fonte: Accutron (2014)

Posteriormente, na montagem manual são soldados os componentes que não puderam ser posicionados na etapa anterior devido a restrições de tamanho e/ou tecnologia empregada, como conectores, fios, componentes PTH (*Pin Through Hole*), entre outros. No setor de testes elétricos, 100% das PCBs são ligadas em equipamentos que verificam se os componentes montados nas etapas anteriores estão conforme as especificações técnicas e, por fim, são inspecionadas.

Após o processo de montagem das PCBs, é iniciada a etapa de montagem mecânica, que consiste na integração das PCBs a partes mecânicas, com propósito de montar um produto eletrônico conforme pedido do cliente. Assim, os produtos são divididos em três linhas de produção. Para assegurar a qualidade, 100% dos produtos são submetidos a testes em temperatura ambiente e testes ambientais, que simulam o funcionamento em situações reais de uso, e demandam continuidade das comunicações mesmo com variações de temperatura entre -40°C e 140°C, assim como vibrações. Os testes ambientais objetivam eliminar as falhas prematuras (mortalidade infantil) e evitar a ocorrência de falhas no cliente. Finalmente é efetuada a inspeção final dos produtos e verificado o cumprimento de todas as etapas produtivas.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO TPC NA EMPRESA

A empresa em estudo desenvolve e fabrica equipamentos eletrônicos desde a década de 1980. Com o crescente desenvolvimento tecnológico evidenciado nas últimas décadas, a empresa identificou a necessidade de projetar produtos que competem com os principais fornecedores internacionais. Além disso, a cobrança para adquirir a matéria prima, produzir e entregar os pedidos no prazo exigido pelos clientes cresceu. Para contextualizar o Tambor-Pulmão-Corda (TPC) na empresa em estudo, a seguir são expostas características sobre como a produção na empresa funcionava antes da implantação do TPC, como a implantação foi realizada, quais os ganhos e dificuldades identificadas e quais os próximos passos esperados.

Em projetos anteriores, após a assinatura dos contratos de desenvolvimento dos produtos, o departamento de engenharia possuía um período para concepção do produto e produção dos protótipos conforme os requisitos informados pelos clientes. Quando concluídas, as etapas de qualificação dos produtos e aceite por parte do cliente eram iniciadas as etapas produtivas. O setor de planejamento e controle da produção (PCP), responsável pela análise da demanda dos pedidos e programação da produção, utilizava o sistema ERP para realizar o planejamento mestre de produção. Como resultado, a análise de materiais e recursos gerava ordens de compra, ordens de produção e reuniões para definição das prioridades de produção. Este método de trabalho foi o predominante por mais de 30 anos no departamento de operações da empresa.

No ano de 2011, a empresa iniciou a montagem das placas de circuito impresso (PCB) complexas na planta industrial em estudo, que até então eram adquiridas prontas ou semiacabadas de outras empresas do grupo empresarial. Em um período de seis meses, a quantidade de novos itens produzidos, *part numbers*, aumentou e novos processos produtivos foram incluídos na manufatura dos produtos. Além disso, no mesmo período, a empresa assinou contratos para desenvolvimento de novos produtos considerados muito importantes pela alta direção. No período de 2011 a 2014, o número de funcionários cresceu aproximadamente 25% e a área produtiva triplicou.

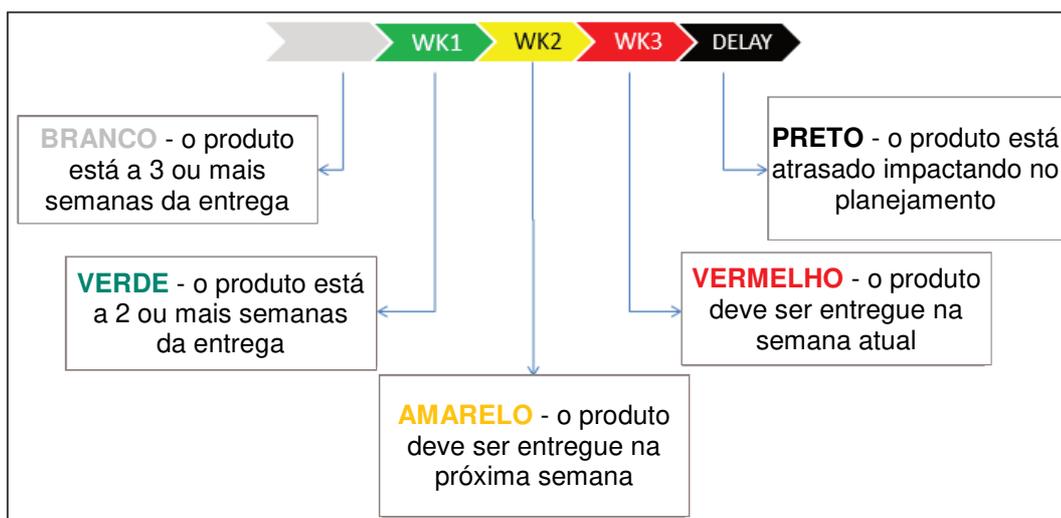
Posteriormente aos investimentos em infraestrutura e recursos produtivos, a empresa identificou que o método atual de priorização da produção apontava algumas dificuldades. O *mix* de produtos exigiu do setor de PCP uma programação dos

recursos produtivos, devido à alta variabilidade dos *part number* e reduzido volume. O controle era realizado no ERP e em planilhas eletrônicas, sendo os resultados analisados em conjunto com os supervisores de produção para definição das prioridades. Depois de aberta a ordem de produção, o material era separado pelo almoxarifado e entregue para a primeira etapa do processo, então o produto seguia as etapas em um fluxo empurrado e a priorização era dada pelo setor de PCP. A comunicação entre as áreas era falha e as prioridades alteravam conforme os supervisores, mesmo contra orientação do PCP. Devido à inclusão de novos processos de manufatura, o tempo de atravessamento (*Lead time*) aumentou e, conseqüentemente, os estoques intermediários também.

Após um período de dificuldades e resultados operacionais diferentes do planejado nos orçamentos dos projetos, a área de operações identificou a necessidade de analisar o atual método de priorização da produção e propor uma alternativa. A ideia de implementar o TPC na empresa surgiu em novembro de 2015 com um gerente de produção que havia sido transferido da matriz para a planta industrial em estudo. Para desenvolver o estudo foi criado um grupo de trabalho multidisciplinar, o qual possuía como líder de projeto o coordenador de produção e contava com a colaboração de um engenheiro de manufatura, um analista do PCP, um supervisor de produção e um analista de testes. Este grupo de cinco funcionários iniciou o aprofundamento no assunto com base em leituras e discussões teóricas sobre a priorização da produção proposta pelo TPC.

A implantação do TPC iniciou em janeiro de 2016, com a parametrização do sistema ERP, criação de relatórios e treinamentos teóricos para todos os envolvidos no processo produtivo, sobretudo para os montadores e técnicos responsáveis pelos testes dos produtos. Nos treinamentos, os conceitos do TPC para o planejamento e programação baseado na Teoria das Restrições (TOC) eram expostos e, em especial, eram abordados exemplos de como identificar e direcionar o foco da produção para os itens críticos que influenciam na entrega do produto. Para priorizar as ordens de produção foi adotado um diagrama de cores exibido na Figura 27.

Figura 27 - Diagrama de cores TPC



Fonte: A Empresa

Semanalmente, segunda-feira, às 7 horas, o sistema ERP envia um relatório via e-mail para os supervisores de produção, coordenadores e gerentes produtivos. Neste relatório as ordens de produção são classificadas conforme o diagrama de cores exibido na Figura 27, sendo em branco quando o produto está a três ou mais semanas (WK - *week* em inglês) da entrega, verde quando está a duas ou mais semanas da entrega, amarelo quando a uma semana da entrega, vermelho quando deve ser entregue na semana corrente e preto quando está atrasado e impacta na data planejada de entrega do produto. Um exemplo do relatório semanal é apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Relatório semanal TPC

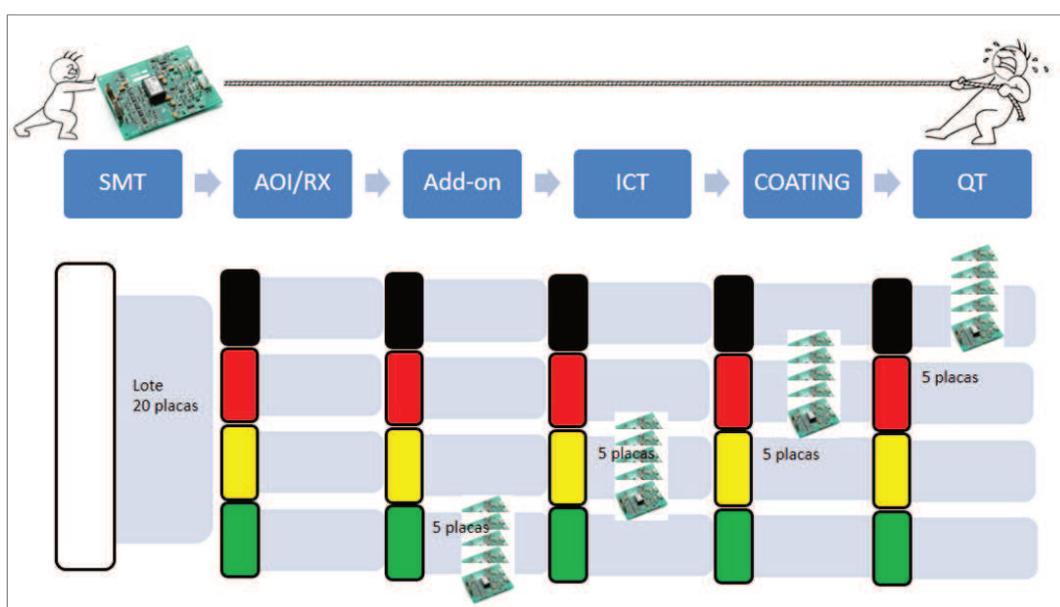
OP	WO	Data Planejada (MR)	MR Desc	Item Description	MR Item Group	Qty Receivables	Qty Total da OP	MR	MR Desc	MR Desc	MR Desc
30000795	22	27/05/16	0273239-02	PWA LCD BL 507	PW	2	8	MR1114-09	OPD LEFT ASSY	D-1010004150	
30000952	22	27/05/16	458774-02	PWA IOC1-2	PW	2	20	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000978	22	27/05/16	0477944-00	PWA DISPLAY GEN	PW	1	16	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000935	22	27/05/16	477228-01	PWA MOTHER BO	PW	1	11	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000791	24	10/05/16	425758-04	PWA-C2A-DCEC	PW	2	50	MR4150-00	LCU TOP ASSY	D-1020003110	
30000713	24	10/05/16	334994-02	RQD FLEX ASSY	PW	1	-2	MR4150-00	LCU TOP ASSY	D-1020003110	
30000713	24	10/05/16	334994-02	RQD FLEX ASSY	PW	1	-2	MR4150-00	LCU TOP ASSY	D-1020003110	
30000771	24	10/05/16	347368-06	PWA-1.5A-DCEC	PW	1	16	MR4150-00	LCU TOP ASSY	D-1020003110	
30000948	22	17/05/16	496624-05	PWA-OC3 BASE	PW	1	4	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000948	22	17/05/16	473707-00	PWA-HUD-NECO	PW	1	7	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000910	22	16/05/16	491010-01	PWA-CONNECTO	PW	2	24	401110-01	PWA-CORNER CTG	4F900007150	
30000910	22	16/05/16	420758-04	PWA-C2A-DCEC	PW	2	50	420758-04	PWA-C2A-DCEC	4F900007150	
30000940	22	16/05/16	781187-05	PWA-DMC	PW	2	20	781187-05	PWA-DMC	4F900007150	
30000973	25	24/05/16	02003A-01	PWA-FILTER	PW	1	8	MR0900-00	OPD LEFT ASSY	D-10200024150	
30000973	25	24/05/16	02003A-01	PWA-FILTER	PW	1	8	MR0900-00	OPD LEFT ASSY	D-10200024150	
30000938	25	24/05/16	026745F-02	PWA-DRCAS(LF)	PW	1	5	MR0900-00	OPD LEFT ASSY	D-10200024150	
30000938	25	24/05/16	026745F-02	PWA-DRCAS(LF)	PW	1	5	MR0900-00	OPD LEFT ASSY	D-10200024150	
30000982	25	24/05/16	023094A-00	PWA-FLEX 180(F)	PW	1	11	MR0900-00	OPD LEFT ASSY	D-10200024150	
30000982	25	24/05/16	023094A-00	PWA-FLEX 180(F)	PW	1	11	MR0900-00	OPD LEFT ASSY	D-10200024150	
30000951	25	24/05/16	043098-02	PWA-MOTHER BO	PW	1	11	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000980	25	24/05/16	439769-01	PWA-RO-2	PW	1	10	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	
30000938	25	24/05/16	042029-00	PWA-SIBR	PW	2	25	MR0229-04	TOP ASSY MDP	D-1010004150	

Fonte: A Empresa

Os relatórios semanais substituíram a utilização de planilhas eletrônicas e facilitou o acesso a informação. Posteriormente o relatório passou a ser exibido em TVs disponíveis nos setores produtivos, exibindo as ordens de produção em aberto. A utilização do diagrama de cores facilitou a comunicação interna, uma vez que todos os responsáveis possuíam a mesma orientação de quais ordens de produção deviam ser priorizadas. Além disso, o controle de horas extras passou a ser maior, não sendo permitidas horas extras para trabalhar em ordens de produção classificadas como branco ou verde.

A utilização do TPC como ferramenta de priorização auxilia no gerenciamento da alocação dos recursos para as operações que limitam o fluxo produtivo. Caso existam muitas ordens de produção em vermelho ou preto, aguardando processamento em uma determinada etapa produtiva, o supervisor desta área possui autonomia para solicitar alocação temporária de funcionários de outros setores para atender no menor tempo possível às ordens de produção prioritárias. A alocação dos recursos é um dos pontos chave do TPC na empresa, pois a manufatura de produtos desenvolvidos sob encomenda leva aos processos produtivos a necessidade de lidar com o sequenciamento de produtos com diferentes tempos de processamento, utilização de recursos e tempos de atravessamento. A distribuição de um lote de vinte PCBs é exemplificada na Figura 29.

Figura 29 - Alocação de recursos TPC



Fonte: A Empresa

A Figura 29 apresenta uma situação hipotética de produção de um lote em cinco etapas do processo produtivo (SMT, AOI/RX, *Add-on*, ICT, *Coating* e QT). É possível identificar que as PCBs estão divididas em quatro lotes de cinco PCBs cada, separadas pela cor conforme a priorização. Deste modo, é possível identificar que o primeiro lote que deve ser trabalhado é o que está localizado na etapa QT (*quality trustee*), pois a classificação da cor da ordem de produção é preta e está comprometendo a data planejada de entrega do produto. Caso a etapa QT não consiga processar o lote imediatamente devido à ocupação em outras PCBs classificadas na cor preto e/ou não possuir recursos suficientes, o supervisor desta etapa pode solicitar alocação temporária de funcionários dos outros setores e/ou hora extra. O segundo lote a ser processado é o vermelho, localizado na etapa *Coating* seguido do amarelo no ICT e verde no *Add-on*.

Além do TPC ser reconhecido pelos gestores de operações da empresa pela priorização das ordens de produção, também auxilia na melhoria contínua dos processos produtivos quando um recurso está limitando as entregas. Os funcionários são incentivados e bonificados pelos gestores ao proporem ideias para melhorar a eficiência da rotina diária, indicando um ciclo de melhoria contínua. Espera-se que o TPC possa continuar adaptando-se às novas tecnologias do setor de eletrônicos e produção de equipamentos desenvolvidos conforme os requisitos específicos de diferentes clientes.

Após apresentar a empresa, os produtos, o processo produtivo e as características do TPC, na próxima seção são apresentados os resultados da eficiência produtiva das três linhas pesquisadas com base no modelo DEA. Além disso, é realizada uma análise estatística dos resultados e discutidos os efeitos das folgas existentes.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da eficiência produtiva e uma discussão referente às folgas e alvos de cada DMU. Nesta seção ainda é efetuada uma análise comparativa entre o comportamento das eficiências pré e pós a implantação do Tambor-Pulmão-Corda (TPC). Posteriormente, é efetuada uma quantificação dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência em cada linha de produtos. Finalmente é apresentada a avaliação dos especialistas da empresa sobre a implantação do TPC e os efeitos na eficiência.

### 5.1 AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS

A análise das eficiências das três linhas de produtos da empresa foi segregada entre computadores (seção 5.1.1), *displays* (seção 5.1.2) e eletrônicos (seção 5.1.3). Nesse sentido, na próxima seção são discutidos os resultados referentes ao comportamento da eficiência da linha de produtos do tipo computadores.

#### 5.1.1 Análise da eficiência da linha de computadores

No ANEXO II estão relacionados, em ordem cronológica, os 48 meses que representam o período de produção de quatro anos consecutivos (julho de 2014 a junho de 2018) e sumarizados na Tabela 3. Nesse sentido, apresentam-se os escores de eficiência referentes aos cálculos da eficiência padrão, eficiência invertida, eficiência composta e eficiência composta normalizada efetuado na Análise Envoltória de Dados (DEA). Os cálculos foram utilizados para verificar o desempenho com relação à eficiência de cada DMU, e os escores de eficiência composta são utilizados para as análises.

Tabela 3 - Resumo eficiência da linha de computadores

	<b>Pré</b>	<b>Durante</b>	<b>Pós</b>
Mínimo	0,34	0,34	0,37
Máximo	0,59	0,60	0,66
Média	0,47	0,48	0,58
Desvio padrão	0,08	0,08	0,07

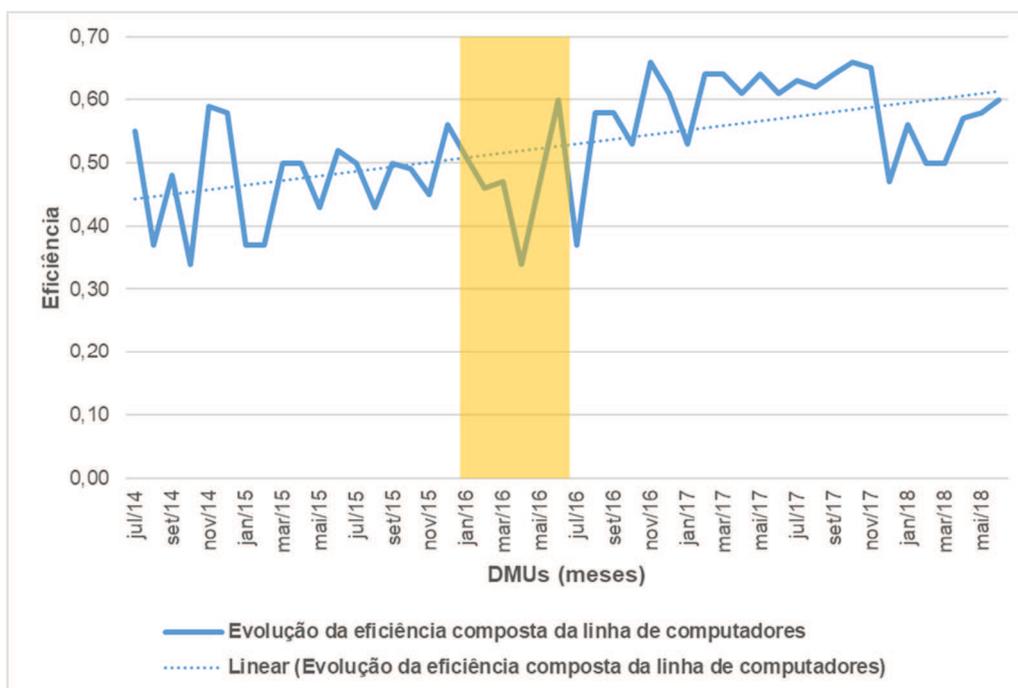
Fonte: Dados da pesquisa

No ANEXO II e Tabela 3, as DMUs estão segregadas em três períodos: anterior à implantação do TPC (DMU 1 até DMU 18), de transição (DMU 19 até DMU 24) e posterior à implantação do TPC (DMU 25 até DMU 48).

Nesse sentido, observa-se que o melhor desempenho da eficiência é atribuído às DMUs 29 (nov/2016), 40 (out/2017), 41 (nov/2018), 32 (fev/2017), 33 (mar/2017), 35 (mai/2017), 39 (set/2017), 37 (jul/2017) e 38 (ago/2017). Destaca-se que as DMUs com melhor desempenho em toda a série analisada concentram 8 meses do ano de 2017 e estão localizadas na área verde do ANEXO II, no período posterior à implantação do TPC. As DMUs 4 (out/2014) e 22 (abr/2016) apresentaram os piores resultados de desempenho em toda a série temporal, sendo a DMU 4 anterior à implantação do TPC (área cinza da Tabela 3) e DMU 22 no período de transição (área amarela da Tabela 3).

Para facilitar a compreensão dos dados referente à eficiência composta (apresentados no ANEXO II), procurou-se ilustrar a evolução da eficiência composta da linha de computadores. Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores ao longo da série temporal. O período de transição da implantação do TPC é ilustrado pela área amarela do Gráfico 7 (jan/2016 até jun/2016).

Gráfico 7 - Evolução da eficiência composta da linha de computadores



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar o Gráfico 7, é possível visualizar um aumento da eficiência da linha de computadores no período posterior à implantação do TPC (pós jul/2016), visto que a linha de tendência linear (pontilhado no Gráfico 7) mostra a evolução no período de análise. Pode-se perceber que no primeiro mês pós transição da implantação do TPC (jul/2016) o escore de eficiência está entre um dos menores registrados, o que evidencia a fase de adaptação do sistema produtivo ao TPC. Contudo, nos meses posteriores os dados indicam que a implantação do TPC pode ter incrementado a eficiência produtiva.

As DMUs consideradas eficientes na DEA servem de referência (*benchmarking* interno) para as ineficientes e possibilitam comparar e avaliar a proximidade em relação a DMU referência (*benchmarking*), ou seja, se a DMU em análise está na fronteira eficiente. Nesse sentido, o cálculo DEA permite a avaliação dos alvos, apresentando o consumo necessário de recursos *inputs* que as DMUs ineficientes deveriam consumir para obter desempenho equivalente às DMUs eficientes. Nesse sentido, a Tabela 4 apresenta os valores das folgas dos recursos *inputs* e *outputs* da linha de computadores.

Para discutir as folgas utiliza-se como exemplo a DMU1, que corresponde ao primeiro mês da coleta de dados (jul/2014). Na DMU1 a variável Tempo de Produção (*input01*) apresenta uma folga de 101,46 horas, o que representa uma variação no tempo utilizado na manufatura dos produtos entregues no mês em análise. Assim como na DMU1, existem outras DMUs (DMU2, DMU4, DMU7 e DMU8) com valores expressivos de tempos de produção, o que indica um custo de produção elevado no período anterior à implantação do TPC.

Possuir um tempo de produção elevado pode estar associado ao tempo de atravessamento, apresentado na Tabela 4 pela variável *Lead time* (*input02*). A variável *Lead time* demonstra resultados de folga elevados nas primeiras DMUs (área cinza na Tabela 4), e pode-se concluir que após emitida as ordens de produção, o tempo que os produtos permaneciam no processo era elevado. Além disso, verifica-se que no período anterior à implantação do TPC o setor de planejamento e controle da produção (PCP) emitia ordens de produção com datas planejadas de entrega distantes, considerando as ineficiências e variabilidades do processo, adicionando uma margem para as datas de entrega informadas ao setor de vendas, uma vez que a variável Pedidos no Prazo (*output01*) não apresentou folgas no período.

Tabela 4 - Folgas das DMUs ineficientes da linha de computadores

DMU	Mês/ Ano	Tempo de Produção	Lead time	Funcio- nários	Reclama- ções	WIP	Pedidos Prazo	Produto Acabado	Refugo
DMU1	jul/14	101,46	91,52	6,01	3,00	-	-	-	-
DMU2	ago/14	90,89	33,16	6,39	0,90	0,96	-	-	-
DMU3	set/14	79,53	70,36	5,25	2,00	3,10	-	-	-
DMU4	out/14	114,16	12,43	6,99	-	3,19	-	-	0,02
DMU5	nov/14	74,33	11,48	5,97	-	3,34	-	-	-
DMU6	dez/14	60,90	17,70	5,48	-	-	-	-	-
DMU7	jan/15	91,10	41,85	5,52	-	0,75	-	-	-
DMU8	fev/15	101,25	8,28	5,64	-	5,20	-	-	0,01
DMU9	mar/15	73,58	1,64	0,99	-	7,41	0,04	-	0,20
DMU10	abr/15	69,87	0,36	0,72	-	0,22	-	-	-
DMU11	mai/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU12	jun/15	58,12	51,59	3,11	0,95	-	-	-	-
DMU13	jul/15	1-	29,26	-	-	-	-	-	0,07
DMU14	ago/15	44,00	147,93	3,00	-	2,00	-	-	-
DMU15	set/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU16	out/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU17	nov/15	37,72	138,41	2,86	-	1,51	-	-	-
DMU18	dez/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU19	jan/16	33,93	92,82	2,60	-	1,90	-	-	-
DMU20	fev/16	28,61	26,73	2,25	-	1,96	-	-	0,06
DMU21	mar/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU22	abr/16	10,69	15,85	1,76	-	0,08	-	0,92	-
DMU23	mai/16	21,99	13,37	1,58	5,00	4,27	-	-	0,18
DMU24	jun/16	16,76	38,39	1,25	3,00	0,96	-	-	0,03
DMU25	jul/16	18,00	4,40	1,00	-	2,00	-	-	0,06
DMU26	ago/16	5,04	0,60	0,37	-	2,55	-	-	-
DMU27	set/16	8,39	17,95	0,64	1,00	3,00	-	-	-
DMU28	out/16	7,97	33,53	0,61	-	2,77	-	-	0,03
DMU29	nov/16	8,60	9,20	-	2,98	5,24	-	-	-
DMU30	dez/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU31	jan/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU32	fev/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU33	mar/17	1,68	34,41	-	0,75	1,06	-	-	-
DMU34	abr/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU35	mai/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU36	jun/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU37	jul/17	3,98	4,98	0,29	-	0,09	-	-	0,11
DMU38	ago/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU39	set/17	0,58	3,22	0,05	-	0,85	-	-	0,02
DMU40	out/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU41	nov/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU42	dez/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU43	jan/18	20,40	2,44	1,00	-	4,00	-	1,67	-
DMU44	fev/18	23,76	3,81	1,79	-	1,59	-	-	0,10
DMU45	mar/18	2,44	10,41	0,20	-	6,11	-	-	0,02
DMU46	abr/18	6,37	2,87	2,64	-	-	-	-	-
DMU47	mai/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU48	jun/18	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	<b>1.226,10</b>	<b>970,95</b>	<b>75,96</b>	<b>19,58</b>	<b>66,11</b>	<b>0,04</b>	<b>2,59</b>	<b>0,91</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	<b>25,54</b>	<b>20,23</b>	<b>1,58</b>	<b>0,41</b>	<b>1,38</b>	<b>-</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados coletados, a DMU 4 apresenta a maior folga da variável relativa Tempo de Produção (*input01*) e Número de Funcionários (*input03*). O resultado maior da folga na DMU 4 demonstra que existiam oportunidades de melhoria para otimizar o aproveitamento dos recursos. Em relação à DMU 22 percebe-se que é uma das DMUs com maior número de funcionários (*input03*) sem corresponder a um aumento significativo na quantidade de produtos acabados (*output02*), que apresentou uma folga de 0,92 produtos quando comparada as demais DMUs.

Além disso, no período anterior à implantação do TPC 16% das DMUs são consideradas eficientes (DMU11, 15 e 16) pela análise de folgas do modelo DEA e no período posterior a quantidade de DMUs cresce para 52% (DMU30, 31, 32, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 47 e 48). São consideradas eficientes as DMUs que apresentaram folga igual a zero.

Para facilitar a compreensão das folgas, é apresentada na Tabela 5 a variação média das folgas da linha de computadores. O período considerado na coluna “Pré” da Tabela 5 abrange a média aritmética simples das folgas desde a DMU1 até DMU21 (localizada no período de transição da implantação do TPC), e o período considerado na coluna “Pós” desde a DMU22 até DMU48.

Tabela 5 - Variação média das folgas da linha de computadores

Variável	Nome	Pré	Pós	Varição ( $\Delta\%$ )
<i>input01</i>	Tempo de Produção	50,93	5,80	-89%
<i>input03</i>	Número de Funcionários	2,99	0,49	-84%
<i>input02</i>	<i>Lead time</i>	36,93	7,24	-80%
<i>input05</i>	WIP	1,50	1,28	-15%
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	0,00	0,00	0%
<i>output02</i>	Produto Acabado	0,00	0,00	0%
<i>output03</i>	Refugo	0,017	0,020	+19%
<i>input04</i>	Número de Reclamações	0,33	0,47	+45%

Fonte: Dados da pesquisa

É possível identificar que a maior variação na linha de computadores é a variável Tempo de Produção, com uma redução de 50,93 para 5,80 horas, o que representa redução de -89%. Ainda, foram registradas variações superiores a 80% em Número de Funcionários (-84%) e *Lead time* (-80%).

### 5.1.1.1 Análises estatísticas dos efeitos do TPC na linha de computadores

A aplicação do teste de Shapiro-Wilk tem o propósito de verificar a normalidade dos dados e é sintetizado na Tabela 6.

Tabela 6 - Normalidade dos dados da linha de computadores

<b>Período</b>	<b>Shapiro-Wilk (Sign.)</b>
Dados da eficiência pré TPC	0,2454
Dados da eficiência pós TPC	0,0089

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 6, percebe-se que segundo o teste de Shapiro-Wilk, no que se refere aos resultados da eficiência composta no período pré TPC, os dados são normais (homogêneos) com um nível de significância maior que 0,05 (*Sign.* = 0,2454). No período pós o TPC, os dados diferem de uma distribuição normal, ou seja, os dados não são normais (heterogêneos) com um nível de significância menor que 0,05 (*Sign.* = 0,0089). Deste modo, não se pode aceitar a hipótese de que os dados constituem uma distribuição normal, e para tal, o teste não paramétrico de Wilcoxon foi realizado. Os dados utilizados para avaliação do teste Wilcoxon foram os escores da eficiência composta a partir do modelo DEA e são sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Teste Wilcoxon da linha de computadores

<b>Informações</b>	<b>Valores</b>
Estatística	24
<i>p-value</i>	0,0002
Hipótese Nula	0
Limite Inferior	-0,1400
(Pseudo) Mediana	-0,1099
Limite Superior	-0,0750
Nível de Confiança	0,95

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 7, percebe-se que segundo o teste de Wilcoxon, rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$ , *p-value* = 0,0002 (0,02%) < 0,05 (5%). Existem efeitos estatisticamente significativos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo, a eficiência composta

no período posterior a implantação do TPC é maior que no período pré TPC, considerando um nível de confiança de 95%.

Para reforçar a diferença estatística entre médias do período pré (DMU1 até DMU21) e pós (DMU22 até DMU48) implantação do TPC, é realizado o teste de Wilcoxon das folgas da linha de computadores, considerando um nível de significância de 95%. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Teste Wilcoxon para as folgas da linha de computadores

Variável	Nome	<i>p-value</i>	Resultado	Análise
<i>input01</i>	Tempo de Produção	0,00%	Rejeita $H_0$	Há diferença significativa
<i>input02</i>	<i>Lead time</i>	0,01%	Rejeita $H_0$	Há diferença significativa
<i>input03</i>	Número de Funcionários	0,00%	Rejeita $H_0$	Há diferença significativa
<i>input04</i>	Número de Reclamações	100,00%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input05</i>	WIP	68,13%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	N/A	N/A	Não aplicável
<i>output02</i>	Produto Acabado	N/A	N/A	Não aplicável
<i>output03</i>	Refugo	65,97%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 8, percebe-se que segundo o teste Wilcoxon rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$  em três das oito variáveis analisadas, *p-value* < 0,05 (5%). Assim, para as variáveis Tempo de Produção (*input01*), *Lead time* (*input02*) e Número de Funcionários (*input03*), existem efeitos estatisticamente significativos das médias das folgas analisadas na linha de computadores. Para as variáveis Número de Reclamações (*input04*), WIP (*input05*) e Refugo (*output03*), aceita-se a hipótese nula  $H_0$ , não existem efeitos estatisticamente significativos das médias das folgas analisadas na linha de computadores. As variáveis Pedidos no Prazo (*output01*) e Produto Acabado (*output02*) não podem ter o teste Wilcoxon calculado devido às folgas das 48 DMUs analisadas apresentarem resultado igual a zero (N/A - Não aplicável).

A redução do Tempo de Produção (*input01*) teve impacto no Número de Funcionários (*input03*). Uma vez que a linha de computadores se manteve eficaz nas entregas prometidas pelo departamento de vendas e demonstra eficiência no aproveitamento dos recursos. Como identificado previamente, a redução da variável Tempo de Produção (*input01*) está relacionada ao tempo que os produtos permaneciam no processo produtivo, uma vez que no período anterior à implantação

do TPC o setor de PCP emitia as ordens de produção com datas planejadas de entrega distantes.

Sobre a variável *Lead time (input02)*, a definição de quebrar os grandes lotes de produção e produzir apenas as quantidades necessárias de submontagens para integrar no produto, apresenta influência na análise das folgas. O resultado é que os lotes de processamento passaram a ser variáveis, e não fixos, além de transformar o lote de transferência diferente do lote de processamento, seguindo os pressupostos de Goldratt (1988).

Por fim, após análise de folgas da linha de computadores é possível evidenciar que o TPC manteve a velocidade e cumprimento dos prazos de entrega, características essenciais das empresas ETO (VOTTO; FERNANDES, 2014). Destaca-se que não houve aumento na demanda de produtos, uma vez que nos dados do modelo DEA a variável Produto Acabado se manteve estável, e segundo os especialistas entrevistados no período analisado não houve modificações significativas nos projetos dos produtos. Existem indícios que a implantação do TPC foi o efeito que aumentou a eficiência na linha de computadores. A próxima seção apresentará a análise da eficiência da linha de *displays*.

### 5.1.2 Análise da eficiência da linha de *displays*

A análise do comportamento da eficiência da linha de *displays* objetiva auxiliar a avaliação da implantação do TPC. Dessa forma, para apresentar o escore da eficiência composta das DMUs da linha de *displays* repete-se os mesmos procedimentos realizados para analisar o comportamento da eficiência da linha de computadores (seção 5.1.1).

No ANEXO III estão relacionados, em ordem cronológica, os 48 meses que representam o período de produção de quatro anos consecutivos (julho de 2014 a junho de 2018) e sumarizados na Tabela 9. Nesse sentido, apresentam-se os escores de eficiência referentes aos cálculos da eficiência padrão, eficiência invertida, eficiência composta e eficiência composta normalizada efetuado na Análise Envoltória de Dados (DEA). Os cálculos foram utilizados para verificar o desempenho com relação à eficiência de cada DMU, e os escores de eficiência composta são utilizados para as análises.

Tabela 9 - Resumo eficiência da linha de *displays*

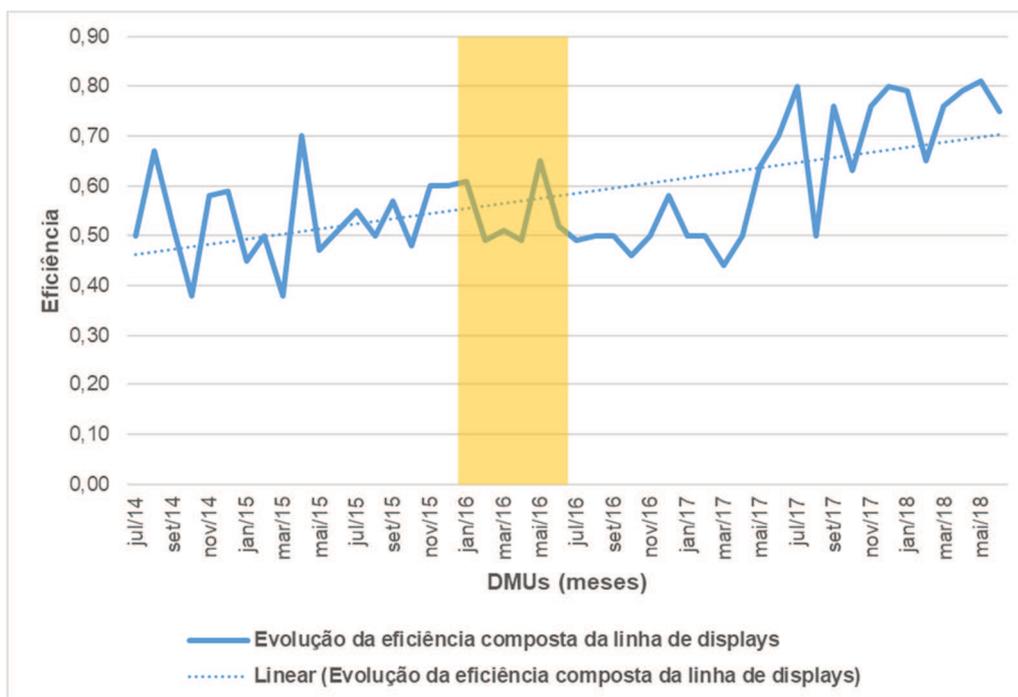
	<b>Pré</b>	<b>Durante</b>	<b>Pós</b>
Mínimo	0,38	0,49	0,44
Máximo	0,70	0,65	0,80
Média	0,53	0,55	0,63
Desvio padrão	0,09	0,07	0,13

Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 9 as DMUs estão segregadas em três períodos: anterior à implantação do TPC (DMU 1 até DMU 18), de transição (DMU 19 até DMU 24) e posterior à implantação do TPC (DMU 25 até DMU 48).

Nesse sentido, o melhor desempenho da eficiência composta é atribuído às DMUs 47 (mai/2018), 37 (jul/2017), 42 (dez/2017), 43 (jan/2018), 46 (abr/2018), 39 (set/2017), 41 (nov/2017), 45 (mar/2018), 48 (jun/2018) e 10 (abr/2015). Destaca-se que das 10 DMUs com melhor desempenho em toda a série analisada, 9 delas estão localizadas no período posterior à implantação do TPC (área verde da Tabela 3).

Para facilitar a compreensão dos dados referentes à eficiência composta (apresentados no ANEXO III), procurou-se ilustrar os dados referentes à evolução da eficiência composta da linha de *displays*. Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores ao longo da série temporal. O período de transição da implantação do TPC é ilustrado pela área amarela do Gráfico 8 (jan/2016 até jun/2016).

Gráfico 8 - Evolução da eficiência composta da linha de *displays*

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar o Gráfico 8, é possível visualizar uma elevação da eficiência da linha de *displays* no período posterior à implantação do TPC (pós jul/2016), visto que a linha de tendência linear (pontilhado no Gráfico 8) mostra a evolução no período de análise. Verifica-se que nos 9 meses pós transição da implantação do TPC (jul/2016) o score de eficiência está próximo ao período anterior à implantação do TPC, com resultados que podem estar atrelados a fase de adaptação do sistema produtivo ao TPC. Ainda assim, os dados indicam que a implantação do TPC pode ter incrementado a eficiência produtiva. A Tabela 10 apresenta os valores das folgas dos recursos *inputs* e *outputs* da linha de *displays*.

O cálculo DEA permite a avaliação dos alvos, apresentando o consumo necessário de recursos *inputs* que as DMUs ineficientes deveriam consumir para obter desempenho equivalente às DMUs eficientes. Na Tabela 10 as DMUs estão segregadas em três períodos: anterior à implantação do TPC (DMU 1 até DMU 18), de transição (DMU 19 até DMU 24) e posterior à implantação do TPC (DMU 25 até DMU 48).

Tabela 10 - Folgas das DMUs ineficientes da linha de *displays*

DMU	Mês/ Ano	Tempo de Produção	Lead time	Funcio- nários	Reclama- ções	WIP	Pedidos Prazo	Produto Acabado	Refugo
DMU1	jul/14	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU2	ago/14	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU3	set/14	15,12	4,32	1,79	0,09	9,46	-	-	-
DMU4	out/14	22,06	12,49	4,65	0,24	16,82	-	-	0,08
DMU5	nov/14	3,43	1,77	0,95	0,05	1,04	-	-	0,23
DMU6	dez/14	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU7	jan/15	6,90	33,17	2,08	2,00	1,97	-	-	0,41
DMU8	fev/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU9	mar/15	15,78	8,80	4,91	-	11,40	-	-	0,14
DMU10	abr/15	1,19	0,52	1,19	-	0,19	-	-	-
DMU11	mai/15	4,03	1,48	3,46	1,00	0,30	-	-	0,07
DMU12	jun/15	16,52	13,63	3,64	-	4,53	-	-	0,08
DMU13	jul/15	11,87	2,22	1,00	-	10,09	-	-	0,54
DMU14	ago/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU15	set/15	3,99	1,61	1,02	0,10	2,62	-	1,22	-
DMU16	out/15	8,05	4,97	2,09	0,22	8,46	-	-	0,01
DMU17	nov/15	11,63	0,18	1,00	0,01	6,02	-	3,98	-
DMU18	dez/15	7,17	1,35	0,87	-	0,28	-	-	-
DMU19	jan/16	14,68	7,86	-	-	8,40	-	-	0,53
DMU20	fev/16	1,46	0,69	0,26	0,01	3,75	-	-	0,10
DMU21	mar/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU22	abr/16	4,02	0,69	0,22	5,53	0,05	-	-	-
DMU23	mai/16	3,45	1,81	0,98	0,05	5,65	-	-	0,18
DMU24	jun/16	14,01	10,90	3,89	0,22	3,82	-	-	0,29
DMU25	jul/16	3,17	15,73	0,27	0,03	9,23	-	-	0,13
DMU26	ago/16	39,79	44,38	13,42	1,92	-	-	-	-
DMU27	set/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU28	out/16	6,61	4,30	1,63	0,80	2,62	-	-	0,22
DMU29	nov/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU30	dez/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU31	jan/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU32	fev/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU33	mar/17	6,56	83,44	2,00	-	5,78	-	-	0,32
DMU34	abr/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU35	mai/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU36	jun/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU37	jul/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU38	ago/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU39	set/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU40	out/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU41	nov/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU42	dez/17	0,80	3,04	-	1,00	-	-	-	-
DMU43	jan/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU44	fev/18	16,45	31,20	6,75	2,00	1,00	-	-	-
DMU45	mar/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU46	abr/18	-	20,62	0,14	-	-	-	-	0,03
DMU47	mai/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU48	jun/18	0,50	11,61	1,00	1,00	3,00	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	<b>239,24</b>	<b>322,78</b>	<b>59,21</b>	<b>16,27</b>	<b>116,48</b>	<b>-</b>	<b>5,20</b>	<b>3,36</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	<b>4,98</b>	<b>6,72</b>	<b>1,23</b>	<b>0,34</b>	<b>2,43</b>	<b>-</b>	<b>0,11</b>	<b>0,07</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Em relação às folgas, efetuou-se uma análise agregada dos totais apresentados na Tabela 10, que contempla o somatório de todas as folgas das 48 DMUs. Ainda, realizou-se o cálculo da média para as folgas de cada variável. Pode-se considerar que para a variável Tempo de Produção (*input01*), as DMUs ineficientes poderiam reduzir, em média, 4,98 horas o tempo utilizado na manufatura dos produtos e a variável *Lead time* (*input02*) reduzir, em média, 6,72 dias o tempo de atravessamento dos produtos. Assim, compreender a média das folgas viabiliza estabelecer um parâmetro para comparar as folgas de cada DMU.

A partir da análise das folgas da linha de *displays*, é possível identificar que esta linha de produtos sempre apresentou resultados dentro da fronteira de eficiência para a variável Pedidos no Prazo (*output01*), indicando não haver incidências de efeitos do TPC nesta variável. Esta característica pode ser compreendida, devido à linha de *displays* fornecer um dos principais produtos da empresa e, a cobrança pelo departamento de vendas e *marketing* para atender as entregas acordadas com os clientes serem constantes, ainda antes da implantação do TPC.

A DMU33 apresenta uma folga de 83,44 dias de *Lead time* (*input02*), sendo considerado o pior resultado para esta variável em toda a série histórica. Preliminarmente pode-se associar este resultado ineficiente, ao elevado número de Refugos (*output03*) de 0,32 peças. A análise conjunta das variáveis *Lead time* (*input02*) e Refugos (*output03*) indica que ocorreram problemas de fabricação e/ou falhas que aumentaram o tempo de atravessamento dos produtos e, assim, um acréscimo na quantidade de refugos. O TPC aponta a necessidade de planejar a produção e estabelecer simultaneamente todas as restrições do sistema (GOLDRATT, 1988), no entanto o tempo de atravessamento é diretamente impactado por problemas de qualidade que podem ocorrer em um sistema TPC.

Além disso, no período anterior à implantação do TPC 27% das DMUs são consideradas eficientes (DMU1, 2, 6, 8 e 14) pela análise de folgas do modelo DEA e no período posterior a quantidade de DMUs cresce para 69% (DMU27, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 45 e 47). São consideradas eficientes as DMUs que apresentaram folga igual a zero. Para facilitar a compreensão das folgas, é apresentada na Tabela 11 a variação média das folgas da linha de *displays*. O período considerado na coluna “Pré” da Tabela 11 abrange a média aritmética simples das folgas desde a DMU1 até DMU21 (localizada no período de transição da implantação do TPC), e o período considerado na coluna “Pós” desde a DMU22 até DMU48.

Tabela 11 - Variação média das folgas da linha de *displays*

Variável	Nome	Pré	Pós	Variação ( $\Delta\%$ )
<i>output02</i>	Produto Acabado	0,25	0,00	-100%
<i>input05</i>	WIP	4,06	1,15	-72%
<i>output03</i>	Refugo	0,10	0,04	-58%
<i>input01</i>	Tempo de Produção	6,85	3,53	-48%
<i>input03</i>	Número de Funcionários	1,38	1,12	-18%
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	0,00	0,00	0%
<i>input02</i>	<i>Lead time</i>	4,53	8,43	+86%
<i>input04</i>	Número de Reclamações	0,18	0,46	+162%

Fonte: Dados da pesquisa

É possível identificar que a variação mais significativa na linha de *displays* é a variável Produto Acabado, com uma redução de 0,25 para 0,00 peças, o que representa redução de -100%. Ainda, foram registradas variações significantes nas variáveis WIP (-72%), Refugo (-58%) e Tempo de Produção (-48%).

#### 5.1.2.1 Análises estatísticas dos efeitos do TPC na linha de *displays*

A aplicação do teste de Shapiro-Wilk tem o propósito de verificar a normalidade dos dados e é sintetizado na Tabela 12.

Tabela 12 - Normalidade dos dados da linha de *displays*

Período	Shapiro-Wilk ( <i>Sign.</i> )
Dados da eficiência pré TPC	0,7763
Dados da eficiência pós TPC	0,0008

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 12, percebe-se que no que se refere aos resultados da eficiência composta no período pré TPC, os dados não diferem de uma distribuição normal, ou seja, os dados são normais (homogêneos) com um nível de significância maior que 0,05 (*Sign.* = 0,7763). No período pós o TPC, os dados diferem de uma distribuição normal, ou seja, os dados não são normais (heterogêneos) com um nível de significância menor que 0,05 (*Sign.* = 0,0008). Não se pode aceitar a hipótese de que os dados constituem uma distribuição normal, e para tal, o teste não paramétrico de Wilcoxon foi realizado (Tabela 13).

Tabela 13 - Teste Wilcoxon da linha de *displays*

Informações	Valores
Estatística	61,5
<i>p-value</i>	0,0068
Hipótese Nula	0
Limite Inferior	-0,1650
(Pseudo) Mediana	-0,0993
Limite Superior	-0,0300
Nível de Confiança	0,95

Fonte: Dados da pesquisa

Conforme a Tabela 13, percebe-se que segundo o teste de Wilcoxon, rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$ ,  $p\text{-value} = 0,0068$  (0,68%)  $< 0,05$  (5%). Existem efeitos estatisticamente significativos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo, a eficiência composta no período posterior a implantação do TPC é maior que no período pré TPC, considerando um nível de confiança de 95%.

Para reforçar a diferença estatística entre médias do período pré (DMU1 até DMU21) e pós (DMU22 até DMU48) implantação do TPC, é realizado o teste Wilcoxon das folgas da linha de *displays*, considerando um nível de significância de 95%. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Teste Wilcoxon para as folgas da linha de *displays*

Variável	Nome	<i>p-value</i>	Resultado	Análise
<i>input01</i>	Tempo de Produção	0,82%	Rejeita $H_0$	Há diferença significativa
<i>input02</i>	<i>Lead time</i>	93,17%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input03</i>	Número de Funcionários	5,54%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input04</i>	Número de Reclamações	98,26%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input05</i>	WIP	0,12%	Rejeita $H_0$	Há diferença significativa
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	N/A	N/A	Não aplicável
<i>output02</i>	Produto Acabado	1,04%	Rejeita $H_0$	Há diferença significativa
<i>output03</i>	Refugo	8,08%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 14, percebe-se que segundo o teste Wilcoxon rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$  em três das oito variáveis analisadas,  $p\text{-value} < 0,05$  (5%). Assim, para as variáveis Tempo de Produção (*input01*), WIP (*input05*) e Produto Acabado (*output02*), existem efeitos

estatisticamente significativos das médias das folgas analisadas na linha de *displays*. Para as variáveis *Lead time (input02)*, Número de Funcionários (*input03*), Número de Reclamações (*output04*) e Refugo (*output03*), aceita-se a hipótese nula  $H_0$ , não existem efeitos estatisticamente significativos das médias das folgas analisadas na linha de *displays*. A variável *output01* não pôde ter o teste Wilcoxon calculado devido às folgas das 48 DMUs analisadas apresentarem resultado igual a zero (N/A).

A variável WIP (*input05*) apresenta -72% de variação com significativa redução de quantidades de folgas no período posterior à implantação do TPC (8 do total de 27 DMUs). A análise conjunta do resultado de folgas na quantidade de produtos em WIP (*input05*) e Pedidos no Prazo (*output01*), evidencia que pós implantação do TPC a quantidade de produtos em processamento reduziu sem comprometer as entregas prometidas pelo departamento de vendas. Além disso, o melhor aproveitamento dos recursos evidencia uma redução na variável Tempo de Produção (*input01*), ou seja, existem indícios que a linha de *displays* se tornou mais eficiente pós implantação do TPC ao entregar produtos com custo de mão de obra inferior. É válido ressaltar que um dos problemas enfrentados pelas empresas ETO é lidar com o controle da produção de um novo produto, pois durante a manufatura o tempo de produção é normalmente maior do que estipulado na fase de cotação (MUNTSLAG, 1994).

A variável Produto Acabado (*output02*) apresenta um valor percentual expressivo com variação de -100% de folga (conforme Tabela 11), contudo em termos absolutos a variação é de 0,25 produtos. Além disso, esta variável apresentou folgas em duas DMUs no período anterior à implantação do TPC (DMU15 e DMU17) de toda a série analisada e, portanto, não possui dados representativos para análise. Sendo assim, apesar de apresentar *p-value* 1,04% no teste de Wilcoxon, não é possível afirmar que o TPC influenciou na redução da folga das variáveis Produto Acabado (*output02*). A aplicação do teste Wilcoxon permite refutar a avaliação preliminar que a variável Produto Acabado (*output02*) tenha influenciado na eficiência da linha de *displays*.

Por fim, após análise de folgas da linha de *displays* é possível evidenciar que o TPC manteve o cumprimento dos prazos de entrega e melhorou o resultado das folgas analisadas. Destaca-se que não houve aumento na demanda de produtos, uma vez que nos dados do modelo DEA a variável Produto Acabado manteve-se constante. Assim, existem indícios de que a implantação do TPC foi o efeito que aumentou a eficiência na linha de *displays*.

### 5.1.3 Análise da eficiência da linha de eletrônicos

A análise do comportamento da eficiência da linha de eletrônicos objetiva auxiliar a avaliação da implantação do TPC. Dessa forma, repetem-se os mesmos procedimentos realizados para analisar o comportamento da eficiência da linha de computadores e *displays*.

No ANEXO IV estão relacionados, em ordem cronológica, os 48 meses que representam o período de produção de quatro anos consecutivos (julho de 2014 a junho de 2018) e sumarizados na Tabela 15. Nesse sentido, apresentam-se os escores de eficiência referentes aos cálculos da eficiência padrão, eficiência invertida, eficiência composta e eficiência composta normalizada efetuado na Análise Envoltória de Dados (DEA). Os cálculos foram utilizados para verificar o desempenho com relação à eficiência de cada DMU, e os escores de eficiência composta são utilizados para as análises.

Tabela 15 - Resumo eficiência da linha de eletrônicos

	<b>Pré</b>	<b>Durante</b>	<b>Pós</b>
Mínimo	0,43	0,41	0,44
Máximo	0,59	0,59	0,67
Média	0,51	0,53	0,53
Desvio padrão	0,04	0,07	0,06

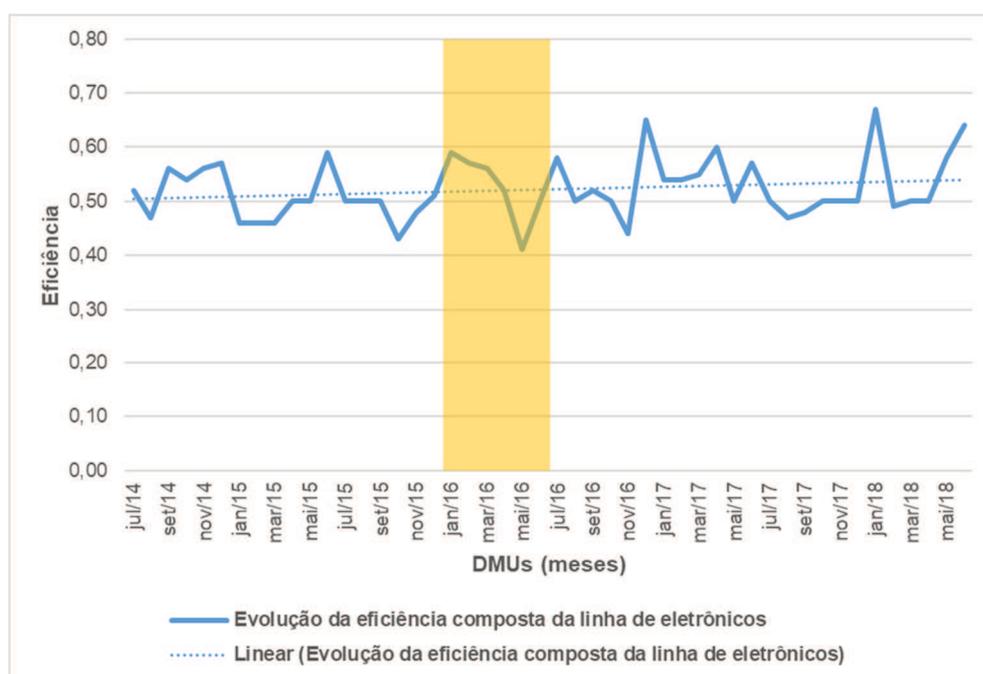
Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 15 as DMUs estão segregadas em três períodos: anterior à implantação do TPC (DMU 1 até DMU 18), de transição (DMU 19 até DMU 24) e posterior à implantação do TPC (DMU 25 até DMU 48).

Nesse sentido, o melhor desempenho da eficiência composta é atribuído às DMUs 43 (jan/2018), 30 (dez/2016), 48 (jun/2018), 34 (abr/2017), 12 (jun/2015), 19 (jan/2016), 25 (jul/2016), 47 (mai/2018), 6 (dez/2014) e 20 (fev/2016). Destaca-se que das 10 DMUs com melhor desempenho em toda a série analisada, 2 estão localizadas no período anterior (área cinza da Tabela 15) e 2 estão localizadas no período de transição da implantação do TPC (área amarelo da Tabela 15). As DMUs 16 (out/2015) e 23 (mai/2016) apresentaram os piores resultados de desempenho em toda a série temporal.

Para facilitar a compreensão dos dados referente à eficiência composta (apresentados no ANEXO IV), procurou-se ilustrar os dados referentes à evolução da eficiência composta da linha de eletrônicos. Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores ao longo da série temporal. O período de transição da implantação do TPC é ilustrado pela área amarela do Gráfico 9 (jan/2016 até jun/2016).

Gráfico 9 - Evolução da eficiência composta da linha de eletrônicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar o Gráfico 9, é possível visualizar um aumento da eficiência da linha de eletrônicos no período posterior à implantação do TPC (pós jul/2016), visto que a linha de tendência linear (pontilhado no Gráfico 7) mostra a evolução no período de análise. Apesar da linha de tendência linear mostrar evolução, o crescimento médio registrado na linha de eletrônicos no período de análise foi de aproximadamente 4%.

O cálculo DEA permite a avaliação dos alvos, apresentando o consumo necessário de recursos inputs que as DMUs ineficientes deveriam consumir para obter desempenho equivalente às DMUs eficientes. Na Tabela 16 são apresentados os valores das folgas dos recursos *inputs* da linha de computadores.

Na Tabela 16 as DMUs estão segregadas em três períodos: anterior à implantação do TPC (DMU 1 até DMU 18), de transição (DMU 19 até DMU 24) e posterior à implantação do TPC (DMU 25 até DMU 48).

Tabela 16 - Folgas das DMUs ineficientes da linha de eletrônicos

DMU	Mês/ Ano	Tempo de Produção	Lead time	Funcio- nários	Reclama- ções	WIP	Pedidos Prazo	Produto Acabado	Refugo
DMU1	jul/14	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU2	ago/14	11,02	1,50	0,69	-	6,56	-	-	0,04
DMU3	set/14	10,69	1,65	0,70	-	3,35	-	-	-
DMU4	out/14	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU5	nov/14	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU6	dez/14	2,91	0,55	0,19	-	0,05	-	-	0,09
DMU7	jan/15	14,28	19,43	0,94	0,18	0,23	-	1,24	0,14
DMU8	fev/15	16,09	6,29	1,04	-	1,48	-	-	0,24
DMU9	mar/15	13,14	13,97	1,60	-	38,80	-	-	0,20
DMU10	abr/15	10,37	3,03	3,00	-	-	-	-	0,15
DMU11	mai/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU12	jun/15	2,28	13,69	1,20	-	2,60	-	-	0,32
DMU13	jul/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU14	ago/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU15	set/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU16	out/15	25,35	3,90	1,90	0,79	2,11	-	0,61	-
DMU17	nov/15	6,31	1,11	0,70	0,94	0,77	-	-	-
DMU18	dez/15	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU19	jan/16	0,19	0,05	0,02	-	0,01	-	-	-
DMU20	fev/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU21	mar/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU22	abr/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU23	mai/16	32,88	6,69	5,32	-	1,87	0,18	-	0,50
DMU24	jun/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU25	jul/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU26	ago/16	14,38	2,90	0,93	-	11,86	-	-	0,12
DMU27	set/16	20,48	1,74	0,66	-	0,55	-	-	0,38
DMU28	out/16	7,25	54,33	-	-	-	-	-	0,38
DMU29	nov/16	31,91	25,06	1,45	-	5,27	-	-	0,54
DMU30	dez/16	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU31	jan/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU32	fev/17	28,03	80,54	-	-	-	-	-	0,04
DMU33	mar/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU34	abr/17	4,82	63,58	-	-	-	-	-	-
DMU35	mai/17	11,50	24,35	-	1,00	9,00	-	-	0,31
DMU36	jun/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU37	jul/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU38	ago/17	9,50	328,27	0,55	-	0,20	-	0,25	0,04
DMU39	set/17	6,55	1,39	0,38	-	0,14	-	0,55	0,35
DMU40	out/17	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU41	nov/17	-	6,00	-	-	-	-	-	0,83
DMU42	dez/17	-	3-	-	-	-	-	-	0,50
DMU43	jan/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU44	fev/18	7,93	19,35	0,68	-	3,65	-	-	-
DMU45	mar/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU46	abr/18	-	-	-	-	-	-	-	-
DMU47	mai/18	16,48	10,09	1,30	-	1,48	-	-	0,27
DMU48	jun/18	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	304,34	719,46	23,25	2,91	89,98	0,18	2,65	5,44
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	6,34	14,99	0,48	0,06	1,87	-	0,06	0,11

Fonte: Dados da pesquisa

Em relação às folgas, efetuou-se uma análise agregada dos totais apresentados na Tabela 16, que contempla o somatório de todas as folgas das 48 DMUs. Ainda, realizou-se o cálculo da média para as folgas de cada variável. Pode-se considerar que para a variável Tempo de Produção (*input01*), as DMUs ineficientes poderiam reduzir, em média, 6,34 horas o tempo utilizado na manufatura dos produtos e a variável *Lead time* (*input02*) reduzir, em média, 14,99 dias o tempo de atravessamento dos produtos. Assim, compreender a média das folgas viabiliza estabelecer um parâmetro para comparar as folgas de cada DMU.

A partir da análise das folgas da linha de eletrônicos, é possível identificar que esta linha de produtos apresenta DMUs com variáveis ineficientes distribuídas nos três períodos (pré, transição e pós TPC), o que indica que ainda pós implantação do TPC existem variáveis que poderiam ser otimizadas para alcançar a fronteira da eficiência. Entre as variáveis, este fato pode ser identificado nos resultados das folgas existentes no Tempo de Produção (*input01*), *Lead time* (*input02*) e Número de Funcionários (*input03*).

As folgas existentes no Tempo de Produção (*input01*) e *Lead time* (*input02*), indicam que a linha de eletrônicos apresenta variabilidade entre os produtos entregues, ou seja, os produtos desta linha possuem diferentes níveis de complexidade para montagem e testes. A variabilidade é um desafio nos sistemas produtivos ETO, no qual o reduzido volume de produção e oscilações da demanda contribuem negativamente na eficiência (GOSLING; NAIM, 2009). O indicativo da variabilidade nos períodos anterior e posterior à implantação do TPC aponta que o sistema TPC pode não ser eficiente em sistemas produtivos ETO com muita variabilidade.

Além disso, no período anterior à implantação do TPC, 44% das DMUs são consideradas eficientes (DMU1, 4, 5, 11, 13, 14, 15 e 18) pela análise de folgas do modelo DEA e no período posterior a quantidade de DMUs manteve-se estável em 45% (DMU25, 30, 31, 33, 36, 37, 40, 43, 45, 46 e 48). São consideradas eficientes as DMUs que apresentaram folga igual a zero.

Para facilitar a compreensão das folgas, é apresentada na Tabela 17 a variação média das folgas da linha de eletrônicos. O período considerado na coluna “Pré” da Tabela 17 abrange a média aritmética simples das folgas desde a DMU1 até DMU21 (localizada no período de transição da implantação do TPC), e o período considerado na coluna “Pós” desde a DMU22 até DMU48.

Tabela 17 - Variação média das folgas da linha de eletrônicos

Variável	Nome	Pré	Pós	Variação ( $\Delta\%$ )
<i>output02</i>	Produto Acabado	0,09	0,03	-66%
<i>input04</i>	Número de Reclamações	0,09	0,04	-59%
<i>input05</i>	WIP	2,66	1,26	-53%
<i>input03</i>	Número de Funcionários	0,57	0,42	-27%
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	0,00	0,00	0%
<i>input01</i>	Tempo de Produção	5,36	7,10	+32%
<i>output03</i>	Refugo	0,06	0,16	+181%
<i>input02</i>	Lead time	3,10	24,23	+681%

Fonte: Dados da pesquisa

É possível identificar que a variação negativa mais significativa na linha de eletrônicos é a variável Produto Acabado, com uma redução de 0,09 para 0,03 peças, o que representa redução de -66%. Ainda, foram registradas variações nas variáveis Número de Reclamações (-59%), WIP (-53%) e Número de Funcionários (-27%).

#### 5.1.3.1 Análises estatísticas dos efeitos do TPC na linha de eletrônicos

A aplicação do teste de Shapiro-Wilk tem o propósito de verificar a normalidade dos dados e o teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias. Os testes para validação dos pressupostos da ANOVA são sintetizados na Tabela 18.

Tabela 18 - Validação dos pressupostos da ANOVA na linha de eletrônicos

Período	Shapiro-Wilk ( <i>Sign.</i> )	Levene ( <i>Sign.</i> )
Dados da eficiência pré TPC	0,4982	-
Dados da eficiência pós TPC	0,1064	-
Amostra total dos dados	-	0,7072

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 18, percebe-se que segundo o teste de Shapiro-Wilk, no que se refere aos resultados da eficiência composta no período pré e pós o TPC, os dados são normais (homogêneos) com um nível de significância maior que 0,05 (anterior *Sign.* = 0,4982 e posterior *Sign.* = 0,1064). Portanto, permite aceitar a hipótese de que os dados constituem uma distribuição normal. Quanto ao teste de Levene, o resultado obtivo (*Sign.* = 0,7072) também permite aceitar a hipótese de que

os dados são homogêneos, portanto não se rejeita a hipótese de igualdade das variâncias.

Logo, os pressupostos para utilização da ANOVA para comparar as médias das eficiências compostas foram cumpridos, os dados obedecem a uma distribuição normal (normalidade) e são homogêneos (homogeneidade). Os dados utilizados para avaliação da ANOVA foram os escores da eficiência composta a partir do modelo DEA e o resultado é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Teste ANOVA da linha de eletrônicos

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>p-value</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	0,0017	1	0,0017	0,5562	0,4596	4,0517
Dentro dos grupos	0,1422	46	0,0031			

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 19, percebe-se que segundo o teste ANOVA, aceita-se a hipótese nula  $H_0$  e rejeita-se a hipótese alternativa  $H_1$ ,  $p\text{-value} = 0,4596$  (45,96%)  $> 0,05$ . O escore de  $F$  da eficiência composta é 0,5562 e  $p\text{-value}$  0,4996, permite afirmar que é menor que o  $F$  crítico 4,0517, logo não existe significância na diferença detectada. Portanto, não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo na linha de eletrônicos, o aumento da eficiência composta no período posterior a implantação do TPC não é significativa, considerando um nível de confiança de 95%.

Para reforçar a análise estatística, ainda que os pressupostos para realização do teste paramétrico ANOVA tenham sido cumpridos e o teste efetuado, realizou-se também o teste de Wilcoxon. Os dados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Teste Wilcoxon da linha de eletrônicos

<b>Informações</b>	<b>Valores</b>
Estatística	138
$p\text{-value}$	0,5183
Hipótese Nula	0
Limite Inferior	-0,0422
(Pseudo) Mediana	-0,0072
Limite Superior	0,0249
Nível de Confiança	0,95

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 20, percebe-se que segundo o teste de Wilcoxon, aceita-se a hipótese nula  $H_0$  e rejeita-se a hipótese alternativa  $H_1$ ,  $p\text{-value} = 0,5183$  (51,83%)  $> 0,05$  (5%). Assim como no teste ANOVA, não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo na linha de eletrônicos.

Para reforçar a diferença estatística entre médias do período pré (DMU1 até DMU21) e pós (DMU22 até DMU48) implantação do TPC, é realizado o teste Wilcoxon das folgas da linha de eletrônicos, considerando um nível de significância de 95%. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Teste Wilcoxon para as folgas da linha de eletrônicos

Variável	Nome	$p\text{-value}$	Resultado	Análise
<i>input01</i>	Tempo de Produção	51,59%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input02</i>	<i>Lead time</i>	7,40%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input03</i>	Número de Funcionários	17,72%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input04</i>	Número de Reclamações	7,61%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>input05</i>	WIP	19,05%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	N/A	N/A	Não aplicável
<i>output02</i>	Produto Acabado	21,06%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa
<i>output03</i>	Refugo	9,60%	Aceita $H_0$	Não há diferença significativa

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os dados da Tabela 14, percebe-se que segundo o teste Wilcoxon aceita-se a hipótese nula  $H_0$  para sete das oito variáveis analisadas, não existem efeitos estatisticamente significativos das médias das folgas analisadas na linha de eletrônicos. A variável Pedidos no Prazo (*output01*) não pôde ter o teste Wilcoxon calculado devido às folgas das 48 DMUs analisadas apresentarem resultado igual a zero (N/A - Não aplicável).

Assim, baseado nos resultados de eficiência e análise de folgas da linha de eletrônicos existem indicativos que o desempenho desta linha de produtos apresentou resultados inferiores se comparado às linhas de computadores e *displays*. Após as análises estatísticas das três linhas de produtos, na próxima seção é apresentada a avaliação dos especialistas da empresa sobre a implantação do TPC.

## 5.2 AVALIAÇÃO DOS ESPECIALISTAS SOBRE A IMPLANTAÇÃO DO TPC

Com a técnica da Análise Envoltória de Dados (DEA) e as análises estatísticas, o teste de Wilcoxon e ANOVA, verificou-se o efeito da implantação do TPC no sistema produtivo de Engenharia sob Encomenda (ETO). No entanto, tais ferramentas são incapazes de analisar quais variáveis e efeitos qualitativos contribuíram, positivamente ou não, na eficiência produtiva pós implantação do TPC. Para efetuar tal análise, foi realizada uma apresentação dos resultados da eficiência e folgas referentes às três linhas de produtos (computadores, *displays* e eletrônicos) aos especialistas da empresa que haviam participado previamente da etapa exploratória.

Ao apresentar os resultados dos dados registrados ao longo dos 48 meses analisados no modelo DEA, os especialistas da empresa visualizaram o efeito da implantação do TPC. Além disso, observaram que o teste de hipóteses demonstra a existência de efeitos positivos da implantação do TPC sobre a eficiência na linha de computadores e *displays*, no entanto, na linha de eletrônicos demonstrou não existirem tais evidências. Os dados forneceram embasamento para as discussões.

Segundo a opinião comum dos especialistas entrevistados, a linha de computadores é considerada a mais complexa devido à característica dos produtos, com necessidade de diferentes recursos, quantidade de componentes e testes exigidos para esta família de produtos. Além disso, o analista de planejamento e controle da produção (PCP) (A), informou que existiam “dificuldades em priorizar quais ordens de produção deveriam ser entregues antes”, pois a comunicação entre a linha de computadores apresentava dificuldades. Como resultado, pós a implantação do TPC na linha de computadores, as variáveis Tempo de Produção (*input01*) e *Lead time* (*input02*) melhoraram como decorrência da priorização proporcionada pelo TPC.

Ainda, foi comentado pelo engenheiro de manufatura (A) que a linha de computadores contou com funcionários com maior foco e comprometimento no projeto. A participação dos funcionários foi importante para propor ideias e melhorar a qualidade dos relatórios utilizados para priorizar as ordens de produção. A expectativa pós implantação do TPC na linha de computadores “foi acima do esperado”, afirmou o coordenador da engenharia de manufatura, que destacou também a prioridade existente no início do projeto para os funcionários otimizarem o tempo de produção.

O Quadro 18 relaciona, em formato de tópicos, a avaliação individual dos especialistas entrevistados.

Fonte: Elaborado pelo autor

<b>Avaliação dos resultados</b>	<b>Coordenador Eng. Manufatura</b>	<b>Engenheiro de Manufatura (B)</b>	<b>Engenheiro de Manufatura (A)</b>	<b>Analista de PCP (B)</b>	<b>Analista de PCP (A)</b>
1) Linha de computadores é a mais complexa	X	X	X	X	X
2) A qualidade dos relatórios enviados foi importante	X	X	X	X	X
3) Os resultados foram impulsionados pela mudança cultural do TPC	X	X	X	X	X
4) Pré TPC haviam dificuldades em priorizar quais produtos deveriam ser entregues antes					X
5) Linha de computadores tinha problemas de comunicação, pós TPC melhorou					X
6) Participação da alta direção nas reuniões influenciou os resultados					X
7) A expectativa pós implantação do TPC na linha de computadores foi acima do esperado	X				
8) O projeto TPC apresentou resultados positivos para a empresa	X				
9) As folgas fornecem uma boa visão do que deve ser melhorado	X				
10) A priorização proporcionada pelo TPC impactou nas variáveis Tempo de Produção e <i>Lead time</i> na linha de computadores				X	
11) O projeto TPC foi uma oportunidade de melhorar os resultados produtivos, uma vez que não houve outros projetos				X	
12) Durante implantação do TPC os funcionários da linha de computadores demonstraram maior foco e comprometimento no projeto			X		
13) A alta variabilidade contribui para o resultado menor na linha de eletrônicos		X			

Quadro 18 - Avaliação dos especialistas

Ao questionar os especialistas se houve algum fato externo ou interno, além do TPC, que possa ter influenciado a linha de computadores, foi comentado pelo analista de PCP (B) que apesar da empresa não ter investido em programas de melhoria no período de análise em nenhuma das três linhas de produtos, a implantação do TPC foi vista como uma “oportunidade para melhorar” a priorização das ordens de produção. Assim, não houve programas de melhoria ou projetos paralelos à implantação do TPC com propósito de otimizar a eficiência produtiva no período analisado.

Na linha de computadores, a redução da variável *Lead time* demonstra que o diagrama de cores (preto, vermelho, amarelo e verde) adotado nos relatórios do TPC da empresa facilitou a compreensão entre o setor de PCP, focalizando esforços nas ordens de produção que realmente importavam. Adicionalmente, a utilização do relatório passou a servir como uma ferramenta de análise da necessidade de realizar horas extras. Caso a ordem de produção fosse classificada como preto ou vermelho, estava autorizado, do contrário não existia a necessidade imediata de hora extra.

O analista de PCP (A), ressaltou e, obteve comum acordo dos demais entrevistados, que a “qualidade dos relatórios enviados a todos os envolvidos no processo produtivo foi um ponto muito importante”. Antes da implantação do TPC não existiam relatórios de prioridades disponíveis para todos os funcionários, era responsabilidade do PCP conversar com os supervisores das linhas e cobrar a entrega dos produtos, contudo haviam falhas de comunicação e as prioridades eram muitas vezes trocadas. O analista do PCP (A), ainda comentou que os relatórios enviados semanalmente passaram por um processo de elaboração e acompanhamento contínuo nos primeiros meses, pois se existissem erros ou dúvidas na interpretação dos dados, o projeto do TPC não teria informações confiáveis e reais ganhos. Um exemplo do relatório semanal é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Relatório semanal TPC

OP	WR	Data (Plano de M&E)	WIP Item	Item Description	Unit Item Group	Qty Receivables	GM Total da OP	LRI	LRI Inv. Receivables	30-CH-SEG
100006796	22	27/05/16	2273228-02	PWA LED BL 500	PW	2	8	8015114-09	OPD 37K1 TOP	D1010001450
100006552	22	27/05/16	458774-02	PWA IOC1-2	PW	2	20	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010000420
100006578	22	27/05/16	547794-00	PWA DISPLAY GEN	PW	1	15	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010000420
100006635	22	27/05/16	477708-01	PWA MOTHERBO	PW	1	11	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010000420
100006701	24	10/05/16	425750-04	PWA K25A D02C	PW	2	30	80410-00	LCU TOP ASSY	D1020003120
100006713	24	10/05/16	334934-02	RQD FLEX ASSY	PW	1	2	80410-00	LCU TOP ASSY	D1020003130
100006712	24	10/05/16	334934-02	RQD FLEX ASSY	PW	1	2	80410-00	LCU TOP ASSY	D1020003120
100006771	24	10/05/16	347108-00	PWA K15A D02C	PW	1	15	80410-00	LCU TOP ASSY	D1020003120
100006648	25	17/05/16	49624-00	PWA KCC1 BASE	PW	1	6	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010001520
100006840	25	17/05/16	47107-00	PWA HUB INECO	PW	1	7	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010001520
100006845	25	18/05/16	45101-00	PWA CONNECTO	PW	5	24	40110-00	PWA CONNECTO	4000007000
100006701	25	18/05/16	425750-04	PWA K25A D02C	PW	2	30	425750-04	PWA K25A D02C	4000007000
100006840	25	18/05/16	47107-00	PWA HUB	PW	1	7	47107-00	PWA HUB	4000007000
100006573	26	24/05/16	532053A-01	PWA FILTER	PW	1	8	80000-00	OPD LEFT ASSY D10200024140	
100006573	26	24/05/16	532053A-01	PWA FILTER	PW	1	8	80000-00	OPD LEFT ASSY D10200024150	
100006538	26	24/05/16	535145F-02	PWA ORCA (LFT)	PW	1	5	80000-00	OPD LEFT ASSY D10200024140	
100006538	26	24/05/16	535145F-02	PWA ORCA (LFT)	PW	1	5	80000-00	OPD LEFT ASSY D10200024150	
100006602	26	24/05/16	532094A-00	PWA FLEX TEST P	PW	1	11	80000-00	OPD LEFT ASSY D10200024140	
100006602	26	24/05/16	532094A-00	PWA FLEX TEST P	PW	1	11	80000-00	OPD LEFT ASSY D10200024150	
100006511	26	24/05/16	354108-02	PWA MOTHER BO	PW	1	17	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010001510
100006590	26	24/05/16	439784-01	PWA K0-2	PW	1	10	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010001510
100006558	26	24/05/16	342028-00	PWA S08	PW	2	21	80020-04	TOP ASSY. MDP	D1010001510

Fonte: A Empresa

Assim como apontado para a linha de computadores, a linha de *displays* também apresentava dificuldades em priorizar quais produtos deveriam ser entregues antes. Pós a implantação do TPC na linha de *displays* as variáveis WIP (*input05*) e Tempo de Produção (*input01*) melhoraram, o que evidencia a redução de produtos e estoques em processo, além de apresentar um aumento da eficiência nos tempos de montagem e teste dos produtos.

O coordenador da engenharia de manufatura, que na época da implantação do TPC era o líder do projeto, apontou que os resultados da eficiência do processo produtivo para as três linhas de produto “apresentam resultados positivos para a empresa”. É válido destacar que até a apresentação dos resultados dos modelos DEA os funcionários não tinham informações sobre o impacto da implantação do TPC no processo produtivo. A percepção relatada pelos especialistas era de melhora, mas não era possível mensurar quantitativamente.

Segundo a opinião do engenheiro de manufatura (B), a evolução da eficiência da linha de eletrônicos apresentou pouco crescimento significativo devido à diferença de complexidade desta família de produtos quando comparada aos computadores e *displays*. Foi comentado que esta linha processa produtos considerados complexos e outros simples, causando uma variabilidade significativa. Essa percepção está alinhada aos resultados encontrados neste trabalho, visto que o crescimento evidenciado na eficiência é de aproximadamente 4%.

Por fim, os especialistas entrevistados ressaltaram que a mudança de cultura proporcionada pela implantação do TPC pode ter contribuído nos resultados da eficiência. A compreensão teórica dos cinco passos de focalização e, principalmente, a busca constante na identificação de gargalos alterou a rotina das três linhas de produtos. Assim, considera-se que a implantação do TPC foi beneficiada pelas pessoas que mudaram a cultura e estavam dispostas a melhorar os índices de eficiência da empresa. Foi comentado pelo analista de PCP (A), que a participação da alta direção nas primeiras reuniões e etapas iniciais de implantação do TPC foram essenciais, pois demonstrou apoio e propôs maior foco nas discussões sobre o assunto.

Nesse sentido, conclui-se que para a implantação do TPC fatores qualitativos foram influentes em obter o foco dos funcionários para implementar uma mudança cultural no sistema produtivo da empresa. Após as análises dos efeitos do TPC, a próxima seção sintetiza as análises dos resultados da eficiência produtiva das três linhas de produtos.

### 5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A análise do comportamento da eficiência das três linhas de produtos (computadores, *displays* e eletrônicos) apresentou resultados da Análise Envoltória de Dados (DEA) e comparou os escores da eficiência composta dos 48 meses de produção. Em seguida, as hipóteses foram testadas para avaliar o efeito da implantação do TPC sobre a eficiência produtiva das três linhas de produtos. O Quadro 19 sintetiza as hipóteses testadas e os resultados obtidos.

Quadro 19 - Hipóteses de pesquisa testadas e resultados

Linha de produto	Hipóteses testadas	Resultado
Computadores	<b>H<sub>1</sub> (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.	Aceita H <sub>1</sub>
<i>Displays</i>	<b>H<sub>1</sub> (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.	Aceita H <sub>1</sub>
Eletrônicos	<b>H<sub>0</sub> (hipótese nula):</b> Não existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo.	Aceita H <sub>0</sub>

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse sentido, é apresentada na Tabela 22 a síntese dos resultados da eficiência das três linhas de produtos no período anterior e posterior à implantação do TPC. O período considerado na coluna “Pré” da Tabela 22 abrange desde a DMU1 até DMU21 (localizada no período de transição da implantação do TPC), e o período considerado na coluna “Pós” desde a DMU22 até DMU48.

Tabela 22 - Variação da eficiência das três linhas de produtos

Linha	Pré	Pós	Variação ( $\Delta\%$ )
Computadores	0,47	0,58	19%
<i>Displays</i>	0,53	0,63	16%
Eletrônicos	0,51	0,53	4%

Fonte: Dados da pesquisa

Observa-se que o melhor desempenho obtido pós implantação do TPC foi na linha de computadores, seguido por *displays* e eletrônicos. Quanto às análises efetuadas na linha de computadores, foi aceita a hipótese alternativa  $H_1$ , ou seja, se identificou que existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo. Os efeitos percebidos podem ser considerados positivos, ou seja, a implantação do TPC elevou a eficiência produtiva da linha de computadores.

Para compreender os efeitos que levaram a linha de computadores a obter este resultado realizou-se uma avaliação dos resultados com os especialistas no processo. Foi apontado que a linha de computadores é considerada a mais complexa, com diferentes etapas durante o processo de montagem e testes exigidos, uma característica existente em sistemas ETO personalizados (HICKS; MCGOVERN; EARL, 2000).

A comunicação entre as diferentes etapas do processo contribuiu para o resultado da eficiência, uma vez que antes da implantação do TPC haviam dificuldades em priorizar quais produtos deveriam ser entregues antes. Para minimizar esta dificuldade, iniciou-se a utilização dos relatórios do TPC classificados pelo diagrama de cores (preto, vermelho, amarelo e verde), para facilitar a compreensão dos envolvidos no processo e focalizar esforços nas ordens de produção prioritárias. Assim, é possível compreender que os relatórios do TPC melhoraram a comunicação nas três linhas de produtos, porém o maior impacto foi evidenciado na linha de computadores.

Durante o período de implantação do TPC os funcionários foram convidados a fornecer ideias e compartilhar a experiência da rotina de trabalho. Como resultado, houve maior comprometimento dos funcionários para melhorar os relatórios de priorização do TPC, difundir o conhecimento sobre o TPC e atuar como facilitadores nas áreas produtivas.

No que se refere às análises efetuadas na linha de *displays*, foi aceita a hipótese alternativa  $H_1$ , pois se identificou que existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo. Assim como na linha de computadores, os efeitos percebidos podem ser considerados positivos, ou seja, a implantação do TPC elevou a eficiência produtiva da linha de *displays*.

Por fim, em relação às análises efetuadas na linha de eletrônicos, foi aceita a hipótese nula  $H_0$ , uma vez que se identificou não existirem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo produtivo. Os efeitos percebidos podem ser considerados imparciais, ou seja, a implantação do TPC não elevou significativamente a eficiência produtiva da linha de eletrônicos. Na linha de eletrônicos, o menor crescimento da eficiência quando comparado as demais, é atribuído a variabilidade dos produtos. Esta linha possui produtos considerados complexos e outros simples, o que causa dificuldade para gerenciar os recursos. A associação de produtos por famílias com nível de complexidade similar, tende a proporcionar benefícios no resultado da eficiência em empresas que atuam em sistemas ETO.

Além de proporcionar os escores de eficiência das três linhas de produtos, o cálculo do DEA permite uma avaliação das folgas. A ordem da maior variação média das folgas é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 - Ordem da variação médias das folgas

Variável	Nome	Computadores	Displays	Eletrônicos	Varição global
<i>input01</i>	Tempo de Produção	1º	4º	5º	3º
<i>input02</i>	Lead time	3º	7º	8º	7º
<i>input03</i>	Número de Funcionários	2º	5º	4º	4º
<i>input04</i>	Número de Reclamações	8º	8º	2º	7º
<i>input05</i>	WIP	4º	2º	3º	2º
<i>output01</i>	Pedidos no Prazo	5º	6º	5º	5º
<i>output02</i>	Produto Acabado	6º	1º	1º	1º
<i>output03</i>	Refugo	7º	3º	7º	6º

Fonte: Dados da pesquisa

A avaliação conjunta das folgas demonstra que a variável Produto Acabado (*output02*) apresenta a maior variação média global, com maior impacto na linha de *displays* e eletrônicos. Contudo, conforme abordado em profundidade nas análises das folgas em cada linha de produto, em termos absolutos a variação é pequena e não possui resultados representativos que contribuam para a análise. Assim, não é possível afirmar que o TPC influenciou na redução da folga da variável Produto Acabado (*output02*).

A variável *WIP (input05)* apresenta a segunda maior variação média global, com maior impacto na linha de *displays*. Os resultados apontam que houve uma redução na quantidade de produtos em processamento (*WIP*) nas três linhas de produtos e este, pode ser considerado o maior benefício proporcionado pela implantação do TPC no sistema ETO estudado. Na prática, a etapa de produção mais lenta de cada linha estabelece o ritmo das entregas e assim, as etapas posteriores se ajustam conforme a “batida” e evitam a formação dos estoques intermediários. É válido ressaltar que apesar da redução dos produtos em *WIP*, as linhas de produção mantêm quantidades de produtos em processamento (*buffers*) para proteger eventuais problemas que possam ocorrer em alguma etapa do processo, em especial antes dos recursos críticos.

Além disso, ao estabelecer a etapa de produção mais lenta, os supervisores das linhas de produção junto com os analistas de PCP e engenharia de manufatura incentivam os funcionários a exercer os cinco passos de focalização da TOC. O resultado é evidenciado na variável Tempo de Produção (*input01*), que pode ser considerado o segundo maior ganho proporcionado pela implantação do TPC. Dada a característica do sistema ETO, com produtos personalizados, diferentes etapas e datas de entregas (BERTRAND; MUNTSLAG, 1993), a participação dos funcionários para elevar as restrições é importante. Este ponto pode ser compreendido como uma ferramenta de melhoria contínua que impactou os resultados dos tempos de fabricação.

As maiores folgas médias foram registradas na variáveis *Lead time (input02)*. Apesar da definição em quebrar os grandes lotes de produção e produzir apenas as quantidades necessárias de submontagens, o efeito positivo surgiu apenas na linha de computadores, sendo considerada a terceira variável mais relevante. Para a linha de *displays* e eletrônicos, a maior folga pode ser relacionada à customização existente e à produção de novos produtos durante o período de análise, aumentando a variabilidade dos processos.

Por fim, a variável Número de Reclamações (*input04*) também apresentou as maiores folgas médias. Este resultado aponta que nas linhas de computadores e *displays* houve uma diminuição da qualidade dos produtos entregues, possivelmente devido a inclusão de novos produtos. Ainda durante as entrevistas exploratórias, foi informado que a linha de *displays* também teve a inclusão de novos produtos durante o período analisado e, assim, o grupo entrevistado relacionou que o número de

reclamações pode estar associado ao nível de absorção da produção a um novo produto. Se os funcionários estiverem melhor preparados para iniciar a produção de um novo produto, o índice de falhas e o número de reclamações dos clientes tendem a diminuir. Também foi citado que novos produtos foram incluídos na linha de computadores, pois a variação média das folgas da variável Número de Reclamações (*input04*) na linha de computadores foi o pior caso registrado.

Após apresentar a síntese com os resultados das hipóteses de pesquisa testada, variação da eficiência e variação das folgas nas três linha de produtos, na próxima seção, apresenta-se a discussão acerca dos resultados obtidos.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A pesquisa efetuada contribui para o conhecimento sobre a Teoria das Restrições (TOC), em especial ao tema Tambor-Pulmão-Corda (TPC). Apesar de muitas pesquisas terem sido desenvolvidas com o propósito de expor os resultados da aplicação do método TPC (BETTERTON; COX, 2009; MABIN; BALDERSTONE, 2003), não foram encontradas aplicações do TPC em sistemas produtivos de Engenharia sob Encomenda (ETO) como esta pesquisa propõem.

Nesse sentido, entende-se que o estudo contribui para a teoria, pois apresenta evidências empíricas dos benefícios proporcionados pela utilização do TPC em um sistema produtivo ETO. Esses benefícios podem ser entendidos como uma melhoria na eficiência produtiva das linhas de computadores e *displays* e, estão alinhados com a proposição dos autores Little et al. (2000), que identificam a necessidade de planejamento e programação como um fator chave na performance de empresas ETO. Assim como no trabalho de Rhee et al. (2010), que mostram como a aplicação prática do TPC em um gerenciamento de processos pode trazer resultados positivos na eficiência da empresa.

Ainda, a literatura sobre ETO aponta que as empresas deste segmento precisam de processos internos ágeis e eficientes para manter-se em um ambiente competitivo (CHEN, 2006) e, em vários casos sofrem com tempos de atravessamento e tempos de ciclos diferentes entre os produtos, não permitindo uma sincronização adequada da produção (MATT; DALLASEGA; RAUCH, 2014). Portanto, os resultados da eficiência produtiva pós implantação do TPC apresentados nesta pesquisa, reforçam que é possível manter empresas em um ambiente competitivo e utilizar o TPC como uma ferramenta para priorizar e sincronizar a produção de diferentes produtos. A comprovação dos benefícios preenche as lacunas apontadas na literatura.

Outra contribuição desta pesquisa é a evidência de que a implantação do TPC alterou a cultura dos funcionários, assim como nos estudos de Umble et al. (2014), que ao final da implantação do TPC em uma indústria japonesa, identificou que os gerentes compreenderam como a TOC mudou a cultura comum da empresa. Entende-se que a presente pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre TPC, os resultados complementam os achados da literatura e estabelece um diálogo com a comunidade acadêmica sobre o tema. O Quadro 20 sintetiza os achados da literatura e do estudo de caso.

Quadro 20 - Efeitos do TPC da literatura e estudo de caso

Literatura	Estudo de caso
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A implantação do TPC apresenta aumento da eficiência (BETTERTON; COX, 2009; GONZALEZ-R; FRAMINAN; RUIZ-USANO, 2010; MABIN; BALDERSTONE, 2003; RHEE; CHO; BAE, 2010; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2014)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TPC apresenta resultados positivos na eficiência</li> <li>• Pós implantação do TPC houve melhor aproveitamento dos recursos</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• TPC auxilia na focalização e direcionamento de recursos (BETTERTON; COX, 2009; WU; LIU, 2008)</li> <li>• TPC proporciona maior visibilidade e estabilidade nas operações (WAHLERS; COX, 1994)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TPC facilita a priorização</li> <li>• TPC melhora a comunicação entre as etapas produtivas</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• TPC contribui para reduzir o tempo de produção e aumentar o desempenho das entregas (WAHLERS; COX, 1994)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TPC melhora os resultados das variáveis Tempo de Produção e <i>Lead time</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• TPC representa uma mudança na cultura comum da empresa (UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2014)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os resultados são impulsionados pela mudança cultural do TPC</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não encontrado efeito correspondente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta variabilidade pode comprometer os resultados do TPC</li> <li>• Foco dos funcionários envolvidos no projeto do TPC é importante</li> <li>• Participação da alta direção nas reuniões influencia os resultados</li> <li>• TPC é aplicável na manufatura de produtos complexos</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

Considera-se também que, apesar da literatura analisada comentar sobre os resultados proporcionados pela utilização do TPC, não explica como medir a eficiência. Nesse sentido, entende-se como uma contribuição para a teoria apresentar e utilizar a DEA para medir a eficiência do sistema produtivo pré e pós a implantação do TPC. A utilização do DEA para medir a eficiência apresenta um crescimento significativo (EMROUZNEJAD; YANG, 2017) desde os estudos seminais de Charnes, Cooper e Rhodes (1978). Os modelos e análise das folgas desenvolvidos para as análises das três linhas de produtos podem servir de apoio para outros estudos que proponham efetuar medições de efeitos da implantação do TPC utilizando DEA.

A pesquisa realiza uma análise estatística e aplica testes de hipóteses paramétricos (ANOVA) e não paramétricos (Wilcoxon) para validar ou refutar os resultados encontrados. Esta etapa, confirma a hipótese alternativa  $H_1$  de que existem evidências dos efeitos da implantação do TPC sobre a eficiência do processo

produtivo das linhas de computadores e *displays*. Em seguida, em uma análise qualitativa, discute-se os efeitos apontados pelos especialistas do processo que influenciaram no processo de implantação do TPC. A relação dos efeitos é uma contribuição para a literatura sobre TPC e destaca pontos a serem ressaltados em futuras aplicações do TPC em empresas ETO.

Outra contribuição desta pesquisa para a teoria é a evidência de que a implantação do TPC apresentou efeitos de maior amplitude na linha de computadores e *displays* em detrimento da linha de eletrônicos. Não foi identificado na teoria a medição de estudos em uma única empresa com diferentes resultados. A análise individual das diferentes linhas de produtos pode abrir caminho para medições individuais das linhas de produtos em empresas que se encaixam nesta característica.

No âmbito das contribuições para a empresa, o trabalho corrobora com as medições da eficiência e comprova os benefícios com a implantação do TPC. Ressalta-se que esses benefícios ainda não haviam sido mensurados. Quando apresentados os resultados aos especialistas da empresa os mesmos indicaram que as orientações sugeridas por esta análise podem ser úteis como parâmetros para elaborar novos projetos de melhoria na eficiência produtiva. Os especialistas da empresa também apontaram que os resultados obtidos a partir do modelo da DEA são concisos e correspondem com a expectativa. Também foi comentado que as análises de folgas e alvos podem servir como guias para estabelecer metas de otimização dos *inputs* e *outputs* utilizados no modelo DEA.

A utilização da DEA para comparação das três diferentes linhas de produtos é relevante para a empresa efetuar medições comparativas. Tal técnica pode ser replicada nos próximos anos e comparar um período maior. A partir dos resultados da eficiência produtiva os gestores podem estabelecer metas para a melhoria dos resultados organizacionais. A seleção das variáveis *inputs* e *outputs* utilizadas na DEA foi apontada pelos especialistas do processo como um ponto relevante do trabalho, uma vez que as linhas de produtos são medidas por vários indicadores que podem ser substituídos pelo cálculo de eficiência em DEA. Outra característica indicada pelos especialistas é que o acompanhamento da eficiência ao longo do tempo fornece uma base concreta para avaliar o impacto da utilização dos recursos.

Por fim, o trabalho contribui para as empresas de ETO, pois pode servir de base para a implantação do TPC em outras organizações com a mesma característica, visto que demonstra, de forma empírica, que existem benefícios com o uso do TPC.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou analisar os efeitos da implantação do Tambor-Pulmão-Corda (TPC) sobre a eficiência técnica em um sistema produtivo de Engenharia sob Encomenda (ETO). Para cumprir o objetivo proposto, realizou-se um estudo de caso em uma empresa fabricante de componentes eletrônicos do ramo de defesa aeroespacial utilizando a técnica da Análise Envoltória de Dados (DEA). O emprego da DEA proporcionou um meio eficaz para avaliar o comportamento da eficiência nas três linhas de produtos (computadores, *displays* e eletrônicos) na empresa objeto de estudo.

Ao avaliar os resultados da DEA, verificou-se que existem indícios de que a implantação do TPC auxiliou o sistema produtivo da empresa a melhorar, ou seja, a elevar os escores da eficiência produtiva nas linhas de produtos do tipo computadores e *displays*. No entanto, os efeitos da implantação do TPC na linha de produtos eletrônicos não apresentaram resultados percebidos significativos.

Entende-se que a melhoria na eficiência produtiva observada em duas linhas de produtos (computadores e *displays*) pode ser atribuída à implantação do TPC, levando em consideração que, para fins confirmatórios, nenhum outro projeto de melhoria, aumento no quadro funcional, investimento em infraestrutura ou alteração significativa nos meios produtivos foi realizado no período de análise do modelo DEA. Com base nas entrevistas qualitativas, pôde-se compreender que a implantação do TPC na linha de eletrônicos não apresentou uma melhora significativa na eficiência devido a variabilidade da família de produtos.

Durante as avaliações estatísticas foram aplicados os testes de hipóteses paramétricos (ANOVA) e não paramétricos (Wilcoxon) para confirmar se existem evidências de melhoria na eficiência produtiva pós implantação do TPC. Para facilitar a compreensão, os escores foram divididos nos períodos anterior e posterior à implantação do TPC. Com base nos resultados, pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre os grupos de eficiência nas linhas de computadores e *displays* e que não existem diferenças significativas entre os grupos de eficiência da linha de eletrônicos. Assim, a diferença observada é que existem variações no escore da eficiência produtiva nas três linhas de produtos no período anterior e posterior à implantação do TPC.

Por fim, efetuou-se uma avaliação dos efeitos percebidos pós implantação do TPC pelos especialistas da empresa, com a apresentação dos escores da eficiência e folgas referente às três linhas de produtos. Os resultados obtidos nessa etapa qualitativa permitem afirmar que existem características que influenciaram os resultados da implantação do TPC nas três linhas, tais como introdução de novos produtos na produção, comunicação, nível de foco e resistência dos funcionários à mudança.

Sob o ponto de vista teórico, entende-se que a presente pesquisa apresenta contribuições para a teoria existente sobre Teoria das Restrições (TOC), em especial sobre o tema TPC com uma aplicação prática em um sistema produtivo ETO. A contribuição consiste na apresentação de evidências empíricas de que a implantação do TPC proporciona benefícios para um sistema produtivo ETO, alinhado com a proposição dos autores Little et al. (2000) que identificam a necessidade de planejamento e programação como um fator chave na performance de empresas ETO. Neste trabalho, esses benefícios podem ser entendidos como a melhoria na eficiência nas linhas de produtos do tipo computadores e *displays*, uma vez que são escassas as aplicações do TPC em sistemas produtivos ETO.

Sob o ponto de vista prático, entende-se que por meio da presente pesquisa é possível demonstrar aos gestores os efeitos da implantação do TPC na empresa, pois a medição destes efeitos ainda não havia sido mensurada. Outra contribuição é que a utilização da DEA e análise das folgas para comparar as três linhas de produtos é relevante para a empresa efetuar medições do escore de eficiência e, a partir dos resultados, os gestores poderão estabelecer metas para aproveitamentos dos recursos e, por consequência, a melhoria dos resultados organizacionais. As evidências apresentadas, podem servir de suporte para a aplicação do TPC em sistemas produtivos ETO, visto que demonstra, de forma empírica, que existem benefícios.

Apesar das contribuições citadas, esta pesquisa apresenta limitações. No que se refere ao modelo DEA, foi avaliada somente a planta produtiva não sendo possível a replicação dos resultados para as demais unidades industriais internacionais. Nesse sentido, foi necessário realizar uma análise longitudinal das três linhas de produtos existentes na empresa e utilizar a unidade de tomada de decisão (DMU) com o melhor escore de eficiência como a DMU de referência (*benchmark*) para as demais. Outra característica considerada como limitador foi não considerar produtos de engenharia

e protótipos, pois os processos produtivos não estão completamente estabelecidos e são passíveis de distorcer os resultados do modelo DEA.

O presente estudo oferece oportunidade para discutir novas pesquisas referentes à implantação do TPC em sistemas produtivos ETO e medir a eficiência em empresas para avaliar se a implantação do TPC nos processos apresenta resultados positivos. Pesquisas futuras podem realizar análises sobre os efeitos da implantação do TPC em outros sistemas produtivos ETO. Também se pode efetuar um *benchmarking* externo entre as outras unidades industriais internacionais da empresa em estudo e, por meio disso, desenvolver as melhores práticas que influenciaram positivamente na implantação do TPC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCUTRON INC. **SMT (Surface Mount Technology) Assembly**. Disponível em: <<http://www.accutroninc.com/smt-assembly>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

ADVB/RS. **Prêmio Exportação RS 2018 reconhece 55 empresas no dia 7 de junho | ADVB/RS**. Disponível em: <<http://www.advb.com.br/site/noticia/premio-exportacao-rs-2018-reconhece-55-empresas-no-dia-7-de-junho/>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

AIA. **Facts & Figures 2018**. Disponível em: <[http://www.aia-aerospace.org/wp-content/uploads/2018/07/2018\\_-Annual-Report\\_Web.pdf](http://www.aia-aerospace.org/wp-content/uploads/2018/07/2018_-Annual-Report_Web.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2019.

ALIREZAEI, M.; TANHA, M. R. Extending the Malmquist index to consider the balance factor of decision making units in a productivity analysis. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 27, n. 3, p. 439–452, 2016.

AMARO, G. et al. Competitive advantage, customisation and a new taxonomy for non make-to-stock companies. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 4, p. 349–371, 1999.

ASD. **Key Facts & Figures 2015**. Disponível em: <[https://www.asd-europe.org/sites/default/files/atoms/files/ASD\\_F\\_F2015\\_web\\_spreads\\_Nov.pdf](https://www.asd-europe.org/sites/default/files/atoms/files/ASD_F_F2015_web_spreads_Nov.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2019.

BANKER, R. D. et al. An Introduction to Data Envelopment Analysis with Some of its Models and Their Uses. **Research in Governmental and Non-Profit Accounting**, v. 5, p. 125–163, 1989.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, 1984.

BARBOSA, L. M. et al. Exploratory analysis of the variables prevailing on the effects of product modularization on production volume and efficiency. **International Journal of Production Economics**, v. 193, n. April, p. 677–690, 2017.

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

BARRATT, M.; CHOI, T. Y.; LI, M. Qualitative case studies in operations management: Trends, research outcomes, and future research implications. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 4, p. 329–342, 2011.

BBC. **Entenda por que a produtividade no Brasil não cresce**. Disponível em: <[http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/05/140519\\_produtividade\\_porque\\_ru](http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/05/140519_produtividade_porque_ru)>. Acesso em: 29 mar. 2018.

BERTRAND, J. W. M.; MUNTSLAG, D. R. Production control in engineer-to-order firms. **International Journal of Production Economics**, v. 31, p. 3–22, 1993.

BETTERTON, C. E.; COX, J. F. Espoused drum-buffer-rope flow control in serial lines: A comparative study of simulation models. **International Journal of Production Economics**, v. 117, n. 1, p. 66–79, 2009.

BNDES. **A indústria aeronáutica no Brasil: evolução recente e perspectivas**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>>. Acesso em: 27 jan. 2019.

BRAGLIA, M. et al. Lean manufacturing tool in engineer-to-order environment: Project cost deployment. **International Journal of Production Research**, v. 0, n. 0, p. 1–15, 2018.

BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust tests for the equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, v. 69, n. 346, p. 364–367, 1974.

CAMP, R. C. **Benchmarking: O caminho da qualidade total**. 3. ed. São Paulo: Pioneira, 1998.

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

CAUCHICK, P. A. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2012.

CHANDRA, P. et al. Using DEA to evaluate 29 Canadian textile companies - Considering returns to scale. **International Journal of Production Economics**, v. 54, n. 2, p. 129–141, 1998.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429–444, 1978.

CHEN, C. S. Concurrent Engineer-To-Order operation in the Manufacturing Engineering Contracting industries. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 1, n. 1-2, p. 37–58, 2006.

CLAASEN, N. et al. Applying a transdisciplinary mixed methods research design to explore sustainable diets in rural South Africa. **International Journal of Qualitative Methods**, p. 69–92, 2015.

COELLI, T. J. et al. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2ed. ed. New York: Springer, 2005. v. 41

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA) - Thirty years on. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 1, p. 1–17, 2009.

COOK, W. D.; TONE, K.; ZHU, J. Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. **Omega (United Kingdom)**, v. 44, p. 1–4, 2014.

CORBETT, T. **Bússola Financeira: o processo decisório da Teoria das Restrições**. São Paulo: Nobel, 2005.

COX III, J. F., SCHLEIR, J. G. **Handbook da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

DALGAARD, P. **Introductory Statistics with R**. 2. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2008. v. 15

DEBREU, G. The Coefficient of Resource Utilization. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, v. 19, n. 3, p. 273–292, 1951.

DRESCH, A. et al. **Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DUMAN, G. M. et al. A holistic approach for performance evaluation using quantitative and qualitative data: A food industry case study. **Expert Systems with Applications**, v. 81, p. 410–422, 2017.

DUNNING, H. et al. A mixed method approach to quality of life research: A case study approach. **Social Indicators Research**, v. 85, n. 1, p. 145–158, 2008.

DÜZAKIN, E.; DÜZAKIN, H. Measuring the performance of manufacturing firms with super slacks based model of data envelopment analysis: An application of 500 major industrial enterprises in Turkey. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n. 3, p. 1412–1432, 2007.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case studies. **The Academy of Management Review**, v. 0, n. 14, p. 532–550, 1989.

ELGH, F. Advanced Engineering Informatics Decision support in the quotation process of engineered-to-order products. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, n. 1, p. 66–79, 2012.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. LIANG. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016. **Socio-Economic Planning Sciences**, p. 1–5, 2017.

FÄRE, R. et al. **The Measurement of Efficiency of Production**. 6. ed. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1985. v. 157

FÄRE, R. et al. **The Measurement of Efficiency in Production**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013.

FARRELL, M. J. The Measurement of Productive Efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**, v. 120, n. 3, p. 253, 1957.

FERREIRA, C.; GOMES, A. **Introdução à Análise Envoltória de Dados, Teoria, Modelos e Aplicações**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009.

FRIEDMAN, L.; SINUANY-STERN, Z. Combining ranking scales and selecting variables in the DEA context: The case of industrial branches. **Computers and Operations Research**, v. 25, n. 9, p. 781–791, 1998.

GASTWIRTH, J. L. et al. The Impact of Levene 's Test of Equality of Variances on Statistical Practice. **Statistical Science**, v. 24, n. 3, p. 343–360, 2009.

GILSA, C. VON. **Avaliação longitudinal da eficiência e fator total de produtividade em uma empresa petroquímica a partir da análise envoltória de dados (DEA) e o índice de malmquist**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2012.

GILSA, C. VON et al. Longitudinal evaluation of efficiency in a petrochemical company. **Benchmarking**, v. 24, n. 7, p. 1786–1813, 2017.

GOLANY, B.; ROLL, Y. An application procedure for DEA. **Omega**, v. 17, n. 3, p. 237–250, 1989.

GOLDRATT, E. **The Haystack Syndrome: Setting Information Out Of The Ocean**. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1990.

GOLDRATT, E. M. Computerized shop floor scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 26, n. 3, p. 443–455, 1988.

GOLDRATT, E. M. **It's Not Luck**. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1994.

GOLDRATT, E. M. **Critical Chain**. Great Barrington, MA: North River Press, 1997.

GOLDRATT, E. M. et al. **Necessary But Not Sufficient**. NY: North River Press, 2000.

GOLDRATT, E. M. **The Strategy & Tactic tree Reliable Rapid Response**. Disponível em: <<https://public.wsu.edu/~enrgmgt/holt/em534/SandTRRR.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2018.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **The Goal**. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1984.

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. **The Race**. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1986.

GOMES, S. B. V.; BARCELLOS, J. A.; FONSECA, P. V. DA R. **Internacional Support To the Development of the Aerospace and Defense Sector: Perspectives of the International Experience**. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/setor-aeroespacial-defesa>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

GONZALEZ-R, P. L.; FRAMINAN, J. M.; RUIZ-USANO, R. A multi-objective comparison of dispatching rules in a drum-buffer-rope production control system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 23, n. 2, p. 155–167, 2010.

GOSLING, J.; NAIM, M. M. Engineer-to-order supply chain management: A literature review and research agenda. **International Journal of Production Economics**, v. 122, n. 2, p. 741–754, 2009.

GUPTA, A. et al. Fundamental Concepts of Theory of Constraints: An Emerging Philosophy. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 4, n. 10, p. 595 – 601, 2010.

GUPTA, M. C.; BOYD, L. H. Theory of constraints: a theory for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 10, p. 991–1012, 2008.

HADI-VENCHEH, A. et al. On the input/output reduction in efficiency measurement. **Measurement**, v. 50, n. 1, p. 244–249, 2014.

HAFEZALKOTOB, A. et al. Robust DEA under discrete uncertain data: A case study of Iranian electricity distribution companies. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 11, n. 2, p. 199–208, 2015.

HAIR, J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009.

HAYNES, E.; DINC, M. **Data Envelopment Analysis (DEA)**. .: Encyclopedia of Social Measurement, 2005. v. 1

HICKS, C.; MCGOVERN, T. Product life cycle management in engineer-to-order industries. **International Journal of Technology** ..., v. 48, n. 2, p. 153–167, 2009.

HICKS, C.; MCGOVERN, T.; EARL, C. F. Supply chain management: A strategic issue in engineer to order manufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 65, n. 2, p. 179–190, 2000.

HILL, T.; NICHOLSON, A.; WESTBROOK, R. Closing the gap: a polemic on plant-based research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 2, p. 139–156, 1999.

IPC. **IPC-A-610: Acceptability of Electronic Assemblies**. Disponível em: <<http://shop.ipc.org/IPC-A610G-English-D>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

JAIN, S.; TRIANTIS, K. P.; LIU, S. Manufacturing performance measurement and target setting: A data envelopment analysis approach q. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 616–626, 2011.

JAYANTHI, S.; SINHA, K. K. Innovation implementation in high technology manufacturing: A chaos-theoretic empirical analysis. **Journal of Operations Management**, v. 16, n. 4, p. 471–494, 1998.

JENKINS, L.; ANDERSON, M. A multivariate statistical approach to reducing the number of variables in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 147, n. 1, p. 51–61, 2003.

KEH, H. T.; CHU, S. Retail productivity and scale economies at the firm level: A DEA approach. **Omega**, v. 31, n. 2, p. 75–82, 2003.

KENGPOL, A.; TUAMMEE, S. The development of a decision support framework for a quantitative risk assessment in multimodal green logistics: an empirical study. **International Journal of Production Research**, v. 7543, n. September, p. 1–19, 2015.

KIM, S.; MABIN, V. J.; DAVIES, J. The theory of constraints thinking processes: retrospect and prospect. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 2, p. 155–184, 2008.

KIM, S.; ROSCOE DAVIS, K.; COX, J. F. An investigation of output flow control, bottleneck flow control and dynamic flow control mechanisms in various simple lines scenarios. **Production Planning and Control**, v. 14, n. 1, p. 15–32, 2003.

KLOS, S. A model of an ERP-based knowledge management system for engineer-to-order enterprises. **Communications in Computer and Information Science**, v. 639, p. 42–52, 2016.

KOH, S.-G.; BULFIN, R. L. Comparison of DBR with CONWIP in an unbalanced production line with three stations. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 2, p. 391–404, 2004.

KONIJNENDIJK, P. A. Coordinating marketing and manufacturing in ETO companies. **International Journal of Production Economics**, v. 37, n. 1, p. 19–26, 1994.

KOOPMANS, T. **Activity analysis of production and allocation**. New York: John Wiley & Sons, 1951.

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LAMPE, H. W.; HILGERS, D. Trajectories of efficiency measurement: A bibliometric analysis of DEA and SFA. **European Journal of Operational Research**, v. 240, n. 1, p. 1–21, 2015.

LANDIM, F. M. P. F. **Testes de Hipóteses**. Disponível em: <[http://www.im.ufrj.br/flavia/mad342/aula05\\_mad342.pdf](http://www.im.ufrj.br/flavia/mad342/aula05_mad342.pdf)>. Acesso em: 2 fev. 2019.

LEONARD-BARTON, D. A Dual Methodology for Case Studies: Synergistic Use of a Longitudinal Single Site with Replicated Multiple Sites. **Organization Science**, v. 1, n. 3, p. 248–266, 1990.

LEWIS, M. W. Iterative triangulation: a theory development process using existing case studies. **Journal of Operations Management**, v. 16, n. 4, p. 455–469, 1998.

LI, H.; AMINI, M. A hybrid optimisation approach to configure a supply chain for new product diffusion: A case study of multiple-sourcing strategy. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 11, p. 3152–3171, 2012.

LINS, M. P. E.; MEZA, L. **Análise Envoltória de Dados e perspectivas de integração no ambiente de Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2000.

LITTLE, D. et al. Integrated planning and scheduling in the engineer-to-order sector. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 13, n. 6, p. 545–554, 2000.

LIU, J. S. et al. Research fronts in data envelopment analysis. **Omega (United Kingdom)**, v. 58, p. 33–45, 2016.

LOCKAMY, A.; COX, J. F. **Reengineering performance measurement: how to align systems to improve processes, products, and profits**. Michigan: Irwin Professional Publishing, 1994.

LU, W. M.; HUNG, S. W. Assessing the performance of a vertically disintegrated chain by the DEA approach—a case study of Taiwanese semiconductor firms. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 4, p. 1155–1170, 2010.

MABIN, V. J.; BALDERSTONE, S. J. The performance of the theory of constraints methodology. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 23, n. 6, p. 568–595, 2003.

MANIKAS, A.; GUPTA, M.; BOYD, L. Experiential exercises with four production planning and control systems. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 14, p. 4206–4217, 2015.

MARIANO, E. B. et al. **Princípios Básicos Para Uma Proposta De Ensino Sobre Análise Envoltória de Dados**. Cobenge 2006. **Anais...2006**

MATT, D. T.; DALLASEGA, P.; RAUCH, E. Synchronization of the manufacturing process and on-site installation in ETO companies. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 457–462, 2014.

MATT, D. T.; DALLASEGA, P.; RAUCH, E. On-site oriented capacity regulation for fabrication shops in Engineer-to-Order companies (ETO). **Procedia CIRP**, v. 33, p. 197–202, 2015.

MCCUTCHEON, D. M.; MEREDITH, J. R. Conducting case study research in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 11, n. 3, p. 239–256, 1993.

MENG, W. et al. Two-level DEA approaches in research evaluation. **Omega**, v. 36, n. 6, p. 950–957, 2008.

MIGON, M.; MONTORO, G. **Cadeia produtiva aeronáutica brasileira: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: BNDES, 2009. v. 1

MOLINA, A. et al. Virtual enterprise brokerage : a structure-driven strategy to achieve build to order supply chains. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 17, p. 3853–3880, 2007.

MUNTSLAG, D. R. Profit and risk evaluation in customer driven engineering and manufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 36, n. 1, p. 97–107, 1994.

NANCI, L. C.; AZEVEDO, S. M.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B. Estudo da eficiência de empresas distribuidoras de jornais usando análise envoltória de dados. **Produto & Produção**, v. 7, p. 27–35, 2004.

O GLOBO. **Nosso maior problema é a baixa produtividade**. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/vendas-no-varejo-caem-13-tem-pior-setembro-em-18-anos-23231652/nosso-maior-problema-a-baixa-produtividade-diz-scheinkman-1-23227130>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

OLSTAD, D. L. et al. Adopting and implementing nutrition guidelines in recreational facilities: Public and private sector roles. A multiple case study. **BMC Public Health**, v. 12, n. 1, p. 4–10, 2012.

PARK, J. et al. Performance Evaluation of Research and Business Development: A Case Study of Korean Public Organizations. **Sustainability**, v. 9, n. 12, p. 2297, 2017.

PARK, J.; LEE, D.; ZHU, J. An integrated approach for ship block manufacturing process performance evaluation: Case from a Korean shipbuilding company. **International Journal of Production Economics**, v. 156, p. 214–222, 2014.

PINTO, M. A. C.; MIGON, M. N. Alternativas para o adensamento da cadeia produtiva aeronáutica brasileira: o “modelo europeu”. **Revista BNDES**, v. 24, p. 139–169, 2006.

PIRAN, F. A. S. et al. Product modularization and effects on efficiency: An analysis of a bus manufacturer using data envelopment analysis (DEA). **International Journal of Production Economics**, v. 182, p. 1–13, 2016.

PIRAN, F. S.; LACERDA, D. P.; CAMARGO, L. F. R. **Análise e Gestão da Eficiência**. 1. ed. Porto Alegre: Elsevier Editora, 2018.

PORTAL ACTION. **Sobre o Action Stat**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/sobre-o-action>>. Acesso em: 13 out. 2018.

POWELL, B. J. et al. A mixed methods multiple case study of implementation as usual in children’s social service organizations: study protocol. **Implementation science: IS**, v. 8, n. 1, p. 92, 2013.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2º. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PWC. **Aerospace Manufacturing Attractiveness Rankings**. Disponível em: <<https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-aerospace-manufacturing-attractiveness-rankings-2018.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

RHEE, S.-H.; CHO, N. W.; BAE, H. Increasing the efficiency of business processes using a theory of constraints. **Information Systems Frontiers**, v. 12, n. 4, p. 443–455, 2010.

ŞAFKAK, I. et al. Efficiency determination of the forest sub-districts by using fuzzy data envelopment analysis (case study: Denizli Forest Regional Directorate). **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 16, n. 3, p. 358–367, 2014.

SAGEPE. **Sistema para Análise e Gestão da Produtividade e Eficiência**. Disponível em: <<https://www.sagepe.com.br/>>. Acesso em: 3 jan. 2019.

SEIFORD, L.M., ZHU, J. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: Comment. **European Journal of Operational Research**, v. 142, n. 1, p. 16–20, 2002.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591, 1965.

SIEGEL, S. **Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences**. 1. ed. Michigan: McGraw-Hill, 1956.

SIRIKRAI, V.; YENRADEE, P. Modified drum-buffer-rope scheduling mechanism for a non-identical parallel machine flow shop with processing-time variation. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 17, p. 3509–3531, 2006.

SOUSA, R.; VOSS, C. A. Quality Management: Universal or Context Dependent? **Production and Operations Management**, v. 10, n. 4, p. 383–404, 2001.

SOUZA, I. G. et al. Do the improvement programs really matter? An analysis using data envelopment analysis. **BRQ Business Research Quarterly**, v. 21, n. 4, p. 225–237, 2018.

TAKAHASHI, K.; MORIKAWA, K.; CHEN, Y.-C. Comparing kanban control with the theory of constraints using Markov chains. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 16, p. 3599–3617, 2007.

TARNAUD, A. C.; LELEU, H. Portfolio analysis with DEA: Prior to choosing a model. **Omega (United Kingdom)**, v. 75, p. 1339–1351, 2018.

THÜRER, M. et al. Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 188, n. January 2016, p. 116–127, 2017.

UMBLE, M.; UMBLE, E.; MURAKAMI, S. International Journal of Production Implementing theory of constraints in a traditional Japanese manufacturing environment: The case of Hitachi Tool Engineering. **International Journal of Production Economics**, n. February 2014, p. 37–41, 2014.

VAN DE VEN, A. H.; HUBER, G. P. Longitudinal field research methods for studying processes of organizational change. **Organization Science**, v. 1, p. 213–219, 1990.

VOSS, C. et al. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.

VOTTO, R. G.; FERNANDES, F. C. F. Produção enxuta e teoria das restrições: proposta de um método para implantação conjunta na Indústria de Bens de Capital sob Encomenda. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 1, p. 45–63, 2014.

WAGNER, J. M.; SHIMSHAK, D. G. Stepwise selection of variables in data envelopment analysis: Procedures and managerial perspectives. **European Journal of Operational Research**, v. 180, n. 1, p. 57–67, 2007.

WAHLERS, J. L.; COX, J. F. Competitive factors and performance measurement: Applying the theory of constraints to meet customer needs. **International Journal of Production Economics**, v. 37, n. 2-3, p. 229–240, 1994.

WATSON, K. J. et al. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 2, p. 387–402, 2007.

WENG, J. et al. Acquiring Orders using Requirement Specifications for Engineer-to-Order Production. **Journal of Japan Industrial Management Association**, v. 64, p. 620–627, 2014.

WILCOXON, F. Individual comparisons of grouped data by ranking methods. **Journal of Economic Entomology**, v. 39, n. 6, p. 269, 1946.

WU, H. et al. Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry. **Omega (United Kingdom)**, v. 66, p. 38–47, 2017.

WU, H. H.; LIU, J. Y. A capacity available-to-promise model for drum-buffer-rope systems. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 8, p. 2255–2274, 2008.

YANG, B.; BURNS, N. Implications of postponement for the supply chain. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 9, p. 2075–2090, 2003.

YANG, L. Key practices , manufacturing capability and attainment of manufacturing goals : The perspective of project / engineer-to-order manufacturing. **International Journal of Project Management**, v. 31, n. 1, p. 109–125, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de Caso - Planejamento e Métodos**. [s.l: s.n.]. v. 2

ZADMIRZAEI, M. et al. Efficiency analysis of paper mill using data envelopment analysis models (case study: Mazandaran wood and paper company in Iran). **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 17, n. 6, p. 1381–1391, 2015.

ZHU, J. **Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking**. Cham: Springer International Publishing, 2014. v. 213

## ANEXO I - PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

As palavras-chave utilizadas durante o processo de pesquisa foram: *Drum-Buffer-Rope*, *Drum Buffer Rope*, DBR, Tambor-pulmão-corda, Tambor Pulmão Corda e TPC. Para atender ao requisito de pesquisa, uma das palavras-chave deve constar no título, resumo ou palavras-chave do trabalho. A busca por artigos e dissertações foi efetuada em bases de dados nacionais e internacionais. O Quadro 21 resume as fontes pesquisadas.

Quadro 21 - Bases de dados pesquisados

<b>Categoria</b>	<b>Fonte de informação</b>
Bases de informações de periódicos científicos internacionais	EBSCO (Todas as bases disponíveis) SCIENCE DIRECT SCIELO SCOPUS
Bases de informações de periódicos científicos nacionais	BDTD/IBCT – (Biblioteca digital brasileira de teses e dissertações (BDTD) /Instituto brasileiro de ciência e tecnologia) SCIELO

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas bases de dados acessadas foram aplicados filtros para remover áreas de pesquisa não relacionadas ao tema, tais como Física, Geologia, Ciência e Saúde, por exemplo.

Nas mesmas bases de dados citadas, efetuou-se um segundo estágio de pesquisa. Nesta fase, buscou-se identificar publicações que avaliaram os efeitos em geral da implantação do TPC em empresas ETO na eficiência em particular. Para efetuar essa pesquisa, foram combinadas as palavras-chave *Drum-Buffer-Rope* (Tambor-Pulmão-Corda), *Theory of constraints* (Teoria das restrições) e *Engineer to Order* (Engenharia sob encomenda) com: *Data envelopment analysis* (análise envoltória de dados), *Efficiency* (eficiência) e *Performance* (desempenho). No Quadro 22 é apresentada a estrutura de busca utilizada.

Quadro 22 - Critério de pesquisa nas bases de dados

<b>Fonte</b>	<b>Palavra-chave central</b>	<b>Conector</b>	<b>Palavra-chave de ligação</b>
Internacional	<i>Drum-Buffer-Rope</i> <i>Theory of constraints</i> <i>Engineer to Order</i>	<i>AND</i>	<i>Data envelopment analysis</i>
Internacional	<i>Drum-Buffer-Rope</i> <i>Theory of constraints</i> <i>Engineer to Order</i>	<i>AND</i>	<i>Efficiency</i>
Internacional	<i>Drum-Buffer-Rope</i> <i>Theory of constraints</i> <i>Engineer to Order</i>	<i>AND</i>	<i>Performance</i>
Nacional	Tambor-pulmão-corda Teoria das restrições Engenharia sob encomenda	E	Análise envoltória de dados
Nacional	Tambor-pulmão-corda Teoria das restrições Engenharia sob encomenda	E	Eficiência
Nacional	Tambor-pulmão-corda Teoria das restrições Engenharia sob encomenda	E	Desempenho

Fonte: Elaborado pelo autor

## ANEXO II - EFICIÊNCIA DA LINHA DE COMPUTADORES

Tabela 24 - Eficiência da linha de computadores

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Eficiência Invertida	Eficiência Composta	Eficiência C. Normalizada
DMU1	jul/14	0,99	0,88	<b>0,55</b>	0,85
DMU2	ago/14	0,74	1,00	<b>0,37</b>	0,57
DMU3	set/14	0,96	1,00	<b>0,48</b>	0,73
DMU4	out/14	0,68	1,00	<b>0,34</b>	0,52
DMU5	nov/14	1,00	0,83	<b>0,59</b>	0,89
DMU6	dez/14	1,00	0,84	<b>0,58</b>	0,88
DMU7	jan/15	0,75	1,00	<b>0,37</b>	0,57
DMU8	fev/15	0,74	1,00	<b>0,37</b>	0,56
DMU9	mar/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,76
DMU10	abr/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,76
DMU11	mai/15	0,86	1,00	<b>0,43</b>	0,65
DMU12	jun/15	1,00	0,97	<b>0,52</b>	0,79
DMU13	jul/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,76
DMU14	ago/15	0,87	1,00	<b>0,43</b>	0,66
DMU15	set/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,76
DMU16	out/15	0,88	0,90	<b>0,49</b>	0,75
DMU17	nov/15	0,90	1,00	<b>0,45</b>	0,68
DMU18	dez/15	1,00	0,89	<b>0,56</b>	0,85
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,34</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,59</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,47</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,08</b>
DMU19	jan/16	0,96	0,94	<b>0,51</b>	0,78
DMU20	fev/16	0,92	1,00	<b>0,46</b>	0,70
DMU21	mar/16	0,94	1,00	<b>0,47</b>	0,71
DMU22	abr/16	0,68	1,00	<b>0,34</b>	0,52
DMU23	mai/16	0,95	1,00	<b>0,47</b>	0,72
DMU24	jun/16	0,98	0,79	<b>0,60</b>	0,91
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,34</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,60</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,48</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,08</b>
DMU25	jul/16	0,74	1,00	<b>0,37</b>	0,56
DMU26	ago/16	0,97	0,81	<b>0,58</b>	0,88
DMU27	set/16	0,97	0,82	<b>0,58</b>	0,88
DMU28	out/16	1,00	0,93	<b>0,53</b>	0,81
DMU29	nov/16	1,00	0,69	<b>0,66</b>	1,00
DMU30	dez/16	1,00	0,78	<b>0,61</b>	0,93
DMU31	jan/17	1,00	0,95	<b>0,53</b>	0,80
DMU32	fev/17	1,00	0,71	<b>0,64</b>	0,98
DMU33	mar/17	1,00	0,72	<b>0,64</b>	0,98
DMU34	abr/17	1,00	0,79	<b>0,61</b>	0,92
DMU35	mai/17	1,00	0,71	<b>0,64</b>	0,98
DMU36	jun/17	0,98	0,76	<b>0,61</b>	0,93
DMU37	jul/17	1,00	0,74	<b>0,63</b>	0,96
DMU38	ago/17	1,00	0,75	<b>0,62</b>	0,95

<b>DMU</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Eficiência Padrão</b>	<b>Eficiência Invertida</b>	<b>Eficiência Composta</b>	<b>Eficiência C. Normalizada</b>
DMU39	set/17	1,00	0,73	<b>0,64</b>	0,97
DMU40	out/17	1,00	0,69	<b>0,66</b>	1,00
DMU41	nov/17	1,00	0,69	<b>0,65</b>	1,00
DMU42	dez/17	0,95	1,00	<b>0,47</b>	0,72
DMU43	jan/18	0,91	0,79	<b>0,56</b>	0,86
DMU44	fev/18	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,76
DMU45	mar/18	0,99	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU46	abr/18	1,00	0,86	<b>0,57</b>	0,87
DMU47	mai/18	1,00	0,84	<b>0,58</b>	0,89
DMU48	jun/18	1,00	0,81	<b>0,60</b>	0,91
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,37</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,66</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,58</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,07</b>

Fonte: Dados da pesquisa

ANEXO III - EFICIÊNCIA DA LINHA DE *DISPLAYS*Tabela 25 - Eficiência da linha de *displays*

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Eficiência Invertida	Eficiência Composta	Eficiência C. Normalizada
DMU1	jul/14	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU2	ago/14	1,00	0,67	<b>0,67</b>	0,83
DMU3	set/14	0,91	0,87	<b>0,52</b>	0,65
DMU4	out/14	0,76	1,00	<b>0,38</b>	0,47
DMU5	nov/14	0,95	0,78	<b>0,58</b>	0,73
DMU6	dez/14	1,00	0,83	<b>0,59</b>	0,73
DMU7	jan/15	0,89	1,00	<b>0,45</b>	0,55
DMU8	fev/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU9	mar/15	0,75	1,00	<b>0,38</b>	0,47
DMU10	abr/15	0,98	0,58	<b>0,70</b>	0,87
DMU11	mai/15	0,94	1,00	<b>0,47</b>	0,58
DMU12	jun/15	0,82	0,80	<b>0,51</b>	0,64
DMU13	jul/15	0,95	0,85	<b>0,55</b>	0,68
DMU14	ago/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU15	set/15	0,95	0,81	<b>0,57</b>	0,71
DMU16	out/15	0,89	0,94	<b>0,48</b>	0,59
DMU17	nov/15	1,00	0,79	<b>0,60</b>	0,75
DMU18	dez/15	1,00	0,75	<b>0,62</b>	0,77
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,38</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,70</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,53</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,09</b>
DMU19	jan/16	1,00	0,77	<b>0,61</b>	0,76
DMU20	fev/16	0,99	1,00	<b>0,49</b>	0,61
DMU21	mar/16	1,00	0,99	<b>0,51</b>	0,63
DMU22	abr/16	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU23	mai/16	0,95	0,64	<b>0,65</b>	0,81
DMU24	jun/16	0,78	0,74	<b>0,52</b>	0,65
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,49</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,65</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,55</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,07</b>
DMU25	jul/16	0,98	1,00	<b>0,49</b>	0,61
DMU26	ago/16	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU27	set/16	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU28	out/16	0,92	0,99	<b>0,47</b>	0,58
DMU29	nov/16	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU30	dez/16	1,00	0,84	<b>0,58</b>	0,72
DMU31	jan/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU32	fev/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU33	mar/17	0,88	1,00	<b>0,44</b>	0,55
DMU34	abr/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62
DMU35	mai/17	1,00	0,72	<b>0,64</b>	0,79
DMU36	jun/17	1,00	0,59	<b>0,70</b>	0,88
DMU37	jul/17	1,00	0,39	<b>0,80</b>	1,00
DMU38	ago/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,62

<b>DMU</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Eficiência Padrão</b>	<b>Eficiência Invertida</b>	<b>Eficiência Composta</b>	<b>Eficiência C. Normalizada</b>
DMU39	set/17	1,00	0,49	<b>0,76</b>	0,94
DMU40	out/17	1,00	0,74	<b>0,63</b>	0,78
DMU41	nov/17	1,00	0,48	<b>0,76</b>	0,94
DMU42	dez/17	1,00	0,39	<b>0,80</b>	1,00
DMU43	jan/18	1,00	0,41	<b>0,79</b>	0,99
DMU44	fev/18	0,86	0,56	<b>0,65</b>	0,81
DMU45	mar/18	1,00	0,48	<b>0,76</b>	0,95
DMU46	abr/18	1,00	0,42	<b>0,79</b>	0,98
DMU47	mai/18	1,00	0,40	<b>0,80</b>	1,00
DMU48	jun/18	0,99	0,50	<b>0,75</b>	0,93
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,44</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,80</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,63</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,13</b>

Fonte: Dados da pesquisa

## ANEXO IV - EFICIÊNCIA DA LINHA DE ELETRÔNICOS

Tabela 26 - Eficiência da linha de eletrônicos

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Eficiência Invertida	Eficiência Composta	Eficiência C. Normalizada
DMU1	jul/14	1,00	0,96	<b>0,52</b>	0,78
DMU2	ago/14	0,94	1,00	<b>0,47</b>	0,71
DMU3	set/14	0,94	0,83	<b>0,56</b>	0,83
DMU4	out/14	1,00	0,92	<b>0,54</b>	0,81
DMU5	nov/14	1,00	0,87	<b>0,56</b>	0,84
DMU6	dez/14	0,98	0,84	<b>0,57</b>	0,86
DMU7	jan/15	0,92	1,00	<b>0,46</b>	0,69
DMU8	fev/15	0,91	1,00	<b>0,46</b>	0,68
DMU9	mar/15	0,93	1,00	<b>0,46</b>	0,70
DMU10	abr/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU11	mai/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU12	jun/15	0,99	0,81	<b>0,59</b>	0,88
DMU13	jul/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU14	ago/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU15	set/15	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU16	out/15	0,86	1,00	<b>0,43</b>	0,65
DMU17	nov/15	0,96	1,00	<b>0,48</b>	0,72
DMU18	dez/15	1,00	0,98	<b>0,51</b>	0,76
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,43</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,59</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,51</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,04</b>
DMU19	jan/16	1,00	0,81	<b>0,59</b>	0,89
DMU20	fev/16	1,00	0,87	<b>0,57</b>	0,85
DMU21	mar/16	1,00	0,89	<b>0,56</b>	0,83
DMU22	abr/16	1,00	0,97	<b>0,52</b>	0,77
DMU23	mai/16	0,81	1,00	<b>0,41</b>	0,61
DMU24	jun/16	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,41</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,59</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,53</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,07</b>
DMU25	jul/16	1,00	0,83	<b>0,58</b>	0,87
DMU26	ago/16	0,92	0,92	<b>0,50</b>	0,75
DMU27	set/16	0,95	0,91	<b>0,52</b>	0,78
DMU28	out/16	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU29	nov/16	0,85	0,98	<b>0,44</b>	0,65
DMU30	dez/16	1,00	0,69	<b>0,65</b>	0,98
DMU31	jan/17	1,00	0,91	<b>0,54</b>	0,82
DMU32	fev/17	1,00	0,92	<b>0,54</b>	0,81
DMU33	mar/17	1,00	0,91	<b>0,55</b>	0,82
DMU34	abr/17	1,00	0,81	<b>0,60</b>	0,89
DMU35	mai/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU36	jun/17	1,00	0,87	<b>0,57</b>	0,85
DMU37	jul/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU38	ago/17	0,95	1,00	<b>0,47</b>	0,71

<b>DMU</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Eficiência Padrão</b>	<b>Eficiência Invertida</b>	<b>Eficiência Composta</b>	<b>Eficiência C. Normalizada</b>
DMU39	set/17	0,97	1,00	<b>0,48</b>	0,72
DMU40	out/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU41	nov/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU42	dez/17	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU43	jan/18	1,00	0,66	<b>0,67</b>	1,00
DMU44	fev/18	0,95	0,97	<b>0,49</b>	0,73
DMU45	mar/18	1,00	0,99	<b>0,50</b>	0,76
DMU46	abr/18	1,00	1,00	<b>0,50</b>	0,75
DMU47	mai/18	0,91	0,75	<b>0,58</b>	0,87
DMU48	jun/18	1,00	0,71	<b>0,64</b>	0,96
				<b>MÍNIMO</b>	<b>0,44</b>
				<b>MÁXIMO</b>	<b>0,67</b>
				<b>MÉDIA</b>	<b>0,53</b>
				<b>DESV. P.</b>	<b>0,06</b>

Fonte: Dados da pesquisa