

**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**

**FABIO ANTONIO SARTORI PIRAN**

**MODULARIZAÇÃO DE PRODUTO E OS EFEITOS SOBRE A EFICIÊNCIA  
TÉCNICA: UMA AVALIAÇÃO EM UMA FABRICANTE DE ÔNIBUS**

**SÃO LEOPOLDO**

**2015**

FABIO ANTONIO SARTORI PIRAN

MODULARIZAÇÃO DE PRODUTO E OS EFEITOS SOBRE A EFICIÊNCIA  
TÉCNICA: UMA AVALIAÇÃO EM UMA FABRICANTE DE ÔNIBUS

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

Orientador: Dr. Daniel Pacheco Lacerda  
Coorientador: Dr. Luis Felipe Riehs Camargo

SÃO LEOPOLDO

2015

P667m Piran, Fabio Antonio Sartori  
Modularização de produto e os efeitos sobre a eficiência técnica: uma avaliação em uma fabricante de ônibus / Fabio Antonio Sartori Piran. -- 2015.  
231 f. : il. ; color. ; 30cm.

Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo, RS, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda; Coorientador: Prof. Dr. Luis Felipe Riehs Camargo.

1. Engenharia de produção. 2. Produto - Modularização. 3. Indústria automobilística. 4. Eficiência técnica. 5. Análise envoltória de dados (DEA). I. Título. II. Lacerda, Daniel Pacheco. III. Camargo, Luis Felipe Riehs.

CDU 658.5

**FABIO ANTONIO SARTORI PIRAN**

**MODULARIZAÇÃO DE PRODUTO E OS EFEITOS SOBRE A EFICIÊNCIA  
TÉCNICA: UMA AVALIAÇÃO EM UMA FABRICANTE DE ÔNIBUS**

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

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_\_/2015.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda – Orientador  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. Dr. Luís Felipe Riehs Camargo – Coorientador  
Unisinos

---

Prof. Dr. José Antônio Valle Antunes Jr.  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. PhD. Rafael Teixeira  
PPGA Unisinos

---

Prof. PhD. Luís Henrique Rodrigues  
PPGEPS Unisinos

---

Prof. PhD. Paulo Augusto Cauchick Miguel  
PPGEPS UFSC

*Dedico esta dissertação à minha esposa Camila, que sempre me apoiou nos  
momentos difíceis desta trajetória.*

*Dedico-a, também, a meus pais João e Lidia, pessoas simples e humildes, os quais  
considero exemplos de vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

A palavra certa para utilizar neste momento é GRATIDÃO.

Sou grato ao meu orientador, Prof. Daniel Pacheco Lacerda, por ter acreditado em mim e por ter me ajudado e apoiado constantemente. Também ao meu coorientador, Prof. Luis Felipe Riehs Camargo, pelas contribuições ao longo do trabalho e pelos ensinamentos durante o estágio de docência.

Agradeço ao Prof. Junico pelo apoio dado a este estudo, pelas contribuições na qualificação e por ter despertado em mim o interesse pela modularização, tema que considero relevante para melhoria da competitividade brasileira. Muito obrigado ao Professor Luis Henrique pelas ideias e pelo apoio na qualificação.

Sou grato a pessoas que apoiaram o desenvolvimento desta pesquisa: Marlos Link, Tiago Zilio, Marcelo Weber, entre outros. Um muito obrigado especial a Rodrigo Caumo e a Roberto Busetto.

Sou muito grato ao meu amigo e parceiro de pesquisa Fabiano Nunes. Foram várias viagens de pesquisa, nas quais tivemos sempre ricas discussões. Também agradeço ao Carlos Viero, grande profissional que abriu as portas da empresa na qual desenvolvi o estudo da dissertação. Hoje posso dizer que admiro o Carlão como profissional, como pessoa e como amigo. Agradeço também ao mestre e amigo Felipe Menezes.

Sou grato ao meu amigo Roberto Carlos Hahn, que me ajudou muito neste período de intensos estudos. Agradeço pelo suporte nos momentos em que não consegui manter o mesmo foco de sempre no trabalho.

Agradeço aos meus pais (João e Lidia) e ao meu irmão, Lucas, pelo apoio e ajuda de sempre. Minha família sempre foi muito importante para mim e entendeu a minha ausência nos últimos tempos.

Sou grato a minha esposa Camila, por compreender minha ausência durante esta caminhada. Meu amor, este momento é nosso, pois foi você que me incentivou a seguir os estudos, ainda lá na graduação. Isso eu nunca esquecerei.

## RESUMO

A melhoria da eficiência e da produtividade tem atraído um interesse crescente das empresas, e a modularização é considerada uma alternativa estratégica para atingir essas finalidades. No entanto, apesar de a pesquisa sobre modularização apontar esses e outros benefícios, evidências empíricas que suportam essas expectativas são escassas na literatura. Portanto, é necessário avaliar os efeitos que a modularização produz para contribuir para a melhoria da eficiência de uma área ou de um sistema produtivo, por exemplo. Este estudo analisa os efeitos da implementação da modularização de produtos sobre a eficiência da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo em uma empresa fabricante de ônibus. Esses efeitos foram avaliados longitudinalmente utilizando, combinadamente, a Análise Envoltória de Dados, a Análise de Variância (ANOVA) e a Avaliação do Impacto Causal em Séries Temporais (*CausalImpact*) em um estudo de caso. Como resultados, evidencia-se que os efeitos da modularização sobre a eficiência são positivos e significativos. Observa-se, também, diferenças significativas entre projetos e produtos modularizados e não modularizados. Por fim, a pesquisa estabelece e suporta empiricamente a causalidade entre a modularização e a eficiência da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo da empresa analisada.

**Palavras-chave:** Modularização. Indústria automobilística. Eficiência. Eficiência técnica. Análise envoltória de dados (DEA).

## ABSTRACT

The improvement of efficiency and productivity has attracted a growing interest by companies, and the modularization is considered a strategic alternative to achieve this purpose. However, despite the research on modularization points to this and other benefits, the empirical evidence supporting such expectations is scarce in the literature. Therefore, it is necessary to evaluate the effects the modularization produces in order to contribute to the improvement of the efficiency of an area or a productive system, for instance. The present study analyzes the effects of the implementation of product modularization over the efficiency of a company that manufactures buses. These effects were evaluated longitudinally using, in a combined way, the Data Envelopment Analysis, the Variance Analysis (ANOVA), and the Evaluation of the Causal Impact in Time Series (*CausalImpact*) on a study case. As a result, we can see that the effects of modularization on the efficiency are positive and significant. We also can note significant differences between modularized and non-modularized projects and products. Finally, this research establishes and empirically support the causality between modularization and the efficiency of Product Engineering in the productive process of the company studied.

**Keyword:** Modularization. Auto industry. Efficiency. Technical efficiency. Data envelopment analysis. DEA



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo genérico da indústria de fabricantes de ônibus .....	20
Figura 2: Desenho da pesquisa da Engenharia de Produtos .....	23
Figura 3: Desenho da pesquisa do Processo Produtivo.....	25
Figura 4: Modularização da cabine do caminhão da Scania .....	45
Figura 5: Classificação dos tipos de módulos .....	47
Figura 6: Elementos da arquitetura de produtos .....	49
Figura 7: Exemplos de Computadores com arquitetura integral e modular.....	50
Figura 8: Classificações das arquiteturas modulares .....	51
Figura 9: Decisão da arquitetura de produtos .....	53
Figura 10: Níveis de modularização aplicados à indústria automobilística.....	54
Figura 11: Ilustração da modularidade de Produção.....	56
Figura 12: Fronteiras da produção e eficiência técnica .....	60
Figura 13: Relação entre <i>input</i> , DMU e <i>output</i> – DEA.....	66
Figura 14: CRS com uma entrada ( <i>input</i> ) e uma saída ( <i>output</i> ).....	70
Figura 15: Orientações do modelo CRS.....	71
Figura 16: Exemplificação do modelo VRS .....	75
Figura 17: Orientações do modelo VRS.....	76
Figura 18: A lógica da Cebola .....	87
Figura 19: Etapas para condução do estudo de caso .....	89
Figura 20: Método de trabalho .....	91
Figura 21: Framework para seleção de variáveis DEA .....	101
Figura 22: Modelo DEA utilizado na pesquisa.....	118
Figura 23: Modelo DEA final utilizado na pesquisa .....	132
Figura 24: Procedimentos de análise de dados .....	134
Figura 25: Projeto/produto modularizado investigado .....	139
Figura 26: Produto não modularizado investigado .....	140
Figura 27: Processo de Engenharia de Produtos de carroceria de ônibus .....	141
Figura 28: Processo Produtivo da carroceria de ônibus.....	142
Figura 29: Linha do tempo do processo de modularização na empresa estudada .	144
Figura 30: Arranjo estrutural de um projeto de ônibus .....	146
Figura 31: Projeto da estrutura traseira e frontal de uma carroceria de ônibus.....	146
Figura 32: Projeto da estrutura lateral de uma carroceria de ônibus.....	147

Figura 33: Projeto da estrutura de base de uma carroceria de ônibus.....	147
Figura 34: Projeto da estrutura de teto de uma carroceria de ônibus.....	148
Figura 35: Projeto da cabine modular do ônibus.....	148
Figura 36: Projeto da divisória modular do ônibus .....	149
Figura 37: Hipóteses testadas na Engenharia de Produtos .....	172
Figura 38: Efeito da modularização na Engenharia de Produtos .....	177
Figura 39: Hipóteses testadas no Processo Produtivo.....	199
Figura 40: Efeito da modularização no Processo Produtivo.....	203

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução de eficiência do projeto modularizado.....	153
Gráfico 2: Evolução de eficiência do projeto não modularizado.....	161
Gráfico 3: Eficiências do projeto modularizado e não modularizado.....	170
Gráfico 4: Evolução de eficiência do produto modularizado.....	181
Gráfico 5: Evolução de eficiência do produto não modularizado.....	188
Gráfico 6: Eficiências do produto modularizado e não modularizado.....	197

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Bases de dados pesquisadas.....	29
Quadro 2: Critérios para pesquisa nas bases de dados e artigos .....	31
Quadro 3: Peças e combinações possíveis com a modularização.....	45
Quadro 4: Definições conceituais.....	46
Quadro 5: Classificação das interfaces .....	48
Quadro 6: Benefícios da modularidade de projetos .....	55
Quadro 7: Benefícios da modularidade de produção .....	57
Quadro 8: Técnicas para cálculo de eficiência e produtividade .....	63
Quadro 9: Principais trabalhos sobre a DEA.....	67
Quadro 10: Tipos de eficiência calculados em DEA.....	78
Quadro 11: Estudos relacionados com a utilização da DEA .....	80
Quadro 12: Testes Estatísticos .....	82
Quadro 13: Profissionais da empresa consultados .....	94
Quadro 14: Lista de potenciais variáveis da Engenharia de Produtos .....	103
Quadro 15: Lista final de variáveis da Engenharia de Produtos.....	107
Quadro 16: Detalhamento das variáveis da Engenharia de Produtos.....	108
Quadro 17: Lista de potenciais variáveis do Processo Produtivo.....	110
Quadro 18: Lista final de variáveis do Processo Produtivo .....	114
Quadro 19: Detalhamento das variáveis do Processo Produtivo .....	115
Quadro 20: Métodos para seleção de variáveis em DEA.....	124
Quadro 21: Síntese das análises estatísticas efetuadas.....	135
Quadro 22: Hipóteses de pesquisa testadas.....	205

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução das publicações acadêmicas sobre modularização.....	30
Tabela 2: Produção de carrocerias de ônibus no mercado brasileiro.....	38
Tabela 3: Produção por segmento da empresa pesquisada.....	38
Tabela 4: Quantidade de projetos da coleta de dados.....	120
Tabela 5: Quantidade de produtos da coleta de dados.....	121
Tabela 6: Stepwise projeto modularizado.....	127
Tabela 7: Stepwise projeto não modularizado.....	128
Tabela 8: Stepwise produto modularizado.....	129
Tabela 9: Stepwise produto não modularizado.....	131
Tabela 10: Faturamento anual e receita líquida da empresa estudada.....	139
Tabela 11: Eficiências do projeto modularizado.....	151
Tabela 12: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do projeto modularizado.....	155
Tabela 13: Eficiências do projeto não modularizado.....	160
Tabela 14: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do projeto não modularizado.....	163
Tabela 15: Eficiências do projeto modularizado e não modularizado.....	167
Tabela 16: Teste dos pressupostos para uso da ANOVA na Engenharia de Produtos.....	173
Tabela 17: Teste ANOVA na Engenharia de Produtos.....	174
Tabela 18: Quantificação do efeito da modularização na Engenharia de Produtos.....	178
Tabela 19: Eficiências do produto modularizado.....	179
Tabela 20: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do produto modularizado.....	183
Tabela 21: Eficiências do produto não modularizado.....	187
Tabela 22: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do produto não modularizado.....	190
Tabela 23: Eficiências do produto modularizado e não modularizado.....	194
Tabela 24: Teste dos pressupostos para uso da ANOVA no Processo Produtivo.....	200
Tabela 25: Teste ANOVA do Processo Produtivo.....	201
Tabela 26: Quantificação do efeito da modularização no Processo Produtivo.....	204
Tabela 27: Quantificação do efeito da modularização.....	205

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i> (Retorno Constante de Escala)
DD	<i>Double Deck</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> (Análise Envoltória de Dados)
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DfV	<i>Design For Variety</i>
DMU	<i>Decision Making Unit</i> (Unidades de Tomada de Decisão)
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DSM	<i>Design Structure Matrix</i>
EPTC	Empresa Pública de Transporte e Circulação
FABUS	Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus
FLB	<i>Fuzzy Logic Based</i>
FPD	<i>Fractal Product Design</i>
HD	<i>High Deck</i>
HOME	<i>House of Modular Enhancement</i>
JIS	<i>Just In Sequence</i>
MFD	<i>Modular Function Deployment</i>
MPD	<i>Modular Product Development</i>
MPM	<i>Modelling the Product Modularity</i>
PDI	<i>Pre Delivery Inspection</i>
ROI	Retorno sobre o Investimento
TQM	<i>Total Quality Management</i>
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i> (Retorno Variável de Escala)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>28</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	28
1.2.2 Objetivos específicos.....	28
<b>1.3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>28</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>40</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>42</b>
<b>2.1 MODULARIZAÇÃO: CONTEXTO E DESDOBRAMENTOS .....</b>	<b>42</b>
2.1.1 Módulos e Interfaces .....	46
2.1.2 Arquitetura de Produtos (Modular e Integral) .....	48
2.1.3 Abordagens da Modularização.....	53
2.1.3.1 Modularidade de projeto.....	54
2.1.3.2 Modularidade de produção.....	56
2.1.4 Estudos sobre Mensuração dos Efeitos da Modularização.....	58
<b>2.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA .....</b>	<b>59</b>
2.2.1 Métodos para Cálculo de Eficiência .....	61
2.2.2 Análise Envoltória de Dados (DEA).....	64
2.2.2.1 Modelo Retorno Constante de Escala (CRS).....	69
2.2.2.2 Modelo Retorno Variável de Escala (VRS).....	73
2.2.2.3 Tipos de eficiência calculados em DEA.....	78
2.2.2.4 Alvos e Folgas.....	78
2.2.3 Estudos Relacionados com a Utilização da Análise Envoltória de Dados.....	79
<b>2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>2.4 ANÁLISE DE UMA INFERÊNCIA CAUSAL EM SÉRIES TEMPORAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>3 MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>86</b>
<b>3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA .....</b>	<b>86</b>
<b>3.2 MÉTODO DE TRABALHO.....</b>	<b>90</b>
<b>3.3 PROJETO DO MODELO DEA.....</b>	<b>93</b>
3.3.1 Definição das unidades de contexto de análise .....	95

3.3.2 Definição dos produtos a serem analisados.....	96
3.3.3 Definição do período de análise.....	97
3.3.4 Definição das unidades de tomada de decisão (DMU's).....	98
3.3.5 Definição das variáveis do modelo DEA ( <i>inputs e outputs</i> ).....	99
3.3.5.1 Definição das variáveis do modelo ( <i>inputs e outputs</i> ) na unidade de contexto de análise da Engenharia de Produtos .....	102
3.3.5.2 Definição das variáveis do modelo ( <i>inputs e outputs</i> ) na unidade de contexto de análise do Processo Produtivo .....	109
3.3.6 Definição do modelo DEA (CRS/VRS) .....	116
3.3.7 Definição da orientação do modelo ( <i>input ou output</i> ).....	117
<b>3.4 COLETA DE DADOS.....</b>	<b>119</b>
<b>3.5 REFINAMENTO DO MODELO DEA.....</b>	<b>122</b>
3.5.1 Aplicação do Stepwise no modelo DEA da Engenharia de Produtos.....	126
3.5.2 Aplicação do Stepwise no modelo DEA do Processo Produtivo .....	128
<b>3.6 ANÁLISE DE DADOS.....</b>	<b>133</b>
<b>3.7 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>136</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ANALISADA.....</b>	<b>138</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ANALISADOS NA ENGENHARIA DE PRODUTOS E NO PROCESSO PRODUTIVO.....</b>	<b>139</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ENGENHARIA DE PRODUTOS E DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA .....</b>	<b>140</b>
<b>4.3 HISTÓRICO DA MODULARIZAÇÃO NA EMPRESA .....</b>	<b>144</b>
<b>4.4 CARACTERIZAÇÃO DA MODULARIZAÇÃO NA EMPRESA.....</b>	<b>145</b>
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>150</b>
<b>5.1 ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS NA ENGENHARIA DE PRODUTOS .....</b>	<b>150</b>
5.1.1 Comportamento da eficiência do projeto modularizado na Engenharia de Produtos.....	151
5.1.2 Comportamento da eficiência do projeto não modularizado na Engenharia de Produtos.....	159
5.1.3 Análise comparativa do projeto modularizado com o projeto não modularizado na Engenharia de Produtos.....	167
<b>5.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO DA MODULARIZAÇÃO NA EFICIÊNCIA DA ENGENHARIA DE PRODUTOS .....</b>	<b>171</b>



5.2.1 Hipóteses testadas na Engenharia de Produtos .....	171
5.2.2 Análises estatísticas dos efeitos da modularização na Engenharia de Produtos.....	173
<b>5.3 DIMENSIONAMENTO DOS EFEITOS DA MODULARIZAÇÃO NA ENGENHARIA DE PRODUTOS .....</b>	<b>175</b>
<b>5.4 ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS NO PROCESSO PRODUTIVO.....</b>	<b>178</b>
5.4.1 Comportamento da eficiência do produto modularizado no Processo Produtivo .....	179
5.4.2 Comportamento da eficiência do produto não modularizado no Processo Produtivo .....	186
5.4.3 Análise comparativa do produto modularizado com produto não modularizado no Processo Produtivo .....	194
<b>5.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO DA MODULARIZAÇÃO NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO PRODUTIVO.....</b>	<b>198</b>
5.5.1 Hipóteses testadas no Processo Produtivo .....	198
5.5.2 Análises estatísticas dos efeitos da modularização no Processo Produtivo ..	200
<b>5.6 DIMENSIONAMENTO DOS EFEITOS DA MODULARIZAÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO.....</b>	<b>202</b>
<b>5.7 SÍNTESE DAS ANÁLISES .....</b>	<b>204</b>
<b>6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>206</b>
6.1 CONTRIBUIÇÕES DOS RESULTADOS PARA A TEORIA.....	206
6.2 CONTRIBUIÇÃO DOS RESULTADOS PARA A EMPRESA.....	208
<b>7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>210</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>213</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda global por produtos com características diferenciadas e a necessidade de atender simultaneamente a diferentes mercados, reforça a importância de as empresas oferecerem um número cada vez maior de variação de produtos. Nesse cenário, o aumento da produtividade e a redução de custos, por meio da otimização de partes e componentes dos produtos, tornaram-se fatores estratégicos para as organizações (BORJESSON, 2009; SONEGO, 2013) e relevantes para diminuir a complexidade dos projetos, facilitando o planejamento e a execução dos processos de manufatura. (ERIXON; VON YXKULL; ARNSTROEM, 1996).

O aumento da variedade de produtos com a redução do número de componentes pode ser obtido por meio da modularização. (ETHIRAJ; LEVINTHAL, 2004). A modularização pode ser entendida como uma estratégia para o desenvolvimento e a produção eficiente de produtos e processos complexos. (BALDWIN; CLARK, 1997; BALDWIN; CLARK, 2003). Além disso, busca apoiar a gestão da variedade de produtos e a variabilidade dos processos por meio da decomposição de produtos e processos complexos em partes mais simples. Essas partes mais simples são chamadas de módulos e podem ser combinadas para gerar uma ampla variedade de produtos e serviços. (SANCHEZ; MAHONEY, 1996; ERNST; KAMRAD, 2000; PANDREMENOS et al., 2009).

O trabalho seminal de Simon (1962) introduziu os conceitos sobre a natureza hierárquica e a decomposição de sistemas complexos, e Parnas (1972) discutiu critérios para a utilização da modularização no projeto desses sistemas. Os sistemas modulares são constituídos de componentes interdependentes dentro de sub-blocos chamados de módulos. (SIMON, 1962; BALDWIN; CLARK, 1997; SCHILLING, 2000). A interdependência entre módulos significa que as modificações efetuadas dentro de um módulo específico não afetam o resto do sistema. (PARNAS, 1972; BALDWIN, HENKEL, 2011). Tal interdependência reduz riscos de que alterações no ambiente ocasionem falhas no sistema como um todo e facilita a adaptação, correção ou melhoria do sistema. (BALDWIN; HENKEL, 2011).

A importância da modularização no projeto e produção de produtos foi discutida por Starr (1965). Posteriormente, Pimpler e Eppinger (1994) apresentaram um método para aplicação da modularização chamado *Design Structure Matrix*

(DSM) e, na sequência, outras metodologias foram propostas, tais como: método *Fractal Product Design* (FPD) (KAHMEYER; WARNECKE; SHEIDER, 1994), *Modular Product Development* (método MPD) (PAHL; BEITZ, 1996), *Modelling the Product Modularity* (método MPM) (KUSIAK; HUANG, 1996), *Modular Function Deployment* (método MFD) (ERICSON; ERIXON, 1999), método Heurístico (STONE; WOOD; CRAWFORD, 2000), *Design for Variety* (método DfV) (MARTIN; ISHII, 2002), *House of Modular Enhancement* (método HOME) (SAND; GU; WATSON, 2002), *Fuzzy Logic Based* (método FLB) (NEPAL; MONPLAISIR; SING, 2005), entre outros.

No entanto, apesar da evolução dos estudos sobre o tema, a literatura aponta a falta de uma definição amplamente aceita para a modularização, que é um conceito fragmentado e que apresenta uma variedade de ramificações. (STARR, 2010). Salvador (2007) destaca que a modularização tornou-se comum na literatura de gestão de operações e produção a partir da década de 1990. Além disso, teve suas primeiras aplicações práticas para a produção em escala na indústria de computadores e, atualmente, vem sendo cada vez mais utilizada na indústria automobilística. No segmento de automóveis, empresas como Fiat, Volkswagen, Citroen (PANDREMENOS et al., 2009), Ford, Hyundai (MACDUFFIE, 2013), Scania (ERICSON; ERIXON, 1999), Volvo (FREDRIKSSON, 2006), entre outras, aplicam os conceitos da modularização.

Nesse sentido, Baldwin e Clark (1997) indicam que a indústria automobilística parece ser um ambiente adequado para o estudo e a aplicação da modularização. Isso é motivado, principalmente, pela variação de produtos do segmento e pelos esforços para a personalização dos automóveis. (DORAN, 2004). Existe também a possibilidade de terceirizar módulos completos (FREDRIKSSON, 2006) ou o desenvolvimento do projeto para fornecedores independentes. (CIRAVEGNA; ROMANO; PILKINGTON, 2013).

Outro aspecto presente nas pesquisas sobre modularização é a capacidade de apoiar a estratégia de customização em massa. (FREDRIKSSON, 2006; JIANG; LEE; SEIFERT, 2006; PANDREMENOS et al., 2009; AGRAWAL et al., 2013; CABIGIOSU; ZIRPOLI; CAMUFFO, 2013). Os princípios da customização em massa foram introduzidos na literatura por Davis (1987), e seus conceitos foram desenvolvidos na gestão de produção e operações por Pine (1993). Customização em massa pode ser entendida como uma estratégia de produção focada na ampla

oferta de produtos e serviços personalizados (DAVIS, 1989; PINE, 1993), utilizando principalmente o *design* modular do produto/serviço, processos flexíveis e a integração entre membros da cadeia de suprimentos. (FOGLIATTO; SILVEIRA; BORENSTEIN, 2012).

A crescente tendência da adoção da modularização pelas empresas, principalmente na indústria automobilística, implica em ampliar e aprofundar as discussões sobre o tema. (FINE; GOLANY; NASERALDIN, 2005; CABIGIOSU; ZIRPOLI; CAMUFFO, 2013). Um aspecto central na pesquisa sobre modularização é avaliar os efeitos proporcionados pela sua utilização na produtividade e na eficiência das organizações e dos sistemas produtivos. Produtividade pode ser compreendida como a habilidade de transformar os insumos utilizados no processo produtivo em produtos. (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978). A eficiência, por sua vez, é uma medida comparativa que representa o aproveitamento dos recursos, ou seja, o que foi produzido com a utilização de determinados recursos é comparado com o que poderia ter sido produzido com os mesmos recursos. (CUMMINS; WEISS, 2013).

No Brasil, a baixa eficiência é assunto recorrente em diversos setores industriais e, conseqüentemente, também no segmento automobilístico de fabricantes de ônibus. Para os fabricantes de ônibus, o cenário de baixa eficiência aliado à necessidade de oferecer novos produtos com maior rapidez e de atender as expectativas dos clientes com o menor custo possível é a realidade de competição do mercado atual. (VIERO, 2013). Tendo em vista esse contexto, entende-se como relevante o tema desta pesquisa, que é investigar os efeitos da modularização em uma empresa que compete no mercado descrito. Na próxima seção, são apresentados o objeto do estudo e o problema de pesquisa.

## 1.1 OBJETO E PROBLEMA DE PESQUISA

A demanda global do mercado de ônibus tem apresentado crescimento nos últimos anos. (NAPPER, 2014). Nesse sentido, economias emergentes como Brasil, Rússia, Índia, China, Indonésia, México, entre outros, tornaram-se mercados atrativos para os fabricantes de ônibus devido a sua elevada população. (EALEY; GROSS, 2008). Os fabricantes de ônibus estão presentes em quase todos os

continentes e representam uma ampla diversidade de estruturas empresariais, ofertas de produtos e estratégias de vendas, acrescentando competitividade a um mercado em expansão. (EALEY; GROSS, 2008).

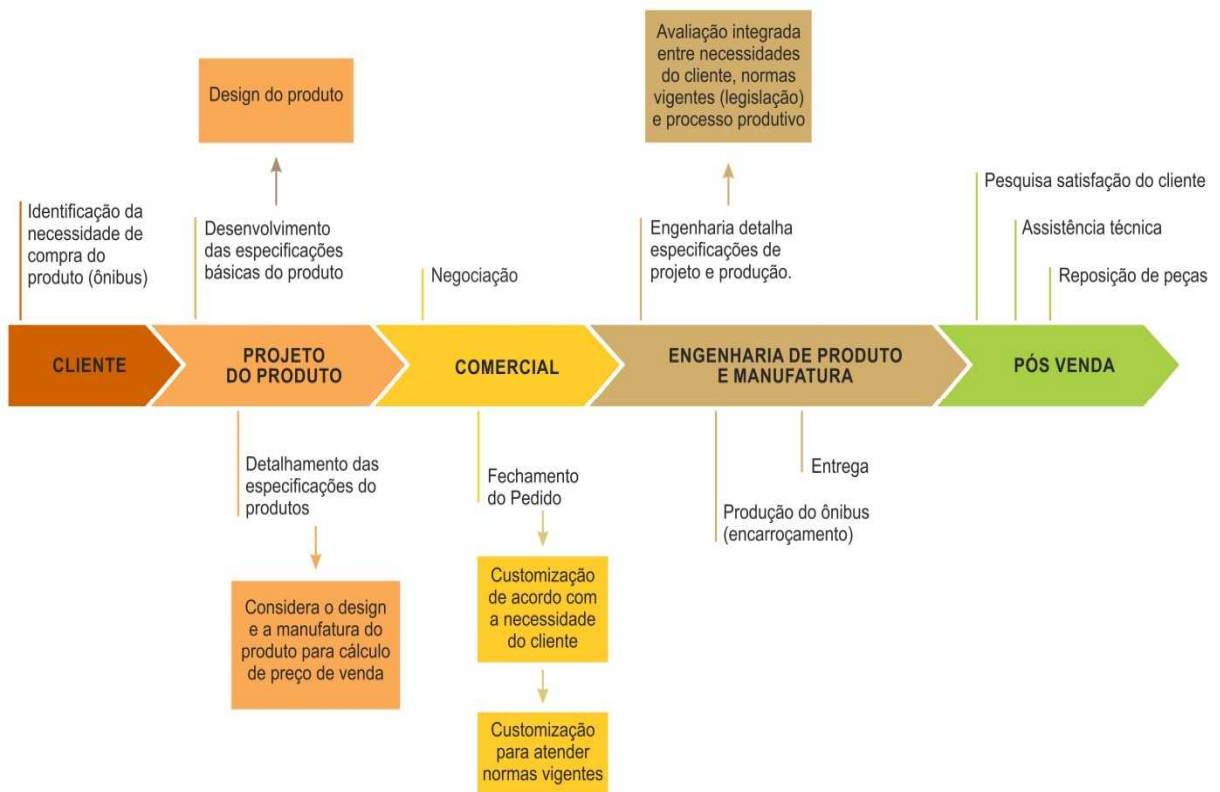
Enquanto existem fabricantes de ônibus que produzem o veículo completo, fabricando desde o chassi até a carroceria (Volvo, por exemplo), outras empresas atuam somente na produção da carroceria dos veículos, utilizando chassis fornecidos pelos clientes. (EALEY; GROSS, 2008). No mercado brasileiro é predominante a fabricação de carrocerias, as quais são acopladas aos chassis fornecidos pelos clientes. (NAPPER, 2014). Essa particularidade (fornecimento do chassi pelo cliente) aumenta consideravelmente as possibilidades de variação de produtos. (NAPPER, 2014).

Outra característica do mercado de fabricação de ônibus é que os clientes exigem produtos customizados. Dessa forma, os veículos variam em termos de tamanho, número de assentos, espaço para bagagem, acessórios opcionais, entre outros. (PALENCIA; DELGADILLO, 2012). Nesse sentido, a ampla possibilidade de variação de produtos, a necessidade de personalização para os clientes e a baixa escala de fabricação de componentes tornam o ônibus um produto complexo e trabalhoso de ser projetado e produzido. (VIERO, 2013). Também existe a necessidade de atender as especificações da legislação vigente no Brasil, estabelecidas por órgãos reguladores como: Empresa Pública de Transportes e Circulação (EPTC), Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), entre outros. Tais órgãos reguladores estabelecem normas a serem cumpridas para que os veículos estejam aptos a operar. O atendimento das especificações impostas pela legislação requer extensos estudos por parte do cliente e do fabricante.

Apesar de a funcionalidade dos produtos finais (ônibus) ser similar, entende-se que a diversidade de especificações implica em aumento nos prazos de desenvolvimento e produção dos veículos e direciona a um sistema de fabricação personalizado. (NAPPER, 2014). Napper (2014) apresenta um processo genérico da indústria de fabricação de ônibus, considerando a montagem da carroceria no chassi fornecido pelo cliente.

No início das negociações de pedidos com os compradores, os *designers* da empresa trabalham no projeto inicial do produto, buscando atender os requisitos dos clientes quanto ao visual e a detalhes genéricos das carrocerias de ônibus. Posteriormente, o projeto é detalhado considerando aspectos técnicos e funcionais, com o objetivo de obter uma base de preço para negociação com o cliente. Com a definição da negociação, o departamento de Engenharia trabalha na finalização do projeto, considerando o Processo Produtivo. O processo genérico da negociação até a entrega do produto é ilustrado na Figura 1:

Figura 1: Processo genérico da indústria de fabricantes de ônibus



Fonte: Adaptado de Napper (2014).

O projeto da carroceria de ônibus exige integração dos departamentos de Vendas e Engenharia antes da fabricação. As especificações do produto (ônibus) requerem extensas negociações com os clientes. Tais condições exigem um sistema de desenvolvimento de produtos e de fabricação sob medida, que se diferencia pela elevada variedade de procedimentos e *part numbers*, gerando um produto final customizado. Se comparada à produção de veículos leves, a indústria de ônibus tem

maior variedade de produtos, maior pressão sobre o tempo de entrega e maiores necessidade de customização de produtos. (LIN; MA; ZHOU, 2012).

Nesse contexto, entende-se que a complexidade do projeto e da produção do ônibus pode ser minimizada por meio da utilização da modularização, que auxilia a reduzir os problemas causados pela diversidade de especificações de projeto e fabricação do veículo. (NAPPER, 2014). Napper (2014) e Patel e Jayaram (2014) destacam que a modularização viabiliza o aumento da variedade de produtos ofertados com a redução do número de componentes, e isso deve proporcionar oportunidades de melhorias nas empresas, tais como aumento da produtividade e da eficiência.

No entanto, apesar de o aumento da produtividade e da eficiência serem apontados como possíveis efeitos da modularização, não se identificou, na literatura, medições que comprovem tais benefícios. Neste trabalho, os aumentos de produtividade e eficiência podem ser entendidos como otimizar a utilização dos recursos para o desenvolvimento e produção de produtos, com o intuito de obter as melhores práticas no projeto e na fabricação do ônibus.

Com foco na competição dos mercados nacional e internacional, as empresas fabricantes de ônibus buscam, constantemente, atender o nível de personalização exigido pelos seus clientes com o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Com esse objetivo, a organização estudada (que será apresentada com maior detalhamento posteriormente) iniciou, no ano de 2007, a implementação da estratégia de modularização.

Na empresa, a eficiência é medida com o cálculo da razão entre as horas trabalhadas e as horas disponíveis para produzir. Esse cálculo remete somente ao controle da eficiência operacional, e é limitado por não considerar um conjunto de outros recursos (materiais, mão de obra indireta, gastos gerais de fabricação, etc.) utilizados no processo de fabricação. Tais limitações restringem o uso da informação da eficiência para tomada de decisões gerenciais na organização. Nesse sentido, Skinner (1974) destaca que se deve perceber a eficiência como uma questão que engloba a organização de manufatura por inteiro, e não somente a eficiência de mão de obra.

Hadi-Vencheh, Ghelejbeigi e Gholami (2014) argumentam que a análise da eficiência permite aos gestores tomadas de decisão mais qualificadas. Tais decisões podem ser quanto: i) utilização dos recursos; ii) redução de custos; iii) alocação de

investimentos; e iv) definição de metas. Souza (2014) destaca que a falta de análise adequada da eficiência pode levar a organização a tomar decisões equivocadas, tais como: i) investimentos desnecessários em recursos de prioridade irrelevante; ii) falta de investimentos em recursos críticos como gargalo; e iii) investimento em aumento da capacidade produtiva sem antes ter explorado a capacidade máxima dos recursos já existentes.

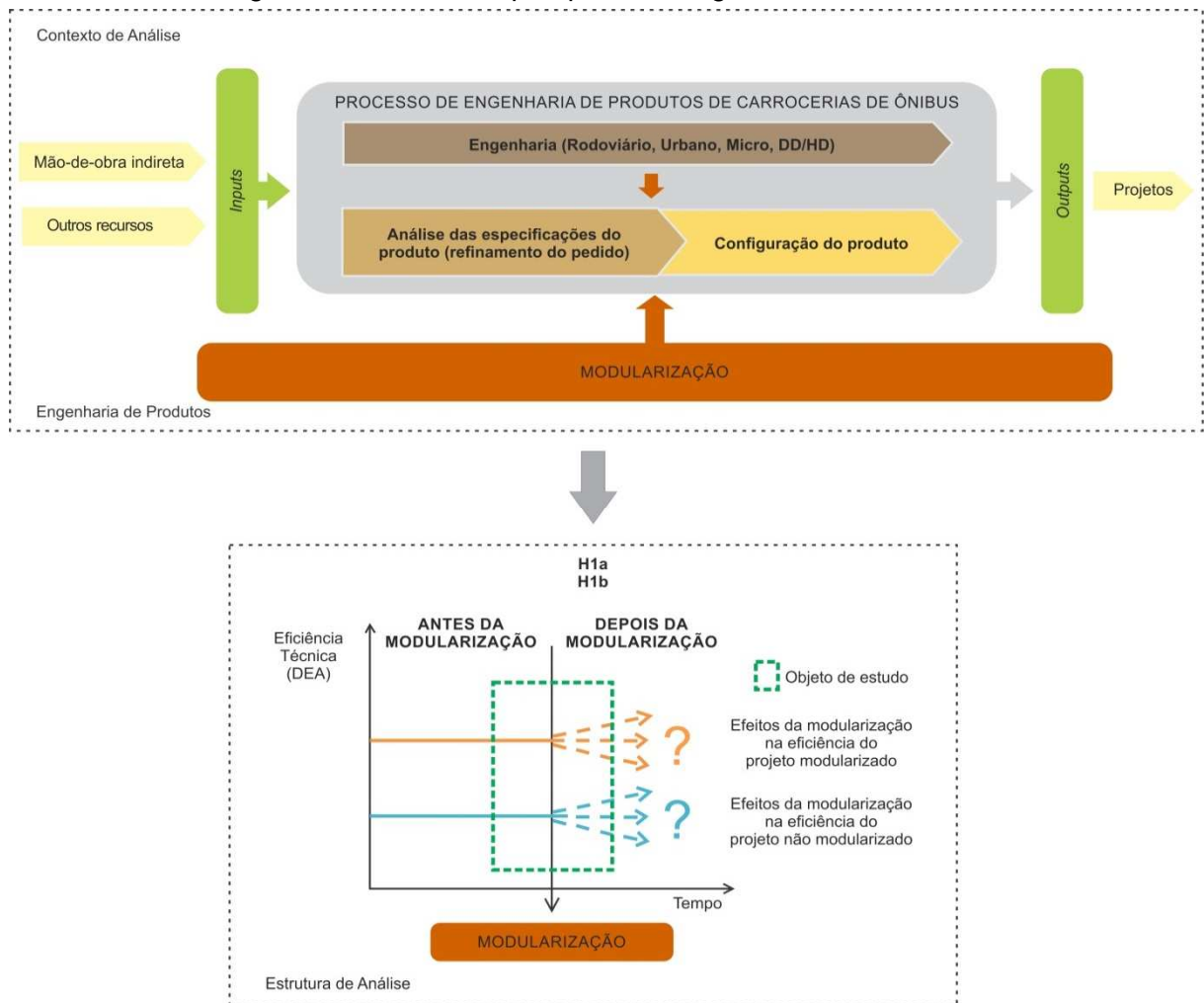
Segundo Cook, Tone e Zhu (2014), em qualquer estudo de eficiência organizacional, primeiramente é necessário ter uma compreensão do processo em análise. Nesse sentido, destaca-se que o presente trabalho efetua duas avaliações, sendo uma na Engenharia de Produtos e outra no Processo Produtivo da empresa objeto de estudo.

A Engenharia de Produtos e o Processo Produtivo foram definidos para investigação por serem as abordagens referentes à modularização mais estudadas na literatura. (CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2009). Além disso, são as abordagens que requerem maior esforço para implementação da modularização. Outro aspecto relevante que foi considerado na definição da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo são as considerações de Baldwin e Clark (1997), Asan, Polat e Serdar (2004) e Jacobs et al., (2011). Asan, Polat e Serdar (2004) afirmam que a modularidade de projetos pode ser considerada a abordagem mais importante dentre as demais, pois a modularização de produtos conduz todo o sistema a uma configuração modular. Jacobs et al. (2011) defendem que após a modularização dos produtos as empresas devem buscar a modularização do processo (entendido como Processo Produtivo). Nesse sentido, Baldwin e Clark (1997) indicam que a indústria automobilística (segmento de estudo desta pesquisa) parece ser um dos ambientes mais adequados para o estudo da modularização no Processo Produtivo.

Dessa forma, apresenta-se o desenho de pesquisa de cada avaliação (Engenharia de Produtos e Processo produtivo) separadamente. Na Figura 2 está ilustrado o desenho de pesquisa da análise efetuada na Engenharia de Produtos.



Figura 2: Desenho da pesquisa da Engenharia de Produtos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entende-se a Engenharia de Produtos como um processo no qual existem entradas (*inputs*) de recursos que são transformados em saídas (*outputs*) de projetos. Assim, entradas podem ser consideradas recursos que contemplam tempo e número de pessoas no que se refere à mão de obra indireta, além de informações e outros recursos. O resultado da transformação dos recursos são os projetos de ônibus.

A Engenharia de Produtos da empresa em que foi realizada a pesquisa é estruturada em grupos de trabalho de acordo com os segmentos atendidos (Rodoviário, Urbano, Micro, *Double Deck* (DD) e *High Deck* (HD)). Os macroprocessos executados na Engenharia de Produtos de cada segmento são os seguintes: i) análises das especificações do produto; e ii) configuração do produto.

No que tange às análises das especificações dos produtos, estas se referem à avaliação de cada pedido, cujas customizações e necessidades de ajustes são discutidas pela Engenharia de Produto e pelo departamento Comercial. Nessa fase,

a Engenharia e o Comercial efetuam um refinamento do pedido recebido, com o objetivo de descrever todas as situações para viabilizar a configuração do produto. Na configuração do produto executa-se o trabalho de engenharia, que efetua uma análise integrando as necessidades dos clientes e elabora o projeto considerando requisitos técnicos e o processo de fabricação. Os processos ilustrados são explicitados com maior detalhamento na parte da apresentação da empresa, descrita no Capítulo 4, seção 4.2 desta dissertação.

Após o entendimento do processo da Engenharia de Produtos, é necessário compreender a estrutura de análise, buscando entender se a modularização impactou a eficiência técnica da Engenharia de Produtos. Nesse sentido, as seguintes hipóteses são testadas:

**H1a:** Não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos.

**H1b:** Existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos.

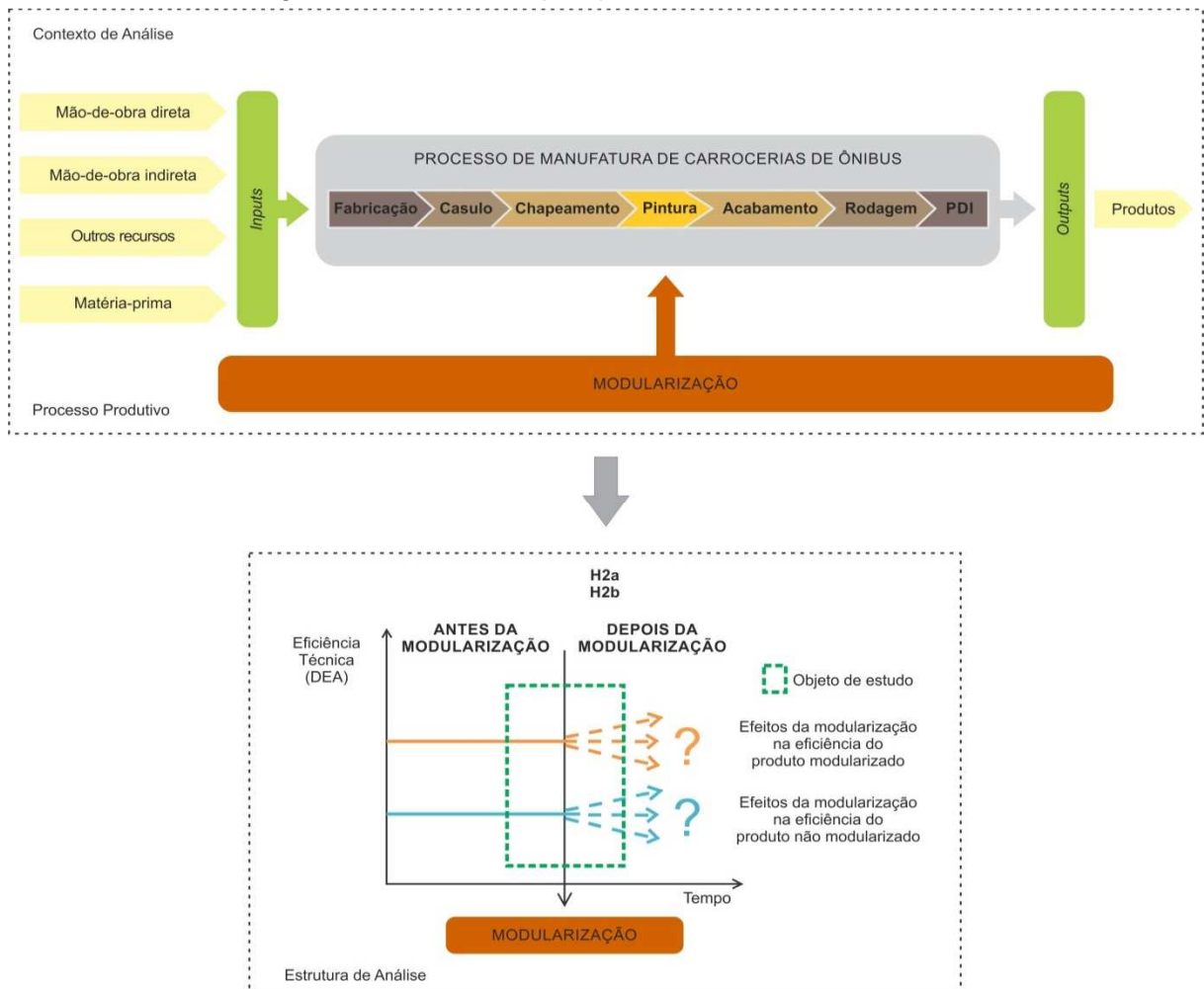
Para desenvolver a investigação, analisa-se o comportamento da eficiência técnica ao longo do tempo, contemplando os períodos antes e depois da modularização, que serão segregados pelo período de transição (período de tempo em que o projeto analisado foi modularizado). Quanto à eficiência técnica, esta pode ser considerada um conceito relativo, que compara o que foi produzido com determinada quantidade de insumos com o que poderia ser produzido com a mesma quantidade de insumos. (FERREIRA; GOMES, 2009).

Um aspecto relevante a ser destacado é que para a investigação na Engenharia de Produtos foi selecionado um projeto que foi modularizado pela empresa. A análise desse projeto é a base deste trabalho e será o foco desta pesquisa. No entanto, também foi selecionado para análise um projeto não modularizado. Esse projeto (não modularizado) tem como função evidenciar que os efeitos identificados no projeto modular são oriundos da modularização e não de outros projetos de melhoria que possam ter sido implementados pela empresa. Assume-se que as melhorias efetuadas (troca de *software*, por exemplo) impactam da mesma forma nos dois projetos e, assim, aumenta-se a possibilidade de afirmar

que os efeitos identificados na linha modularizada são realmente oriundos da modularização.

O projeto não modularizado foi considerado, nesta pesquisa, como a variável de controle, ou seja, trata-se do projeto que não sofreu a intervenção (modularização) que está sendo pesquisada. O projeto modularizado foi considerado como a variável de resposta, ou seja, consiste no projeto que sofreu a intervenção (modularização). Entende-se que o procedimento que considera variável de controle e variável de resposta ao avaliar os efeitos de uma intervenção (como a modularização, por exemplo) aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos e é comumente utilizado em pesquisa das áreas de economia (ABADIE, 2005), marketing (ANTONAKIS et al., 2010; BRODERSEN et al., 2014), ciências da saúde (KLEINBERG; HRIPCSAK, 2011), entre outras. Após a descrição da análise da Engenharia de Produtos, explica-se a análise efetuada no Processo Produtivo, ilustrada na Figura 3:

Figura 3: Desenho da pesquisa do Processo Produtivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à análise do Processo Produtivo, este é entendido como um processo no qual existem entradas (*inputs*) de recursos. Esses recursos são transformados na fabricação, resultando em saídas (*outputs*) de produtos. A organização na qual se desenvolveu o presente estudo efetua a fabricação de carrocerias de ônibus nos chassis que são fornecidos pelos clientes. Nesse sentido, considera-se que os *inputs* do processo produtivo são recursos como matérias-primas, mão de obra direta e indireta, entre outros. Os produtos finais (*outputs*) da empresa são os ônibus. O processo de manufatura e organização da produção é subdividido nos seguintes setores: Fabricação, Casulo, Chapeamento, Pintura, Acabamento, Rodagem, PDI.

O processo denominado como Fabricação consiste no corte e dobras dos componentes (tubos e chapas) da estrutura do ônibus. É importante destacar que a empresa denomina como Fabricação apenas esse setor, que não corresponde ao processo produtivo como um todo, situação em que normalmente o termo “fabricação” é empregado. Posteriormente, no setor de casulo, inicia-se o processo de montagem da carroceria do ônibus.

No setor de Chapeamento, a estrutura da carroceria do ônibus recebe os acabamentos externos. Esses acabamentos externos referem-se às partes frontal, traseira e laterais. Quanto à Pintura, primeiramente é efetuada a aplicação da cor base e, posteriormente, é realizada a customização de cores, conforme especificações do cliente. No setor de Acabamento, o produto recebe os componentes internos e a iluminação externa. Finalmente são efetuados os testes de rodagem e a entrega técnica pelo setor conhecido como *Pre Delivery Inspection* (PDI). O Processo produtivo da empresa estudada é apresentado com maior detalhamento no capítulo 4, seção 4.2 desta dissertação.

Após o entendimento do Processo Produtivo, é necessário compreender a estrutura de análise, buscando entender se a modularização impactou a eficiência técnica do Processo Produtivo. Nesse sentido, as seguintes hipóteses são testadas:

**H2a:** Não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo.

**H2b:** Existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo.

De acordo com o procedimento já efetuado na análise da Engenharia de produtos, destaca-se que para a investigação no Processo Produtivo foi selecionado um produto modularizado pela empresa. A análise desse produto é a base deste trabalho e será o foco desta pesquisa. Igualmente, também foi selecionado para análise um produto não modularizado. Este tem como função evidenciar que os efeitos identificados no produto modularizado são oriundos da modularização e não de outros projetos de melhoria que possam ter sido implementados pela empresa. Assim, o produto não modularizado foi considerado como a variável de controle e o produto modularizado foi considerado como a variável de resposta na análise proposta para o Processo Produtivo. Ressalta-se que não é objetivo do presente trabalho efetuar uma análise comparativa entre produto modularizado e produto não modularizado.

Entende-se que é relevante efetuar a medição do comportamento da eficiência ao longo do tempo na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo. A comparação das eficiências em diferentes períodos (antes x depois da modularização) pode fornecer respostas aos gestores da empresa quanto aos efeitos esperados com a implementação da modularização na organização. O entendimento desses efeitos pode apoiar a tomada de decisão quanto à ampliação da utilização da modularização na empresa. Outro aspecto a ser considerado é que a eficiência pode mostrar como a Engenharia de Produtos e o Processo Produtivo podem otimizar o uso dos recursos empregados, visto que uma melhor utilização dos recursos resulta em melhores resultados econômicos para a organização.

Nesse contexto surge a questão central que motiva a realização deste trabalho: Qual é o efeito da modularização de produto na eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo de uma empresa fabricante de ônibus?

Após a apresentação do objeto de estudo e do problema de pesquisa, na seção 1.2 são apresentados os objetivos deste trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção estão descritos o objetivo geral (1.2.1) e os objetivos específicos (1.2.2) da presente pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar o efeito da modularização de produto na eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo de uma empresa fabricante de ônibus.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- a) Avaliar o comportamento da eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo ao longo do tempo, verificando o período anterior e posterior à implantação da modularização;
- b) Avaliar se houve diferença significativa entre a média das eficiências técnicas da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo, contemplando os períodos anterior e posterior à modularização;
- c) Quantificar os efeitos da modularização observados na eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo ao longo do tempo;
- d) Estabelecer a causalidade entre modularização e efeitos na eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo.

Na seção 1.3 são descritos os argumentos que justificam a elaboração do presente trabalho.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A literatura aponta uma ampla variedade de benefícios para as empresas que adotam a modularização de produtos. (BOER; HANSEN, 2014). Nesse sentido,

percebe-se que existem estudos (HOPP; XU, 2005; THOMAS; WARSING, 2007; KRISHNAN; RAMACHANDRAN, 2011; PATEL; JAYARAM, 2014; SOSA; MIHM; BROWNING, 2013) argumentando que o uso da estratégia de modularização proporciona economia significativa de tempo e recursos para as organizações. No entanto, a literatura indica a falta de um método sistemático para utilização da modularização (STARR, 2010) e, portanto, marca a necessidade de se avançar em estudos detalhados e revisões sistemáticas da literatura no tocante ao tema da modularização. (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004; DANILIDIS et al., 2011; SONEGO, 2013).

Neste trabalho efetuou-se uma revisão sistemática de literatura. Essa revisão dividiu-se em dois estágios, a saber: i) buscou-se avaliar o interesse acadêmico pelo tema da modularização; ii) buscou-se identificar pesquisas já publicadas contemplando análises dos efeitos da modularização sobre a eficiência de uma empresa.

Com base nas orientações de Morandi e Camargo (2015) e no trabalho de Kubota e Cauchick Miguel (2013) foram definidas as seguintes palavras/termos-chave para consulta: *Modularization*, *Modularisation* (Modularização), *Modularity* (Modularidade), *Modular* (Modular), *Módulo* (Módulo), *Modular product* (Produto modular), *Modular production* (Produção modular), *Modular Project* (Projeto modular) e *Modular service* (Serviço modular). A busca por artigos e dissertações utilizando as palavras/termos-chave definidas foi efetuada em bases de dados nacionais e internacionais. O Quadro 1 sintetiza as fontes pesquisadas.

Quadro 1: Bases de dados pesquisadas

<b>Categoria</b>	<b>Fonte de informação</b>
Bases de informação de periódicos científicos – Internacionais	EBSCO SCOPUS SCIENCE DIRECT SCIELO
Bases de informação de periódicos científicos e teses e dissertações – Nacionais	BDTD/IBCT – (Biblioteca digital de teses e dissertações/Instituto brasileiro de ciência e tecnologia) SCIELO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas bases de dados acessadas foram utilizados filtros para remover áreas não relacionadas ao tema de pesquisa, tais como Ciências da Saúde, Química industrial e Geologia, por exemplo. Para atender ao requisito de pesquisa, uma

dessas palavras/termos-chave deveria constar do título, resumo ou palavras-chave do artigo. Os resultados relativos ao primeiro estágio da pesquisa (evolução do interesse acadêmico pelo tema) são sintetizados na Tabela 1:

Tabela 1: Evolução das publicações acadêmicas sobre modularização

Período	Ebsco	Scopus	Science Direct	Scielo – Nacional Internacional	BDT/IBCT	Total de publicações
2013	676	199	189	111	2	1.177
2012	769	194	150	111	1	1.225
2011	768	192	127	110	1	1.198
2010	632	186	109	100	1	1.028
2009	613	155	102	85	-	955
2008	583	122	72	82	2	861
2007	564	120	95	59	3	841
2006	504	99	86	53	2	744
2005	418	91	76	42	1	628
2004	452	74	72	38	-	636
2003	426	56	63	34	2	581
2002	323	54	73	20	-	470
2001	158	43	53	17	-	271
2000	118	36	59	8	-	221
1999	97	43	55	8	-	203
1998	99	28	51	6	-	184
1997	74	30	37	6	-	147
1996	67	35	53	3	-	158
1995	47	17	40	2	-	106
1994	28	14	28	1	-	71
1993	20	15	17	-	-	52
1992	16	17	14	-	-	47
1991	23	9	8	1	-	41
1990	12	5	6	-	-	23

Fonte: Elaborado pelo autor.

No período anterior ao ano de 1990 não foram identificados volumes relevantes de publicações. Essa constatação está alinhada com Salvador (2007), que destaca que o tema da modularização tornou-se comum na literatura de gestão de operações e produção a partir da década de 1990. Entre as décadas de 1990 e de 2000, percebe-se um aumento de 559,86% no número de publicações. Tal tendência de crescimento nas publicações também é observada de 2011 a 2013.

Os dados apresentados corroboram diferentes autores (ERNST; KAMRAD, 2000; CHUNG, 2002; HOLMQVIST; PERSSON, 2003; PANDREMENOS et al., 2009; BORJESSON, 2009; MACDUFFIE, 2013) que destacam o crescente interesse acadêmico pelo tema da modularização. No entanto, apesar desse interesse pelo



tema da modularização, ainda existem questões a serem exploradas, como por exemplo: pesquisas que contemplam os efeitos da modularização sobre o desempenho das organizações, pesquisas que comprovem os benefícios da modularização sob o ponto de vista econômico, pesquisas que avaliem o retorno sobre o investimento (ROI) da modularização, entre outras.

Nas mesmas bases de dados referidas, efetuou-se um segundo estágio da pesquisa. Nessa fase, buscou-se identificar estudos que avaliaram os efeitos em geral da modularização na eficiência em particular. Para efetuar essa pesquisa, foram combinadas as palavras/termos-chave referidas anteriormente com: *Data envelopment analysis* (análise envoltória de dados), *Productivity* (produtividade), *Efficiency* (eficiência) e *performance* (desempenho). No Quadro 2, são sintetizadas as fontes pesquisadas e as palavras/termos-chave centrais e de ligação.

Quadro 2: Critérios para pesquisa nas bases de dados e artigos

(Continua)

Fonte	Palavra-chave central	Conector	Palavra-chave de ligação
Nacional	Modularização Modularidade Modular Módulo Produto modular Produção modular Projeto modular Serviço modular	E	Análise envoltória de dados
Nacional	Modularização Modularidade Modular Módulo Produto modular Produção modular Projeto modular Serviço modular	E	Produtividade
Nacional	Modularização Modularidade Modular Módulo Produto modular Produção modular Projeto modular Serviço modular	E	Eficiência
Nacional	Modularização Modularidade Modular Módulo Produto modular Produção modular Projeto modular Serviço modular	E	Desempenho

(Conclusão)

<b>Fonte</b>	<b>Palavra-chave central</b>	<b>Conector</b>	<b>Palavra-chave de ligação</b>
Internacional	<i>Modularization Modularisation Modularity Modular Module Modular product Modular production Modular project Modular service</i>	AND	<i>Data envelopment analysis</i>
Internacional	<i>Modularization Modularisation Modularity Modular Module Modular product Modular production Modular project Modular service</i>	AND	<i>Productivity</i>
Internacional	<i>Modularization Modularisation Modularity Modular Module Modular product Modular production Modular project Modular service</i>	AND	<i>Efficiency</i>
Internacional	<i>Modularization Modularisation Modularity Modular Module Modular product Modular production Modular project Modular service</i>	AND	<i>Performance</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a pesquisa combinada das palavras-chave indicadas no Quadro 2, não foram encontrados estudos relacionando os efeitos da implementação da modularização na eficiência. No entanto, identificou-se que existem autores que efetuaram pesquisas contemplando a relação entre os temas da modularização e o desempenho competitivo das organizações. (LAU ANTONIO; YAM; TANG, 2007; LAU ANTONIO; RICHARD; TANG, 2009; DANESE; FILIPPINI, 2010; JACOBS et al. 2011; DANESE; FILIPPINI, 2013; BOER; HANSEN, 2014).

Lau Antonio, Yam e Tang (2007) efetuaram pesquisa em empresas Chinesas que produzem produtos eletrônicos, brinquedos e plásticos para avaliar a relação entre modularização e as dimensões competitivas. A pesquisa tipo *survey* em 285 empresas mostrou que a modularização influencia positivamente os desempenhos

de entrega, flexibilidade e atendimento ao cliente. Outra pesquisa tipo *survey* foi desenvolvida por Lau Antonio, Richard e Tang (2009) em 251 empresas Chinesas. Os autores constataram que a modularização de produtos aumenta o nível de inovação e flexibilidade da empresa e também proporciona um melhor nível de atendimento ao cliente.

Danese e Filippini (2010, 2013) desenvolveram investigações tipo *survey* e mostraram que a modularização de produtos tem efeito direto e positivo sobre o tempo de desenvolvimento de novos produtos e sobre o desempenho individual de cada produto. Jacobs et al. (2011) efetuaram uma pesquisa tipo *survey* com 57 fornecedores da indústria automobilística na América do Norte e concluíram que a modularização de produto afeta positivamente a modularidade de processo, a agilidade e o desempenho de fabricação, além de contribuir para o crescimento da empresa.

No entanto, nas pesquisas desenvolvidas por Lau Antonio, Yam e Tang (2007), Lau Antonio, Richard e Tang (2009), Danese e Filippini (2010, 2013) e Jacobs et al. (2011), os formulários de perguntas foram direcionados aos gerentes, diretores e vice-presidentes das empresas estudadas. Por um lado, essas pesquisas contribuíram para uma melhor compreensão dos efeitos gerais da modularização. Por outro lado, as evidências empíricas foram baseadas em medidas subjetivas (percepções), que contribuem para o entendimento de uma dimensão da realidade, mas são sujeitas à pressão por respostas positivas e por diferentes interpretações dos eventos por parte dos respondentes. (O'LEARY-KELLY; VOKURKA, 1998). A presente pesquisa busca superar essa limitação com um estudo de caso em profundidade, baseando as conclusões em dados coletados e processos observados.

Boer e Hansen (2014) efetuaram um levantamento bibliográfico para verificar pesquisas que contemplam efeitos da modularização sobre o desempenho das organizações e concluíram que: i) evidências empíricas sobre os benefícios da implementação da modularização são escassas na literatura; ii) há necessidade de investigações considerando indicadores de desempenho para os processo de Engenharia de Produtos e Produção nas empresas; e iii) os estudos que avaliam desempenho encontrados na literatura são inconclusivos.

Nesse sentido, Boer e Hansen (2014) destacam a necessidade de se evoluir em pesquisas que efetuam avaliação dos efeitos da modularização, visto que as

empresas precisam mais do que argumentos sem evidências ao decidir adotar ou continuar a imprimir esforços para o desenvolvimento da modularização. A falta de verificação em larga escala das vantagens da modularização do produto sobre o desempenho pode dificultar a implementação e a continuidade da utilização da modularização nas organizações. (BOER; HANSEN, 2014).

Diante do exposto, entende-se que estudos empíricos sobre os efeitos da modularização são escassos e insuficientes. Não foi identificado, na pesquisa efetuada, estudo de caso que analise quantitativamente e com profundidade os efeitos da modularização sobre a eficiência da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo da forma como esta pesquisa pretende abordar o tema. Nesse sentido, entende-se que o presente trabalho contribui para a sustentação empírica e o avanço da teoria existente.

Também foram identificados outros autores que apontam a necessidade de se evoluir em avaliações e medições quanto aos efeitos da modularização nas organizações: Gershenson, Prasad e Zhang (2004), Campagnolo e Camuffo (2009), Matsubara e Pourmohammadi (2010), Starr (2010), Jacobs et al. (2011) e Kubota, Campos e Cauchick Miguel (2014). Outro aspecto relevante é que foram encontrados estudos contemplando a implementação da modularização em empresas fabricantes de ônibus. (SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012; NAPPER, 2014).

Gershenson, Prasad e Zhang (2004) apontam a necessidade de avaliações quantitativas para medir o desempenho da modularização. Nesse sentido, a presente pesquisa propõe uma análise quantitativa dos efeitos da modularização sobre as eficiências técnicas da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo de uma empresa fabricante de ônibus. Para efetuar tal análise, este trabalho utiliza a técnica da análise envoltória de dados (DEA) combinada com o teste estatístico ANOVA, desenvolvendo um modelo que pode servir de base para futuras pesquisas que objetivem medir os benefícios da modularização.

Campagnolo e Camuffo (2009) apontam que esforços de pesquisa devem ser destinados a estudar os efeitos do desenvolvimento de uma arquitetura modular de produtos sobre o desempenho das empresas. Starr (2010) destaca que é importante empregar o rigor acadêmico para planejar, modelar e medir a modularização nas organizações. A possibilidade de utilizar métodos de modelagem para avaliar os benefícios do uso da modularização nas empresas também é apontada por

Matsubara e Pourmahammadi (2010). Nesse contexto, o presente trabalho propõe um estudo que emprega a análise envoltória de dados (DEA), que pode ser considerada um método de modelagem e foi utilizada para medir a eficiência da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo de uma empresa de forma longitudinal.

De acordo com Gershenson, Prasad e Zhang (2003) e Lau Antonio, Yam e Tang (2007), a literatura associa amplos benefícios à modularização, no entanto não existem estudos abrangentes para validá-los. Nesse sentido, Jacobs et al. (2011) também apontam a escassez de evidências empíricas que comprovem os benefícios da modularização. Kubota, Campos e Cauchick Miguel (2014) sugerem o desenvolvimento de estudos que demonstrem os benefícios da modularização, o que pode ser feito por meio de métodos quantitativos (ex.: modelagem e simulação com dados reais de companhias), qualitativos (ex.: estudos de caso em profundidade, com análise do histórico de empresas que alteraram sua estrutura produtiva ou o seu projeto de produto) ou abordagens combinadas.

Este trabalho efetua uma análise dos efeitos da modularização de produtos sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo, buscando, por meio de um estudo de caso, apresentar evidências dos efeitos esperados e comprovar ou refutar empiricamente benefícios associados à modularização que são citados na literatura.

O trabalho de Sushandoyo e Magnusson (2012) investiga a relação entre modularização e inovação nas empresas fabricantes de ônibus Scania e Volvo. Dentre os objetivos dessas organizações com a implementação da modularização, destaca-se a busca pelo aumento da produtividade a partir da economia de escala. No entanto, na pesquisa de Sushandoyo e Magnusson (2012), não houve medição dos benefícios esperados. O presente trabalho efetua uma medição e procura mostrar se a modularização proporciona ou não o aumento da produtividade e da eficiência.

Napper (2014) analisa a utilização da modularização para configuração da parte interior do ônibus. Segundo o autor, um dos principais objetivos de um sistema modular é mitigar os efeitos negativos proporcionados pela variedade de produtos. Napper (2014) apresenta, no entanto, apenas uma estimativa de redução de horas de fabricação na confecção do interior de um ônibus modular em comparação à confecção de um ônibus não modular. Entende-se que essa medição não representa o desempenho da empresa ou de um sistema modular, visto que é necessário

ampliar essas análises. Dessa forma, a presente pesquisa estende a amplitude da análise em número de itens verificados e em período de tempo, além de considerar a confecção do veículo completo (interior e exterior).

Pelas razões expostas nas pesquisas anteriores (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004; CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2009; MATSUBARA; POURMOHAMMADI, 2010; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012; KUBOTA; CAMPOS; CAUCHICK MIGUEL, 2014; NAPPER, 2014; BOER; HANSEN, 2014), entende-se que é necessário efetuar uma pesquisa que aprofunde, empiricamente, o entendimento dos efeitos da modularização no desempenho operacional da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo de uma organização. Nesse sentido, o desempenho operacional desta dissertação contempla as dimensões de produtividade e eficiência técnica.

No trabalho seminal de Starr (1965) é sugerida a utilização da modularização de produtos e processos como alternativa para melhoria da produtividade e eficiência. A importância da produtividade e da eficiência, bem como da utilização da modularização foi abordada pelo autor em trabalhos posteriores. (STARR, 1973, 1975, 2010). Assim, verifica-se que desde o trabalho de Starr (1965) até os dias atuais passaram-se quase 5 décadas, de modo que se compreende que essas análises são relevantes e necessárias. A presente pesquisa verifica se a modularização causa efeitos na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo de uma organização. Tais efeitos podem ser entendidos como aumento da produtividade e da eficiência técnica. Dessa forma, entende-se que este estudo contribui com o trabalho de Starr (1965) e com um conjunto de esforços de pesquisa que estão sendo realizados com o objetivo de entender os efeitos da modularização.

Outra contribuição da pesquisa é a utilização da DEA para o cálculo da eficiência, visto que não foram identificados estudos que empregam tal técnica em trabalhos relacionados com a modularização. Entende-se que a DEA pode suprir a falta de um método para medir os efeitos da modularização, visto que está sendo cada vez mais utilizada para avaliações de desempenho contemplando a Engenharia de Produtos (SWINK; TALLURI; PANDEJPONG, 2006; TRAPPEY; CHIANG, 2008; CHEN et al., 2012) e o Processo Produtivo. (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; IYER; SARANGA; SESHADRI, 2013; PARK; LEE; ZHU, 2014; SOUZA, 2014). Em estudo similar desenvolvido na indústria automobilística indiana, Iyer, Saranga e Seshadri (2013) analisaram os efeitos da implementação do *Total Quality*

*Management* (TQM) sobre a eficiência técnica utilizando a análise envoltória de dados (DEA). Os resultados apontados pelos autores indicam incremento nos escores de eficiência das empresas estudadas após a implementação do TQM. Nesse sentido, a presente pesquisa analisa se a modularização também impacta positivamente (ou não) na eficiência de uma empresa que compete no mesmo mercado (indústria automobilística) em nível global.

Considerando que na literatura ainda existem lacunas no que se refere aos efeitos da modularização nas organizações, entende-se que este estudo tem relevância acadêmica. Os resultados desta pesquisa poderão servir para proporcionar avanços no conhecimento científico sobre o tema, pois ela apresenta os seguintes aspectos importantes: i) propõe um estudo em profundidade contemplando uma medição quantitativa de desempenho. (GERSHENSON; PRASAD; ZHANG, 2004; KUBOTA; CAMPOS; CAUCHICK MIGUEL, 2014; BOER; HANSEN, 2014); ii) propõe a utilização de técnicas de medição e efetua uma análise dos benefícios esperados com a utilização da modularização. (CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2009, JACOBS et al., 2011; SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012; NAPPER, 2014); iii) utiliza a DEA, que pode ser considerada um método de modelagem. (STARR, 2010; MATSUBARA; POURMOHAMMADI, 2010; KUBOTA; CAMPOS; CAUCHICK MIGUEL, 2014). Portanto, entende-se que este trabalho dialoga com a comunidade acadêmica.

Da mesma forma, o trabalho apresenta relevância sob a ótica empresarial. De acordo com dados obtidos na Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus (FABUS), a produção total de carrocerias no mercado brasileiro está dividida entre 4 segmentos (Urbano, Rodoviário, Intermunicipal e Micro). A competição está centrada entre sete empresas no mercado (MARCOPOLO, CIFERAL, COMIL, INDUSCAR, IRIZAR, NEOBUS e MASCARELLO). Ao analisar dados relativos à produção de carrocerias de ônibus no mercado brasileiro no período de 2006 a 2008, percebe-se que a demanda apresentou crescimento de 28,81%. No ano de 2009, entretanto, o mercado apresentou retração, e a produção caiu 26,7% em relação a 2008. A partir de 2010, o mercado retomou o crescimento em vendas e, desde então, manteve-se estável, apresentando reduzidas variações. Na comparação dos anos de 2012 e 2013, por exemplo, percebe-se um aumento de 0,45% na produção de veículos. Na Tabela 2 são evidenciados os dados referentes à produção de carrocerias de ônibus no período de 2006 a 2013, de acordo com a FABUS.

Tabela 2: Produção de carrocerias de ônibus no mercado brasileiro

Ano	Mercado Interno (un.)	Mercado Externo (un.)	Total (un.)
2013	28.596	4.097	32.693
2012	28.319	4.229	32.548
2011	31.554	3.977	35.531
2010	28.035	4.563	32.598
2009	20.990	3.903	24.893
2008	25.109	6.422	31.531
2007	21.902	6.337	28.239
2006	18.372	6.106	24.478

Fonte: Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus (FABUS).

Esse cenário de reduzida variação no crescimento do mercado a partir do ano de 2010 sugere aumento na competição entre as empresas que atuam no setor. Entende-se que para apresentar crescimento, uma empresa deve obter parte da participação de mercado de outra empresa competidora. Nesse sentido, verifica-se que é importante que as organizações busquem otimizar a utilização dos seus recursos, pois se torna mais difícil obter economia com ganhos de escala, considerando aumento do volume de produção e vendas devido ao cenário do mercado atual. Tais dados reforçam a importância da presente pesquisa, pois a necessidade de utilizar os recursos da melhor forma demonstra a relevância de aumentar a eficiência da empresa.

Com os dados obtidos na FABUS, efetuou-se o cálculo da participação de mercado (*market-share*) da empresa estudada. Também se fez uma segregação dos itens produzidos por segmento na organização analisada. Os dados são expostos na Tabela 3:

Tabela 3: Produção por segmento da empresa pesquisada

Ano	Urbano	Rodoviário	Micro	Intermunicipal	Total empresa (un.)	Total mercado (un.)	Market-Share
2013	1.256	1.128	444	498	3.326	32.693	10,17%
2012	1.475	932	474	450	3.331	32.548	10,23%
2011	1.659	1.153	661	645	4.118	35.531	11,59%
2010	1.391	903	574	377	3.245	32.598	9,95%
2009	1.255	685	434	278	2.652	24.893	10,65%
2008	1.360	776	548	391	3.075	31.531	9,75%
2007	1.126	739	414	360	2.639	28.239	9,34%
2006	905	782	307	227	2.221	24.478	9,07%
<b>TOTAL</b>	<b>10.427</b>	<b>7.098</b>	<b>3.856</b>	<b>3.226</b>	<b>24.607</b>	<b>242.511</b>	-

Fonte: Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus (FABUS).



Ao analisar a Tabela 3, é possível observar que o principal segmento de atuação da empresa é o urbano, com 10.427 unidades produzidas e comercializadas no período de 2006 a 2013. Em segundo lugar, observa-se o segmento rodoviário, com 7.098 unidades produzidas e comercializadas no mesmo período. Os volumes de produção e vendas seguem com o segmento micro e intermunicipal, com 3.856 e 3.226 unidades produzidas e comercializadas respectivamente.

Ao analisar a quota de mercado (*market-share*) da empresa estudada, percebe-se um aumento nos índices considerando-se o período de 2006 a 2009. No ano de 2006, a empresa tinha uma participação de 9,07% no mercado de montagem de carrocerias de ônibus. No ano de 2009, a cota de mercado da organização aumentou para 10,65%. No entanto, em relação aos últimos anos (2011, 2012, 2013), percebe-se que a empresa reduziu sua participação de mercado, visto que em 2011 seu *market-share* foi 11,59% e no ano de 2013 foi de 10,17%. Tal redução reforça a necessidade de otimizar a utilização dos recursos.

Entende-se que o cenário exposto apoia a justificativa da presente pesquisa, tendo em vista que a medição efetuada através da análise envoltória de dados (DEA) pode apontar informações para que sejam definidas metas de melhoria na empresa. A DEA não indica apenas a posição das unidades de análise (DMU's) eficientes e ineficientes, mas também fornece um parâmetro para o aumento do desempenho das empresas ineficientes através do *benchmark* efetuado. (COOK; SEIFORD, 2009). Nessa perspectiva, entende-se que as informações geradas por esta pesquisa podem auxiliar os gestores da organização na tomada de decisões quanto a melhorias na utilização dos recursos para aumento da competitividade. Através de alvos e folgas que são fornecidos pela aplicação da técnica DEA, torna-se possível que o gestor estabeleça metas de melhorias para utilização dos recursos em cada unidade de contexto de análise investigada.

Com base nos argumentos apresentados, percebe-se que é relevante desenvolver um trabalho que avalie os efeitos da implementação da modularização de produtos sobre a eficiência da organização. As informações geradas por essa análise podem suportar a tomada de decisões estratégicas pelos gestores da empresa. Entende-se, também, que esta pesquisa apresenta importantes contribuições para a indústria de montadoras de carrocerias de ônibus, já que a necessidade de customização de produtos torna o processo complexo, motivo pelo

qual é preciso controlar e analisar constantemente a eficiência quanto à utilização dos recursos empregados. Além disso, este trabalho pode contribuir para a sociedade, podendo ser utilizado como auxílio em novos estudos voltados à análise de eficiência em outras empresas que implantaram ou pretendem implementar a modularização. Na próxima seção, apresenta-se a estrutura deste trabalho.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo está organizado em sete capítulos. No primeiro, apresenta-se a contextualização do tema e abordam-se alguns aspectos relacionados à modularização, eficiência e análise envoltória de dados (DEA), com o intuito de sustentar a questão de pesquisa. Nesse capítulo introdutório também são evidenciados o objeto de estudo e o problema de pesquisa, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos, seguidos da relevância da pesquisa para os meios acadêmico e empresarial.

No segundo capítulo evidencia-se o referencial teórico referente ao tema de pesquisa, fazendo uma revisão bibliográfica que aborda os principais tópicos relevantes ao tema e ao objeto de estudo. O terceiro capítulo apresenta a metodologia da pesquisa, a qual está dividida em: delineamento da pesquisa, método de trabalho, projeto do modelo DEA, procedimento de coleta de dados, refinamento do modelo da análise envoltória de dados (DEA), procedimentos de análise de dados e delimitações do trabalho.

No quarto capítulo contextualiza-se a empresa estudada, contemplando a caracterização de seus produtos e processos e um breve histórico da implementação da modularização na organização. No capítulo cinco, efetua-se as análises das eficiências. Primeiramente, são analisados e caracterizados os efeitos da modularização sobre a Engenharia de Produtos, e posteriormente sobre o Processo Produtivo. No capítulo cinco também se apresenta os testes estatísticos propostos (ANOVA e validação dos pressupostos da ANOVA) para verificar se existe diferença significativa entre as médias de eficiência do período anterior à modularização e do período posterior à modularização. Finalmente, são realizadas análises para quantificar os efeitos observados por meio da verificação do impacto

causal nas séries temporais. As séries temporais podem ser entendidas, neste trabalho, como escores de eficiência calculados pela DEA.

O capítulo seis contempla a discussão dos resultados obtidos e busca evidenciar as contribuições da presente pesquisa sob o ponto de vista da teoria e sob a ótica da empresa. Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo, seguidas de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para promover a estruturação da pesquisa, apresenta-se o referencial teórico com a descrição dos conceitos de modularização, produtividade, eficiência técnica, análise envoltória de dados (DEA), pressupostos para utilização da ANOVA e Análise da Variância (ANOVA). Também são evidenciados conceitos relativos às análises de séries temporais que serão utilizadas nesta dissertação.

### 2.1 MODULARIZAÇÃO: CONTEXTO E DESDOBRAMENTOS

A variedade dos produtos ofertados pelas empresas tem aumentado ao longo do tempo. Existem muitas razões para esse aumento, tais como: demanda dos clientes por novas funções e características dos produtos, diferentes necessidades regionais, elevado número de segmentos de mercados com diferentes necessidades e especificações de certificação, surgimento de novos materiais e tecnologias, competição acirrada entre fabricantes e varejistas para diferenciar seus produtos, desejo dos consumidores por produtos exclusivos, entre outros. (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; ELMARAGHY et al., 2013).

Esse cenário, no entanto, pode aumentar os custos, reduzir as margens de lucro e contribuir para a redução do desempenho operacional. (JOHNSON, 2003; PATEL; JAYARAM, 2014). O desempenho operacional refere-se a resultados relativos aos custos operacionais, à eficiência global da empresa, à qualidade dos produtos, ao volume de produção e à gestão de entregas. (PATEL; JAYARAM, 2014). No ambiente organizacional, gerir a utilização dos recursos de forma eficiente é importante para aumentar a produtividade e alcançar e manter a vantagem competitiva de forma sustentável. (CHEN; LIAW, 2001; ELMARAGHY et al., 2013).

Do ponto de vista da empresa, entende-se que existe um *trade-off* entre aumento da variedade de produtos e desempenho operacional. Esse *trade-off* pode ser minimizado com a utilização da modularização. (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002). A modularização é essencial para aumentar a possibilidade de variedade de produtos (PATEL; JAYARAM, 2014), pois tem como princípio básico planejar, desenvolver e produzir componentes com capacidade de

gerar combinações que permitam formar uma ampla variedade de produtos finais. (STARR, 1965; SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002).

Langlois (2002) descreve a modularização como um conjunto geral de princípios para gestão da complexidade. O conceito de complexidade deste trabalho é o descrito por Simon (1962). Para Simon (1962, p. 468):

um sistema complexo é composto por um grande número de partes que interagem de uma forma não simples. Em tais sistemas, o todo é mais que a soma das partes, não no sentido metafísico final, mas no sentido pragmático importante, visto que dada as propriedades das partes e as leis da sua interação, não se trata de uma questão trivial para inferir as propriedades do conjunto.

Persson e Ahlstrom (2006) argumentam que uma das principais características da complexidade é a incerteza estrutural em termos de diferenciação e interdependência do sistema. Diferenciação é o número de elementos variados, e interdependência é o grau de relação entre os elementos.

Nesse sentido, a modularização auxilia no planejamento e na concepção de produtos complexos por meio da decomposição do produto em subsistemas menores, que podem ser projetados de forma independente, porém mantendo o objetivo funcional do produto final. (BALDWIN; CLARK, 1997; LANGLOIS, 2002). A eficácia da modularização depende dos critérios utilizados na decomposição do sistema em módulos, pois no momento da modularização cada módulo deve ter suas entradas e saídas com as devidas interfaces definidas. (PARNAS, 1972).

O número de componentes distintos que compõem o produto é uma das medidas levadas em consideração para determinar o nível de complexidade de um produto. (PAHL; BEITZ, 1996; PERSSON; AHLSTROM, 2006). Outra medida considerada é o número de interfaces entre os componentes. (PERSSON; AHLSTROM, 2006). Nessa perspectiva, Persson e Ahlstrom (2006) argumentam que um automóvel pode ser considerado um produto complexo, pois pode ser composto por aproximadamente 10.000 peças e possuir diversos sistemas, com diferentes funcionalidades e localizados em diferentes módulos. Nesse sentido, entende-se que como os ônibus (objeto de estudo desta dissertação) possuem um elevado número de subsistemas e componentes inter-relacionados, são bons exemplos de sistemas complexos. (SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012). Napper (2014) destaca que o projeto e a fabricação de uma carroceria de ônibus também podem ser considerados processos complexos.

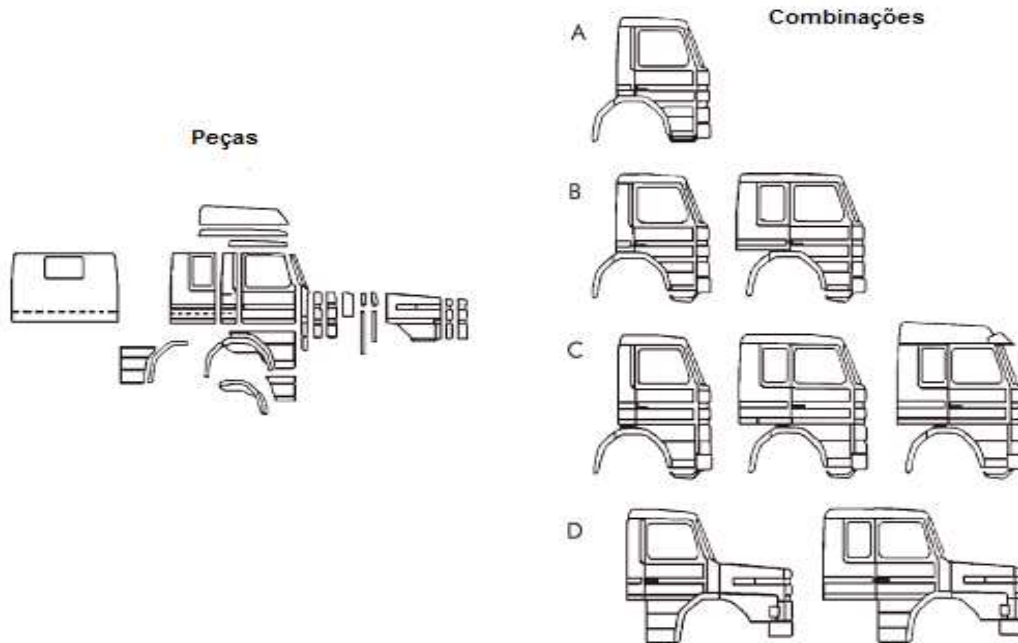
Starr (1965) articulou o conceito de produção modular em um artigo pioneiro publicado na *Harvard Business Review*. O artigo pode ser considerado uma evolução do livro *Product Design and Decision Theory*. (STARR, 1963). O conceito de produção modular criou oportunidade para a customização em massa (AGRAWAL et al., 2013; CABIGIOSU; ZIRPOLI; CAMUFFO, 2013), para o aumento da flexibilidade e para a melhoria da eficiência operacional e serviu como direcionador para a desintegração vertical das cadeias de abastecimento. (GUPTA; ROTH; STARR, 2007). Starr (1965) também descreve que a tendência do aumento da variedade de produtos reforça o conceito de produção modular que, aliada à automação dos processos, pode proporcionar eficiência operacional sem elevação de custos.

Persson e Ahlstrom (2006) exemplificam a utilização da modularização no Walkman, lançado pela Sony em 1979. A Sony criou mais de 160 variações do Walkman, misturando e combinando componentes modulares em alguns projetos de produtos básicos. Outro exemplo são os automóveis da Volvo, empresa que oferece mais de um milhão de variantes de veículos. A organização produz cinco modelos a partir de uma plataforma de produção, sendo eles disponíveis em 14 cores, com 9 tipos motores, 5 alternativas de transmissão, 22 tipos de acabamento interior e 9 variações de rodados. (BASK et al., 2011). Nesse sentido, Sushandoyo e Magnusson (2012) destacam que a Volvo utiliza a modularização como estratégia em nível de sistema, compartilhando componentes entre os produtos. Dessa forma, concentra esforços tecnológicos para solucionar os problemas em nível de subsistemas e componentes.

Na indústria de caminhões, a Scania tem utilizado com sucesso a estratégia de modularização aliada à melhoria contínua desde os anos 1980. (PERSSON; AHLSTROM, 2006; SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012). Cada caminhão da Scania é construído em quatro grandes módulos: motor, transmissão, cabine e chassi. A meta da empresa é padronizar esses módulos de tal forma que qualquer tamanho de módulo possa ser montado em conjunto com todos os tamanhos dos outros módulos. Por exemplo, cada um dos três diferentes tipos de cabine pode ser combinado com qualquer tamanho de motor (há quatro tamanhos diferentes de motor). Isso é possível através das interfaces de módulos padronizados, nesse caso particular, localizando os suportes de fixação em lugares idênticos nos três projetos de produto, de modo a possibilitar todas as variações de tamanhos de motor. Cada um dos principais módulos foi dividido em módulos menores e independentes. Ao fazer pequenas alterações apenas em alguns desses módulos menores, torna-se

possível alterar o desempenho de todo o caminhão. (PERSSON; AHLSTROM, 2006). A exemplificação da modularização da cabine do caminhão da Scania está ilustrada na Figura 4:

Figura 4: Modularização da cabine do caminhão da Scania



Fonte: Ericson e Erixon (1999, p. 6).

Usando a estratégia de modularização, a empresa pode criar caminhões personalizados para o cliente individual e ainda manter economias de escala na fabricação com a redução do número de componentes e simplificação da manufatura. (PERSSON; AHLSTROM, 2006; SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012). Com a modularização, a Scania diminuiu o número de peças (*part numbers*), simplificando o projeto e a fabricação dos caminhões. Os efeitos da redução de peças na construção da cabine dos caminhões da Scania são sintetizados no Quadro 3:

Quadro 3: Peças e combinações possíveis com a modularização

<b>Componente</b>	<b>Antes da modularização</b>	<b>Depois da modularização</b>
Peças de chapa metálica	1.400	380
Peças de montagem de interiores	1.800	600
Peças do teto	7	3
Peças frontais	8	3
Peças nas portas	12	8
Para-brisas	3	1
Ferramentas de chapa metálica	1.600	280

Fonte: Erixon (1998).

Apesar dos benefícios relatados, foram identificados estudos (ABERNATHY; UTTERBACK, 1978; ULRICH, 1995; MILLER; ELGARD, 1998; BALDWIN; CLARK, 1997; BALDWIN; CLARK, 2000; SAKO; MURRAY, 2000; HUANG; LI, 2008) que oferecem diferentes conceitos e classificações para a modularização. Não obstante essas tentativas, percebe-se que permanecem dúvidas (MILTENBURG, 2003) e que ainda não existe uma conceituação universalmente aceita sobre o tema. (ERICSON; ERIXON, 1999; STARR, 2010). Diante disso, são utilizadas, neste trabalho, as seguintes definições conceituais (Quadro 4):

Quadro 4: Definições conceituais

<b>Termo</b>	<b>Definição conceitual</b>	<b>Autor(es)</b>
Modularização	É uma estratégia para gestão da variedade de produtos e variabilidade dos processos que pode ser implantada nas organizações	BALDWIN; CLARK, 1997; BALDWIN; CLARK, 2003; HUANG; LI, 2008
Módulo	É a unidade funcional com interfaces padronizadas que permitem ser combinadas para compor produtos	MILLER; ELGARD, 1998; MIKKOLA; GASSMANN, 2003; CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2010.
Interfaces	São as conexões que permitem que os módulos se conectem, se ajustem e se comuniquem	BALDWIN; CLARK, 1997; MILTENBURG, 2003; CHEN; LIU, 2005.
Arquitetura Modular	É a estrutura em que os componentes funcionais do produto são dispostos em partes físicas, de modo a ocorrerem as interações entres as partes através das interfaces	ULRICH, 1995; SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; ULKU; SCHMIDT; DIMOFTE, 2012
Modularidade	São as abordagens referentes à fragmentação da estratégia de modularização	SAKO; MURRAY, 1999; SAKO; MURRAY, 2000; PANDREMENOS et al., 2009

Fonte: Elaborado pelo autor com base nas pesquisas.

Após a apresentação da modularização como estratégia, são descritos, nas próximas seções, os conceitos referentes a módulos e interfaces, arquitetura modular e modularidade.

### 2.1.1 Módulos e Interfaces

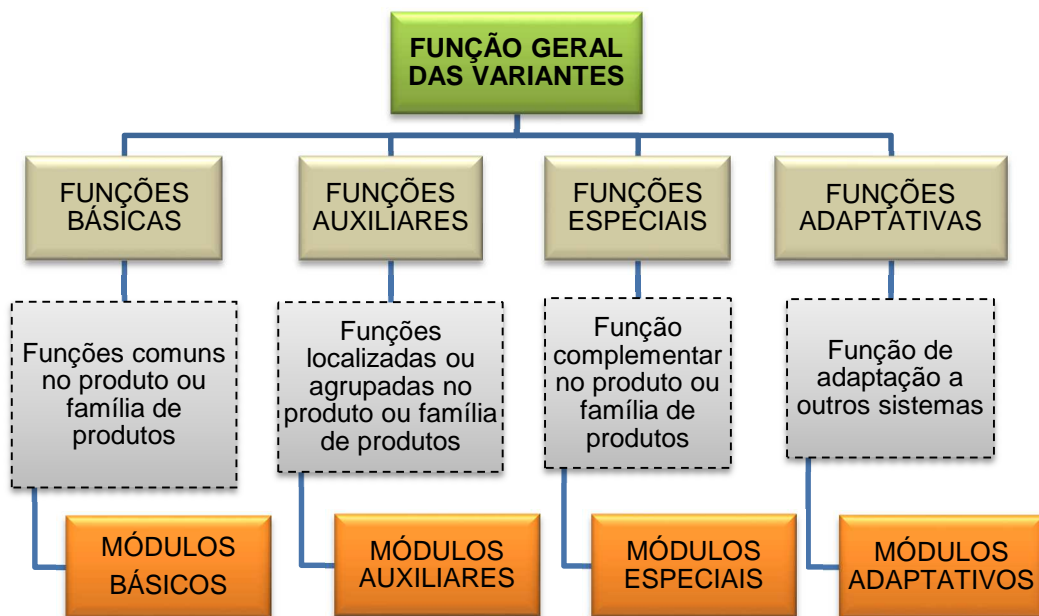
Módulos podem ser entendidos como unidades funcionais com interfaces padronizadas que permitem uma variedade de combinações para composição de produtos. (MILLER; ELGARD, 1998; MIKKOLA; GASSMANN, 2003). Os módulos são especificados para permitir uma variedade de configurações sem perder a



funcionalidade. (MIKKOLA; GASSMANN, 2003). Nessas configurações, cada módulo se comunica e interage com outros módulos por meio de interfaces padronizadas. (CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2010). No desenvolvimento de produtos, o produto é decomposto em módulos, os quais podem ser desenvolvidos independente e simultaneamente pela própria organização ou por empresas diferentes, mantendo as interfaces padrão. (BALDWIN; CLARK, 2000).

Pahl e Beitz (1984) e Miller e Elgard (1998) sugerem propriedades que podem diferenciar um módulo do outro a partir da exploração da noção da função do módulo, classificando-os em módulos básicos, auxiliares, especiais e adaptativos. Essa classificação está ilustrada na Figura 5:

Figura 5: Classificação dos tipos de módulos



Fonte: Adaptado de Miller e Elgard (1998).

Os módulos básicos implementam funções que são comuns nos produtos ou em toda a família de produtos. Os módulos auxiliares implementam funções localizadas ou agrupadas no produto ou na família de produtos. Os módulos especiais complementam funções específicas de tarefas que não precisam aparecer em todas as variantes do produto. Por fim, os módulos adaptativos implementam funções relacionadas à adaptação a outros sistemas e a condições marginais. (MILLER; ELGARD, 1998; SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002).

No que se refere às interfaces, entende-se que são as conexões entre os módulos (BALDWIN; CLARK, 1997; MILTENBURG, 2003), ou seja, elementos que permitem que os módulos se conectem, se ajustem e se comuniquem. (CHEN; LIU, 2005). A especificação, a padronização e a simplificação das interfaces auxiliam a administração da variedade de produtos no projeto e na produção de produtos. (PERSSON; AHLSTROM, 2006). Nesse sentido, Sanchez (2000) efetua uma classificação das interfaces, conforme Quadro 5:

Quadro 5: Classificação das interfaces

<b>Classificação</b>	<b>Função</b>
Interface de conexão	Especifica como os componentes se conectam entre si
Interface volumétrica	Especifica o volume de espaço ocupado por um componente
Interface de transferência	Especifica como o componente é conectado e desconectado
Interface de controle	Especifica como é feita a troca de informações que indicam o desgaste do componente
Interface com o usuário	Especifica como os componentes recebem as solicitações dos usuários
Interface ambiental	Especifica como o componente interage como o meio ambiente ou com outros componentes

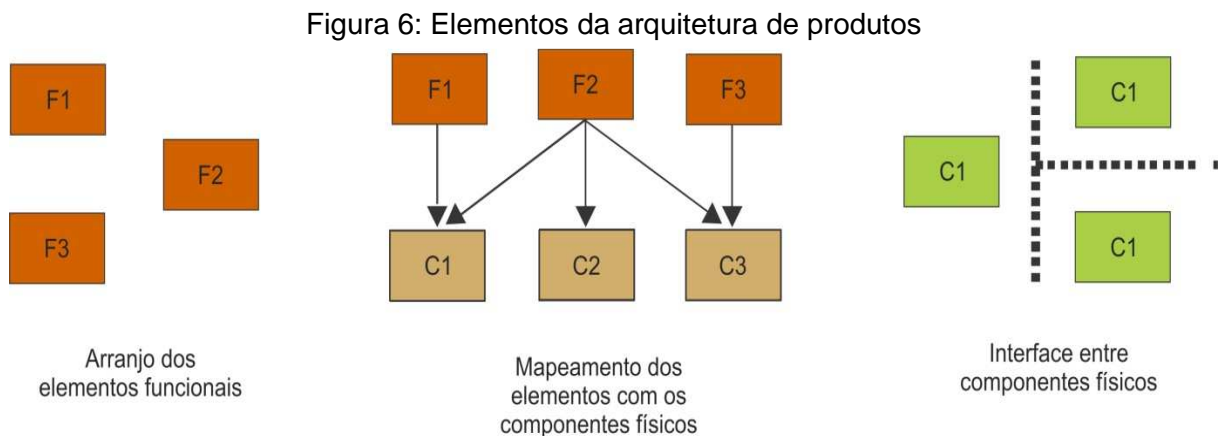
Fonte: Adaptado de Sanchez (2000).

Na seção 2.1.2 são apresentados conceitos referentes à arquitetura de produtos, além de se destacarem as diferenças entre produto modular e produto integral.

### **2.1.2 Arquitetura de Produtos (Modular e Integral)**

Os princípios das arquiteturas de produtos foram introduzidos na literatura por Abernathy e Utterback (1978) e posteriormente desenvolvidos por pesquisadores como Ulrich (1995), Baldwin e Clark (1997, 2000), Robertson e Ulrich (1998), Sanchez (2000) e Mikkola e Gassmann (2003). A arquitetura do produto é o arranjo dos elementos funcionais de um produto em vários módulos físicos, incluindo o mapeamento dos elementos funcionais aos componentes físicos e a especificação das interfaces entre os componentes físicos. A arquitetura de produto também pode ser entendida como a estrutura em que os componentes funcionais do produto são dispostos em partes físicas e a forma como ocorrem as interações entre as partes através das interfaces. (MIKKOLA; GASSMANN, 2003; CHEN; LIU, 2005).

Ulrich (1995) dividiu a arquitetura de produto em três principais elementos: i) o arranjo dos elementos funcionais; ii) o mapeamento dos elementos funcionais com os componentes físicos; e iii) as especificações das interfaces entre os componentes físicos. Conforme mostra a Figura 6, o arranjo dos elementos funcionais contempla o mapeamento das funções do produto (F1 – Função 1; F2 – Função 2; F3 – Função 3). Posteriormente, esses elementos funcionais (F1, F2, F3) devem ser conectados aos componentes físicos (C1 – Componente físico 1; C2 – Componente físico 2; C3 – Componente físico 3). Finalmente, devem ser definidas as interfaces entre os componentes físicos (C1, C2, C3), ou seja, deve-se especificar como esses componentes irão se comunicar entre si.



Fonte: Ulrich (1995).

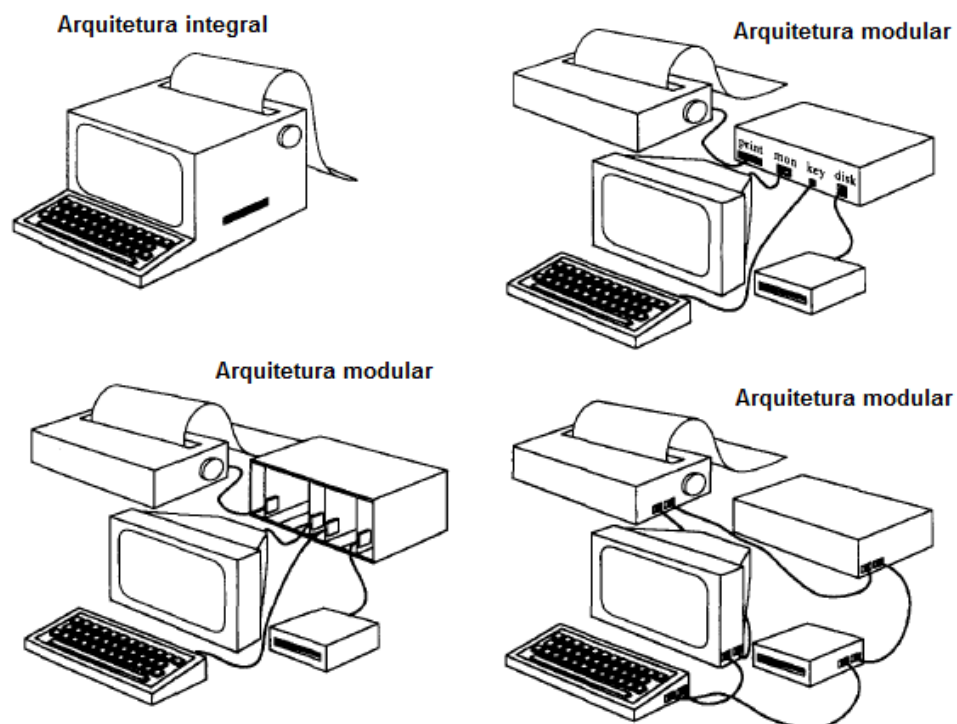
Persson e Ahlstrom (2006) exemplificam os elementos da arquitetura de produtos da seguinte forma: em um nível geral, a função de um automóvel é transportar motorista e passageiros de um determinado ponto a outro. Tal função principal pode ser dividida em subfunções (transportar de forma segura, com temperatura agradável (ar condicionado), com ambiente agradável (som automotivo), entre outras). O primeiro aspecto da arquitetura de produtos é que essas diferentes subfunções podem ser operacionalizadas por elementos funcionais e realizadas por diferentes módulos. Como essas funções são realizadas em componentes, o mapeamento dos elementos funcionais dos componentes físicos é o segundo aspecto da arquitetura do produto. O terceiro aspecto da definição de arquitetura de produto se concentra nas interfaces. Uma especificação de interface define o protocolo para as interações primárias através

de interfaces dos componentes e também determina se há uma conexão geométrica. (ULRICH, 1995).

A arquitetura de produtos pode apresentar duas configurações: arquitetura modular e arquitetura integral. Arquiteturas modulares de produtos são caracterizadas por interfaces dissociadas e mapeamento de um-para-um entre as funções e os componentes físicos. Tais aspectos permitem que cada elemento de caracterização funcional possa ser alterado mudando-se apenas os respectivos componentes, tornando possível que o desempenho de cada componente seja modificado independentemente. (ULRICH, 1995; SANCHEZ; MAHONEY, 1996). Uma arquitetura integral inclui um complexo (não diferenciado) mapeamento de elementos funcionais para componentes físicos e interfaces acopladas e não padronizadas entre componentes. (MILTENBURG, 2003). Nesse sentido, o desempenho é otimizado em nível de sistemas, e mudanças na funcionalidade do produto exigem alterações em vários componentes. (ULRICH, 1995).

Na Figura 7 é ilustrada, por meio de um produto, a diferença entre arquitetura modular e integral.


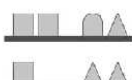
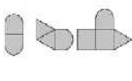


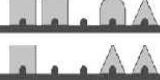
Figura 7: Exemplos de Computadores com arquitetura integral e modular



Fonte: Ulrich (1995, p. 426).

A pesquisa sobre modularização tem explorado as propriedades da arquitetura de produtos modulares, sugerindo que existem diferentes classificações para essas arquiteturas. (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002). Ulrich e Tung (1991) propõem uma classificação para os tipos de arquiteturas modulares com base nas configurações geométricas da arquitetura de uma família de produtos. A tipologia de Ulrich e Tung (1991) captura diferentes abordagens possíveis para combinar módulos, distinguindo-os entre variantes e módulos comuns. Ulrich (1995) propõe uma tipologia que relaciona a propriedade da interface entre os módulos como critério de classificação. As classificações das arquiteturas de produtos modulares são ilustradas na Figura 8:

Figura 8: Classificações das arquiteturas modulares

Autores	Critério de classificação	Classificação das arquiteturas de produtos modulares
Ulrich and Tung (1991)	Como a configuração do produto final é construída	 <p><i>Swapping component modularity:</i> Variantes do produto são obtidas por troca de um ou mais componentes (▶, ◐, ◑) no corpo do produto comum (■).</p>
		 <p><i>Fabricate-to-fit modularity:</i> Variantes do produto são obtidas por uma mudança contínua da característica variável (◒, ◓, ◔) dentro de um determinado componente.</p>
		 <p><i>Bus modularity:</i> Variantes do produto são obtido combinando qualquer tipo de componente de um conjunto de tipos de componentes ▶, ◐, ◑ com algum componente que tenha duas ou mais interfaces (■).</p>
		 <p><i>Sectional modularity:</i> Variantes do produto são obtidas misturando e combinando numa forma arbitrária um conjunto de componentes (▶, ◐, ◑) desde que estes estejam ligados em suas interfaces.</p>
Ulrich (1995)	Natureza das interfaces entre os componentes	 <p><i>Slot modularity:</i> Interfaces diferentes entre componentes diferentes (◒, ◓).</p>
		 <p><i>Sectional modularity:</i> todos os componentes estão conectados através de interfaces idênticas (◒).</p>
		 <p><i>Bus modularity:</i> Caso especial, no qual há um único componente (■), realizando a função de ligação.</p>

Fonte: Traduzido de Salvador, Forza e Rungtusanatham (2002).

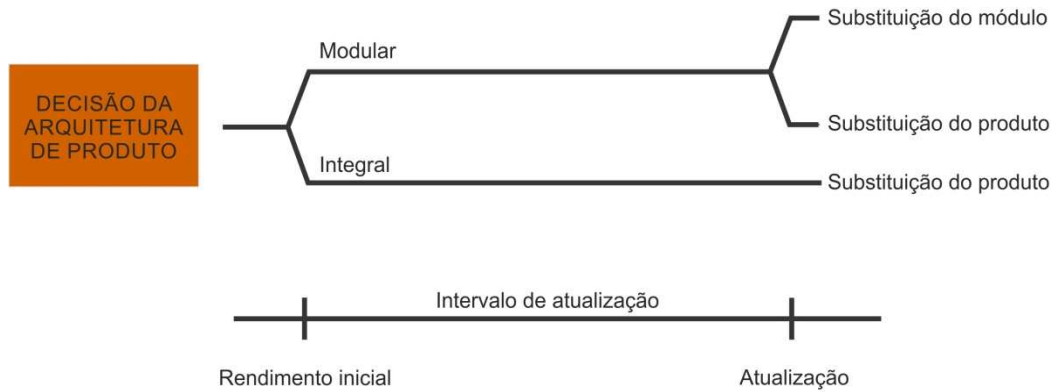
Ulrich e Tung (1991) descrevem a constituição da natureza do produto final e contextualizam como as variantes de produtos podem ser obtidas com a utilização de cada classificação da arquitetura modular. Ulrich (1995) aborda a natureza das

interfaces entre os componentes, explicando e classificando as interfaces entre os módulos e produtos. Sob o prisma da gestão, um ponto relevante para a modularização de produtos complexos se refere à necessidade de decidir o grau adequado de modularidade.

Usando as definições de Ulrich (1995), Sanchez e Mahoney (1996) e Miltenburg (2003), a tomada de decisão quanto à arquitetura de um produto tende a ser se ele será modular ou integral. Ao se decidir por produtos modulares, é preciso considerar o acoplamento entre os módulos que irão compor o produto. Nesse sentido, pode-se inferir que o produto modular é composto por módulos com grupos de componentes nos quais há um forte acoplamento entre os componentes do módulo, mas um fraco acoplamento entre os diferentes módulos que compõem o produto. (PERSSON; AHLSTROM, 2006). Tal definição permite a utilização do termo grau de modularidade. O grau de modularidade descreve o grau de acoplamento entre os diferentes módulos de um produto. (ERENS; VERHULST, 1997). No entanto, conforme Campagnolo e Camuffo (2009), ainda não existe uma medida e uma metodologia sistemática amplamente adotada que auxilie os *designers* e engenheiros a aumentar a modularidade de um produto. A inexistência de metodologia para medir o grau adequado de modularidade também é destacada por Gershenson, Prasad e Zhang (2004).

A arquitetura modular de produtos oferece potencial para lidar com desafios atribuídos à rápida mudança tecnológica, que exige constantemente o lançamento de novos produtos. (ULKU; SCHMIDT; DIMOFTE, 2012). Nessa direção, Ramachandran e Krishnan (2008) propõem a utilização de módulos atualizáveis com o objetivo de proporcionar às empresas uma melhor gestão na introdução de produtos. A atualização dos módulos (*upgrade*) também pode proporcionar a redução da necessidade de constantes inovações no desenvolvimento de novos produtos. (KRISHNAN; RAMACHANDRAN, 2011). O design modular permite a atualização de produtos a partir da substituição de componentes ou módulos e não do produto como um todo. Ulku, Schmidt e Dimofte (2012) citam o exemplo da câmera fotográfica GXR da Ricoh, que possui uma lente/sensor atualizável que pode ser substituída por módulos tecnologicamente avançados. A possibilidade de atualização de produtos é ilustrada na Figura 9:

Figura 9: Decisão da arquitetura de produtos



Fonte: Adaptado de Ulku, Schmidt e Dimofte (2012).

Dessa forma, entende-se que a utilização da arquitetura de produtos modulares é uma estratégia para gestão das atividades de desenvolvimento de produtos e de sistemas de produção complexos, apresentando implicações desde a engenharia de projetos até a estratégia de negócios. (MIKKOLA; GASSMANN, 2003; FREDRIKSSON, 2006). Na próxima seção, discutem-se conceitos relativos às abordagens da modularidade.

### 2.1.3 Abordagens da Modularização

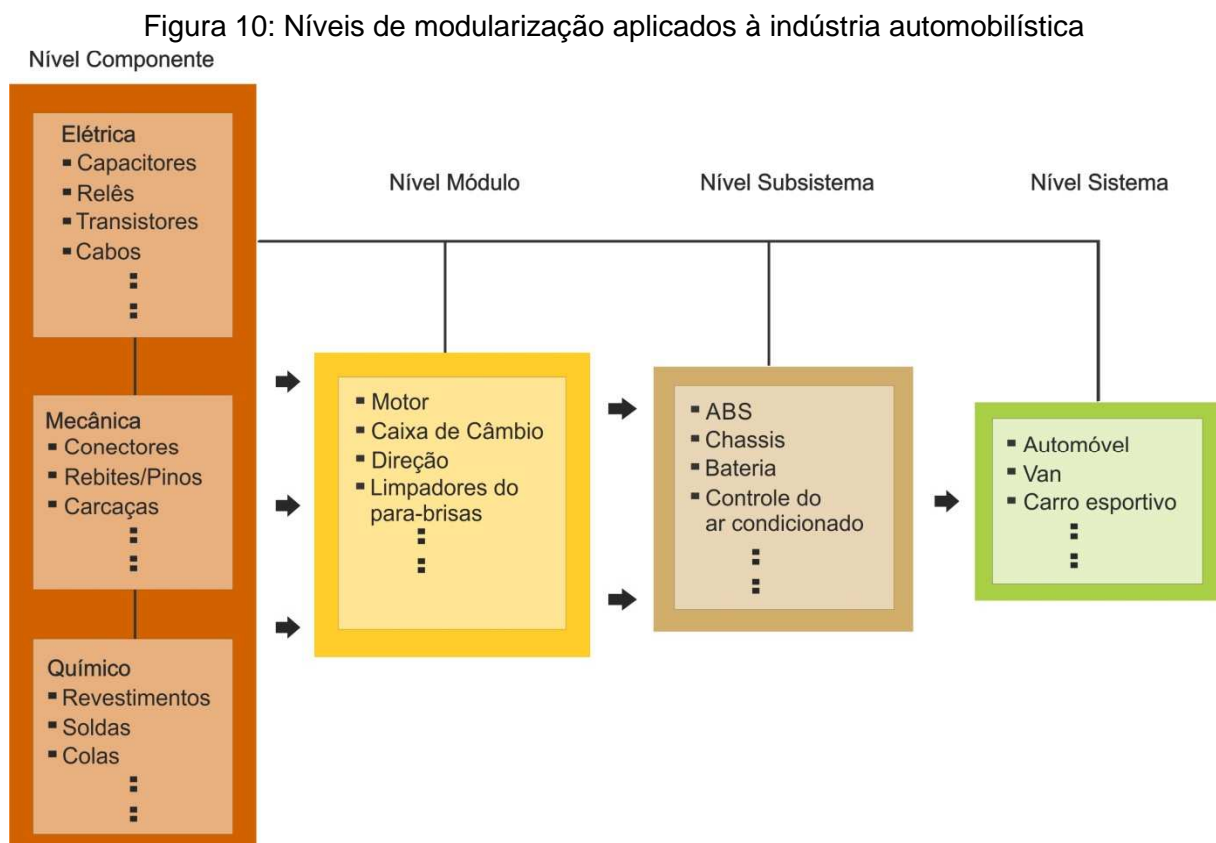
As empresas podem conseguir vantagens significativas com a adoção da estratégia de modularização, que pode ser implementada em todos os processos da organização ou ser usada para atender necessidades específicas, que dependem do tipo de abordagem adotada. (BORJESSON, 2009). Na literatura (SAKO; MURRAY, 1999; SAKO; MURRAY, 2000; PANDREMENOS et al., 2009), verifica-se que a modularização geralmente é classificada em três tipos de abordagens: i) modularidade de projeto; ii) modularidade de produção; e iii) modularidade de uso.

Além desses três tipos de modularidade (projeto, produção e uso), recentemente os conceitos têm sido aplicados em outras três abordagens: modularidade organizacional (CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2009; CHENG, 2011; KUMAR; CHATTERJEE, 2013; CIRAVEGNA; ROMANO; PILKINGTON, 2013), modularidade em serviços (JOO, 2009; MOON et al., 2010; BASK et al, 2010; GEUM; KWAK; PARK, 2012) e modularidade ambiental. (MUKHOPADHYAY; SETOPUTRO, 2005; LI et al., 2008; TSENG; CHANG; CHENG, 2010; AGRAWAL;

ULKU, 2013). Nas próximas seções, apresenta-se os conceitos relativos a modularidade de projeto e produção, que são o foco desta dissertação. Os conceitos das demais abordagens (uso, organizacional, serviços e ambiental) não serão apresentados pois não fazem parte do escopo do trabalho.

### 2.1.3.1 Modularidade de projeto

A modularidade de projeto refere-se à forma pela qual o *design* do produto é decomposto em diferentes partes ou módulos. (CABIGIOSU; ZIRPOLI; CAMUFFO, 2013). Quanto à funcionalidade, a modularidade de projeto trata as fronteiras entre os níveis de sistemas, subsistemas, módulos e componentes que, integrados, formam o produto completo. Ela ainda proporciona a concepção de módulos por fornecedores especializados. (HSUAN, 1999; MORRIS; DONNELLY, 2004; GIMENEZ, 2008). A Figura 10 exemplifica os níveis de modularização aplicados na indústria automobilística:



Fonte: Adaptado de Hsuan (1999) e Gimenez (2008).



De acordo com Hsuan (1999), o nível de componente é considerado o nível mais baixo da modularização (representado por peças como resistências, condensadores, conectores, etc.). No nível de módulo existe uma combinação de diferentes partes do nível de componente (por exemplo, o controlador de um limpador de para-brisa é produzido com um conjunto de componentes elétricos como capacitores, transistores, chips semicondutores, etc.). Os subsistemas são personalizados para um determinado sistema. No caso da indústria automobilística, existem diversos fornecedores que desenvolvem e fabricam módulos específicos dedicados a uma determinada linha de carros. Por fim, os sistemas podem ser entendidos como os produtos em si, como por exemplo, automóveis, aviões, computadores, televisores, entre outros. (HSUAN, 1999).

Campagnolo e Camuffo (2010) descrevem a modularidade de projeto em três perspectivas, no que tange à arquitetura de produto: i) perspectiva funcional; ii) perspectiva do ciclo de vida do produto; e iii) perspectiva mista. A perspectiva funcional estuda o projeto do produto sob o ponto de vista de arquitetura técnica, e contempla a relação, as funções e as ligações (interfaces) entre os módulos. A perspectiva do ciclo de vida do produto inclui estudos sobre o projeto do produto sob o ponto de vista do processo, e contempla todas as fases do ciclo de vida do produto (concepção, desenvolvimento, produção, utilização, operação e descarte/reutilização). A perspectiva mista contempla ambas as perspectivas (funcional e de ciclo de vida), utilizando-as de forma conjugada. (FIXSON, 2003).

Para criar uma estratégia de modularização bem sucedida, uma empresa deve, inicialmente, concentrar-se na fase de projeto (MACDUFFIE, 2013), pois mudanças substanciais no desenvolvimento de produtos devem ser consideradas para se obter os benefícios da modularização. (PERSSON; AHLSTROM, 2006). No Quadro 6, descrevem-se os benefícios da modularidade de projeto encontrados na literatura.

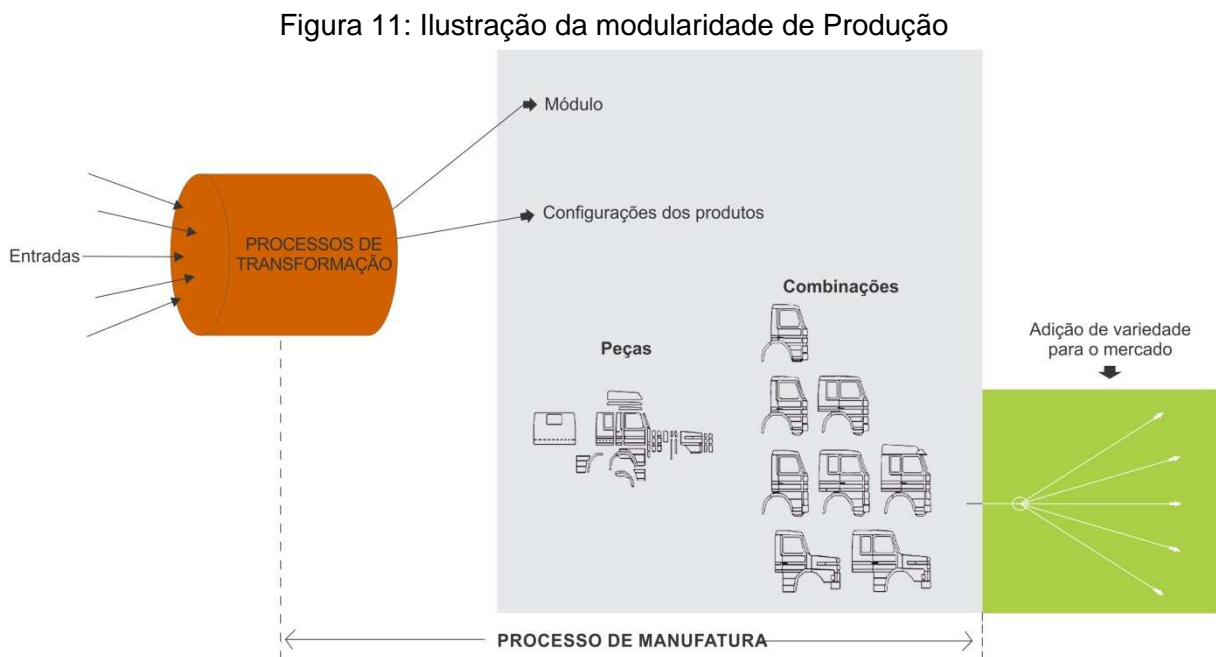
Quadro 6: Benefícios da modularidade de projetos

<b>Benefícios</b>	<b>Referências</b>
Redução do número de componentes no projeto de produtos	CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007
Redução de custos gerais de projeto	HOPP; XU, 2005; THOMAS; WARSING, 2007
Maior flexibilidade no projeto de produtos	DU; JIAO; CHEN, 2013
Possibilidade de atualização dos módulos ( <i>upgrade</i> ), o que pode diminuir a necessidade de constantes lançamentos de produtos	RAMACHANDRAN; KRISHNAN 2008; KRISHNAN; RAMACHANDRAN, 2011
Redução do <i>lead time</i> de projeto	JONEJA; LEE, 2007

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

### 2.1.3.2 Modularidade de produção

A modularidade de produção surgiu como diferencial competitivo na década de 1960, visando a aperfeiçoar a montagem final do produto, a facilitar sua fabricação e a permitir o aumento de variedade sem o incremento de custos. (SAKO; MURRAY, 2000; CARNEVALLI; VARANDAS JUNIOR; CAUCHICK MIGUEL, 2011). Para Pandremenos et al. (2009), a modularidade de produção é a capacidade de combinar vários componentes em módulos, que podem ser montados fora da linha de montagem (na empresa ou terceirizados) e, posteriormente, utilizados na montagem final dos produtos. Esses conceitos são ilustrados na Figura 11, adaptada do artigo seminal de Starr (1965):



Fonte: Starr (1965).

Starr (1965) argumenta que a modularidade de produção pode satisfazer a necessidade de variedade de produtos. Nesse sentido, o autor destaca que, ao atender as solicitações de mercado, uma empresa desenvolve um amplo portfólio de produtos, o que aumenta a complexidade de produção. Esse aumento de complexidade leva à queda de produtividade. Ao usar a modularização, a organização pode produzir um número restrito de peças, que podem ser combinadas de modo a aumentar a possibilidade de configurações de produtos, adicionando variedade ao mercado sem aumentar custos e sem prejudicar o desempenho da produção.

A própria noção da modularidade de produção foca o sistema de manufatura e não o processo de desenvolvimento de produtos, pois se refere à forma com que os recursos de fabricação (linhas de produção, estoques, equipamentos, processos etc.) são configurados para alcançar a eficiência e eficácia na produção. Dessa forma, a modularidade de produção pode permitir a terceirização ou, mais amplamente, uma reconfiguração da cadeia de abastecimento. (SALVADOR, 2007).

Baldwin e Clark (1997) indicam que a indústria automobilística parece ser um dos ambientes mais adequados para o estudo da modularidade de produção. Tal fato é motivado, principalmente, pela grande necessidade de variação de produtos no segmento, pelos esforços para personalizar os automóveis (DORAN, 2004) e pela possibilidade de terceirizar módulos completos. (FREDRIKSSON, 2006).

Dentre os avanços alcançados com a modularização está o fato de que em algumas empresas (Hyundai e Volkswagen, por exemplo) os módulos são pré-montados pelos fornecedores e entregues no tempo e na sequência necessários na linha de produção e na montagem final dos automóveis, em um processo denominado JIS (*just in sequence*). (KANG, 2001). Do ponto de vista gerencial, o raciocínio que concerne a projetar e operar um sistema de montagem modular implica uma coordenação planejada por vários mecanismos. A implementação deve ser considerada um processo de melhoria contínua, para que, dessa forma, a empresa possa desenvolver constantemente a modularização de forma estratégica, a fim de maximizar os benefícios obtidos. (FREDRIKSSON, 2006). No Quadro 7 são descritos benefícios da modularidade de projeto encontrados na literatura.

Quadro 7: Benefícios da modularidade de produção

<b>Benefícios</b>	<b>Referências</b>
Redução do <i>lead time</i> de produção	JONEJA; LEE, 2007
Aumento da flexibilidade nos sistemas de fabricação	ZENG; ZHOU, 2007; PATEL; JAYARAM, 2014
Facilidade de substituição de módulos defeituosos e desgastados	SOSA; MIHM; BROWNING, 2013; ULRICH, 1995
Aumento na eficiência e na produtividade	STARR, 1965, 2010; SUSHANDOYO; MAGNUSSON, 2012; PATEL; JAYARAM, 2014
Redução de custos de fabricação	ZENG; ZHOU, 2007; SONG; KUSIAK, 2010; PATEL, JAYARAM, 2014
Simplificação no fluxo de informações e otimização nos processos de compra, armazenamento e distribuição de materiais	ERIXON; VON YXKULL; ARNSTROEM, 1996

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

### 2.1.4 Estudos sobre Mensuração dos Efeitos da Modularização

A literatura aponta a necessidade de pesquisas que testem empiricamente os benefícios esperados com a utilização da modularização. (BOER; HANSEN, 2014). Nesse sentido, Salvador, Forza e Rungtusanatham (2002) conduziram um estudo de caso múltiplo para avaliar as relações entre modularização de produto, nível de variedade de produtos, volume de produção e desempenho operacional dentro de uma determinada família de produtos. Os resultados encontrados pelos autores sugerem que a utilização da modularização ajuda a maximizar o desempenho operacional e a atenuar o *trade-off* entre variedade de produtos e desempenho operacional.

Worren, Moore e Cardona (2002) realizaram um estudo multicaso entrevistando 20 executivos de empresas de eletrodomésticos dos Estados Unidos e Reino Unido e concluíram que existe uma relação positiva entre a modularização de produto e a melhoria do desempenho financeiro das empresas.

Outras pesquisas procuram capturar a percepção dos gestores sobre os efeitos da modularização. Lau Antonio, Yam e Tang (2007) expõem que os gestores entendem a modularização como um fator que influencia positivamente o desempenho de entrega, a flexibilidade e o atendimento ao cliente. Lau Antonio, Richard e Tang (2009) citam resultados similares demonstrando que a modularização de produtos aumenta o nível de inovação e flexibilidade e também proporciona um melhor nível de atendimento ao cliente.

Danese e Filippini (2010; 2013) corroboram o acima exposto ao apontar que os gestores percebem que a modularização de produtos afeta direta e positivamente o tempo de desenvolvimento de novos produtos e o desempenho individual de cada produto. Por sua vez, Jacobs et al. (2011) identificaram que os gestores percebem que a modularização de produto impacta positivamente o processo, a agilidade e o desempenho de fabricação.

Persson e Ahlstrom (2006), no entanto, destacam que além dos benefícios obtidos com a adoção da estratégia de modularização as empresas também precisam analisar possíveis efeitos negativos, dentre os quais se pode citar: i) a necessidade de eliminar interdependências funcionais para modularizar pode afetar negativamente o desempenho global do produto. (ULRICH, 1995; LIU; WONG; LEE, 2010); ii) a concorrência no setor também pode ser afetada quando a

arquitetura integral dos produtos torna-se modular. Nesse caso, a separação dos produtos em módulos os torna mais propensos a cópias ou à produção de peças intercambiáveis por parte de concorrentes que não poderiam produzir o produto integral. (ETHIRAJ; LEVINTHAL; ROY, 2008); iii) para transformar um produto projeto em modular, é necessário remodelá-lo, o que requer tempo de desenvolvimento e custos adicionais. (PANDREMENOS et al., 2009); iv) algumas competências da empresa precisam ser repassadas a fornecedores. (PANDREMENOS et al., 2009).

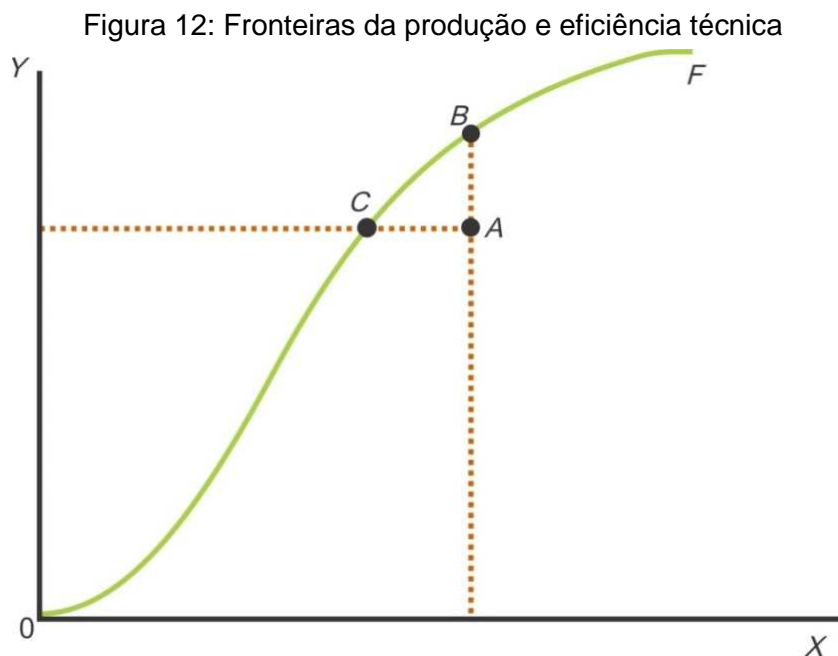
Na próxima seção, contextualizam-se conceitos referentes à eficiência e apresentam-se os métodos mais utilizados para o cálculo de eficiência. Posteriormente, discutem-se aspectos relacionados à análise envoltória de dados, que é a técnica utilizada neste trabalho.

## 2.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA

Os termos produtividade e eficiência são utilizados com frequência nas empresas e na literatura. (COELLI et al., 2005; VON GILSA, 2012; CUMMINS; WEISS, 2013; BARTELSMAN; HALTIWANGER; SCARPETTA, 2013; SOUZA, 2014). Para Coelli et al. (2005) eficiência e produtividade frequentemente são abordadas como sinônimos, mas não tem o mesmo conceito. Em geral, a eficiência representa o aproveitamento dos recursos (o que foi produzido com determinados recursos comparado com o que poderia ter sido produzido com os mesmos recursos), ou seja, refere-se à capacidade da empresa de minimizar custos e maximizar receitas e lucro. (CUMMINS; WEISS, 2013). A produtividade se refere ao volume de itens produzidos com uma determinada quantidade de insumos, ou seja, compara o que foi produzido com o que foi consumido. (CUMMINS; WEISS, 2013). Se a empresa somente analisar a produtividade, é provável que os recursos não sejam utilizados adequadamente. (BARTELSMAN; HALTIWANGER; SCARPETTA, 2013). Destaca-se que os conceitos de produtividade e eficiência são utilizados nesta dissertação.

Para ilustrar a diferença entre eficiência e produtividade, Coelli et al. (2005) consideram a explanação de um processo de produção simples em que uma única entrada (X) é utilizada para produzir uma única saída (Y). A Figura 12

representa tal processo, facilitando a compreensão entre entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*).



Fonte: Coelli et al. (2005).

A fronteira da produção representa atingir o máximo possível de saída (*output*) em relação a cada entrada (*input*) e, dessa forma, tem-se evidenciado o estado atual da tecnologia na indústria. (COELLI et al., 2005). Coelli et al. (2005) destacam que se a empresa analisada na Figura 12 operar no ponto A, ela pode ser considerada ineficiente, pois tecnicamente é possível aumentar a produção ao nível do ponto B sem a necessidade de aumentar as entradas (*inputs*).

Souza (2014) explica e exemplifica os conceitos de eficiência e produtividade na Figura 12 da seguinte forma: as empresas situadas nos pontos B e C podem ser consideradas eficientes, pois se encontram sobre a reta OF, que representa a fronteira de eficiência. A empresa representada pela letra C é a mais produtiva, pois se encontra na região da curva em que a produtividade é a máxima possível. A unidade A é a única que está fora da fronteira eficiente, o que leva a concluir que a unidade não é eficiente e, ao mesmo tempo, não é produtiva.

Entende-se que as medidas de eficiência têm sido assunto de interesse em organizações que buscam melhorar seu desempenho. (COOK; SEIFORD, 2009). Na literatura, o tema da eficiência foi abordado inicialmente por Debreu (1951), Koopmans (1951) e Farrel (1957). De acordo com Farrel (1957), a sistemática de

medir a eficiência de uma empresa é importante para os administradores e também para os responsáveis pela definição das políticas econômicas. Para utilizar a eficiência na tomada de decisão, é necessário obter e analisar informações reais quanto a essa eficiência e, para tal, argumentos teóricos da eficiência relativa de diferentes sistemas econômicos devem ser submetidos a testes empíricos. É relevante saber quanto um determinado setor pode incrementar em termos de produção sem absorver mais recursos, de modo a aumentar sua eficiência. (FARREL, 1957).

Farrell (1957) argumenta que as tentativas anteriores ao seu estudo, que procuram mostrar uma forma de cálculo de eficiência, não apresentam abordagens adequadas. Segundo Cook e Seiford (2009), dentre as abordagens inadequadas desenvolvidas anteriormente ao estudo de Farrel (1957) estão: a formação de uma produtividade média de uma única entrada (ignorando todas as outras entradas) e a construção de um índice de eficiência em que uma média de entradas é comparada com a saída. Dessa forma, em resposta à insuficiência de índices separados de eficiência, Farrel (1957) propôs uma abordagem de análise de atividades, em que as medidas podem ser aplicadas a qualquer organização produtiva. (COOK; SEIFORD, 2009).

Nesse sentido, a eficiência de uma organização pode ser analisada sob dois aspectos: eficiência técnica (COELLI et al., 2005) e eficiência alocativa. (CUMMINS; WEISS, 2013). Tais medidas também podem ser combinadas, resultando na eficiência econômica total. (COOPER et al., 2007). A eficiência técnica é utilizada na análise da presente pesquisa, não sendo objetivo do trabalho avaliar a eficiência alocativa e a eficiência econômica total. Nesse sentido, a eficiência técnica está relacionada como a capacidade de um processo produzir uma determinada quantidade utilizando o menor número de insumos em relação aos demais processos observados. (VON GILSA, 2012). Na seção 2.2.1 serão apresentados os métodos mais utilizados para o cálculo da eficiência.

### **2.2.1 Métodos para Cálculo de Eficiência**

Medir a eficiência é uma tarefa importante para os gestores das empresas. As medidas de eficiência auxiliam na compreensão de fatos passados e no

planejamento do desenvolvimento futuro das organizações. (KAO, 2014). As ideias básicas para o cálculo da eficiência foram inicialmente desenvolvidas e aplicadas no estudo seminal de Farrel (1957). O trabalho de Farrel (1957) aborda a eficiência com base na análise da atividade dos trabalhos de Debreu (1951) e Koopmans (1951). Posteriormente, muitas técnicas de cálculo de eficiência foram desenvolvidas ou modelos foram adaptados com o intuito de resolver problemas nas organizações. (KAO, 2014).

Coelli et al. (2005) argumentam que as técnicas de cálculo da eficiência podem ser classificadas quanto à natureza dos dados e quanto ao método. Quanto à natureza dos dados, podem ser paramétricas ou não paramétricas. Quanto ao método, podem ser enquadradas como de fronteira e não fronteira. (COELLI et al., 2005). Para Ferreira e Gomes (2009), os métodos paramétricos estão relacionados à mensuração de dados que utilizam escala de intervalo ou de razão, suportados em parâmetros que partem de pressupostos para testar a amostra. Os métodos estatísticos paramétricos supõem, ainda, uma relação funcional e de correlação entre a produção e os insumos. Os métodos de cálculo não paramétricos são utilizados quando os parâmetros violam os pressupostos da amostra, ou seja, quando a exigência em relação aos dados utilizados na análise é menor.

Os métodos de não fronteira sugerem que a eficiência máxima (1 ou 100%) é conhecida. Dessa forma, a eficiência definida será atingida pela unidade de análise, cujos insumos não podem ser reduzidos sem que haja redução também nos seus produtos ou, ainda, cujos produtos não podem ser aumentados sem que se aumentem também seus insumos. Para os métodos de fronteira, a eficiência máxima é atingida quando uma ou mais unidades de análise obtém desempenho superior às demais unidades de análise. Igualmente, consideram que os desempenhos das outras unidades do conjunto analisado não demonstram que os insumos ou produtos da unidade de análise eficiente possam ser melhorados. (FERREIRA; GOMES, 2009). As principais técnicas de cálculo de eficiência e produtividade e suas respectivas classificações são sintetizadas no Quadro 8:



Quadro 8: Técnicas para cálculo de eficiência e produtividade

<b>Técnica</b>	<b>Natureza</b>	<b>Método</b>
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
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
The Frontier Approach (TFA)	Paramétrico	Fronteira
Distribution Free Approach (DFA)	Paramétrico	Fronteira

Fonte: Adaptado de Von Gilsa (2012).

Para efetuar a análise da eficiência proposta neste trabalho, utiliza-se a técnica da análise envoltória de dados (DEA). A escolha da DEA foi suportada por autores como Ferreira e Gomes (2009), Çelen (2013), Hwang et al. (2013) e Liu et al. (2013). Para Ferreira e Gomes (2009), existem atributos que tornam a DEA bastante operacional, dentre os quais estão: as relações entre múltiplas entradas e saídas podem ser transformadas em um único índice de eficiência e há possibilidade de identificar economias de insumos ou aumento de produção para as DMU's ineficientes se projetarem em direção às eficientes.

A principal vantagem da DEA é que a metodologia não precisa de qualquer restrição sobre a forma funcional da relação de produção entre entradas e saídas. Nesse sentido, as entradas e saídas a serem utilizadas no modelo DEA não precisam, por exemplo, obedecer a um padrão de unidades de medidas iguais. A DEA também não requer qualquer suposição para a distribuição do termo ineficiência e, como resultado, pode ser considerada um método de natureza determinística. Em outras palavras, todos os desvios da fronteira de eficiência são considerados sob o controle da empresa, e por isso atribuídos como ineficiência. (ÇELEN, 2013).

Para Hwang et al. (2013), a DEA pode ser utilizada como metodologia de apoio à decisão para o monitoramento do desempenho em organizações orientadas pela eficiência. No contexto acadêmico, percebe-se que a análise envoltória de dados é amplamente aceita e está sendo constantemente desenvolvida por pesquisadores. (LIU et al., 2013). Na seção 2.2.2 são descritos os conceitos referentes à análise envoltória de dados (DEA).

## 2.2.2 Análise Envoltória de Dados (DEA)

Com base nas ideias de Farrel (1957) e na identificação da necessidade de procedimentos satisfatórios para avaliar a eficiência de unidades de produção com múltiplas saídas e múltiplas entradas, Charnes, Cooper e Rhodes (1978) apresentaram uma metodologia que atualmente é conhecida como análise envoltória de dados (DEA). A análise envoltória de dados (DEA) é uma abordagem de programação não paramétrica utilizada para medir a eficiência das unidades de tomada de decisão (**D**ecision **M**aking **U**nit) que possuem múltiplas entradas e múltiplas saídas. (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978; LIU et al., 2013; COOK; TONE; ZHU, 2014).

A ideia original da DEA é fornecer um método que dentro de um conjunto de unidades de tomada de decisão (DMU) possibilite identificar aquelas que apresentam melhores práticas e formam uma fronteira eficiente. Além disso, o método permite medir o nível de eficiência das unidades fora da fronteira de eficiência e identificar pontos de referência a que tais unidades ineficientes podem ser comparadas. (COOK; SEIFORD, 2009; LIU et al., 2013).

A eficiência relativa de cada DMU é definida como a razão da soma ponderada de seus produtos (*outputs*) pela soma ponderada dos insumos necessários para gerá-los (*inputs*). (SENRA et al., 2007). Para cada DMU considerada ineficiente, a DEA identifica um conjunto de referências compostas por uma DMU eficiente que pode ser utilizada como referência para melhoria. (LEE; KIM, 2014). Esse procedimento é conhecido como *benchmarking*.

O *Benchmarking* pode ser entendido como um processo contínuo de avaliação de produtos, serviços e práticas de trabalho em relação aos mais fortes concorrentes, ou em relação às empresas reconhecidas como líderes em suas indústrias, com o propósito de buscar parâmetros para estabelecer metas de melhoria organizacional. (CAMP, 1993; SOUZA, 2014).

De acordo com Camp (1993) e Souza (2014), 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. Neste trabalho, utiliza-se o *benchmarking* interno, que pode ser entendido como a comparação de

desempenho entre unidades ou departamentos de uma mesma organização. (CAMP, 1993; SOUZA, 2014).

O *benchmarking* interno executado na análise envoltória de dados (DEA) possibilita avaliar se uma determinada DMU está próxima ou não da DMU de maior destaque, ou seja, da DMU que se encontra na fronteira eficiente. Essa avaliação é útil quando são comparadas diversas DMU's de um mesmo grupo ou processo. As DMU's de maior destaque podem fornecer informações importantes que possibilitam direcionar ações para melhoria das DMU's ineficientes. (FERREIRA; GOMES, 2009).

O modelo original da análise envoltória de dados (DEA) proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e ajustado por Charnes, Cooper e Rhodes (1979) foi aplicado em um estudo empírico desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes (1981) em escolas públicas dos Estados Unidos. Em geral, o objetivo do pesquisador ao utilizar a DEA é minimizar os *inputs* e maximizar os *outputs*, ou seja, reduzir os recursos empregados nas entradas e aumentar o número de produtos obtidos nas saídas, melhorando a eficiência. (COOK; TONE; ZHU, 2014).

A escolha entre minimizar os *inputs* e maximizar os *outputs* é determinada pela orientação do modelo escolhido. Se o objetivo for manter as saídas constantes (por exemplo, o volume de produção de determinado produto) e verificar o melhor aproveitamento dos insumos utilizados no processo (por exemplo, matérias-primas), o modelo deve ser orientado à entrada (*input*). No entanto, se o objetivo é manter os consumos dos recursos constantes (por exemplo, matérias-primas) e maximizar as saídas (por exemplo, o volume de produção de determinado item), o modelo deve ser orientado à saída (*output*). (COOK; TONE; ZHU, 2014).

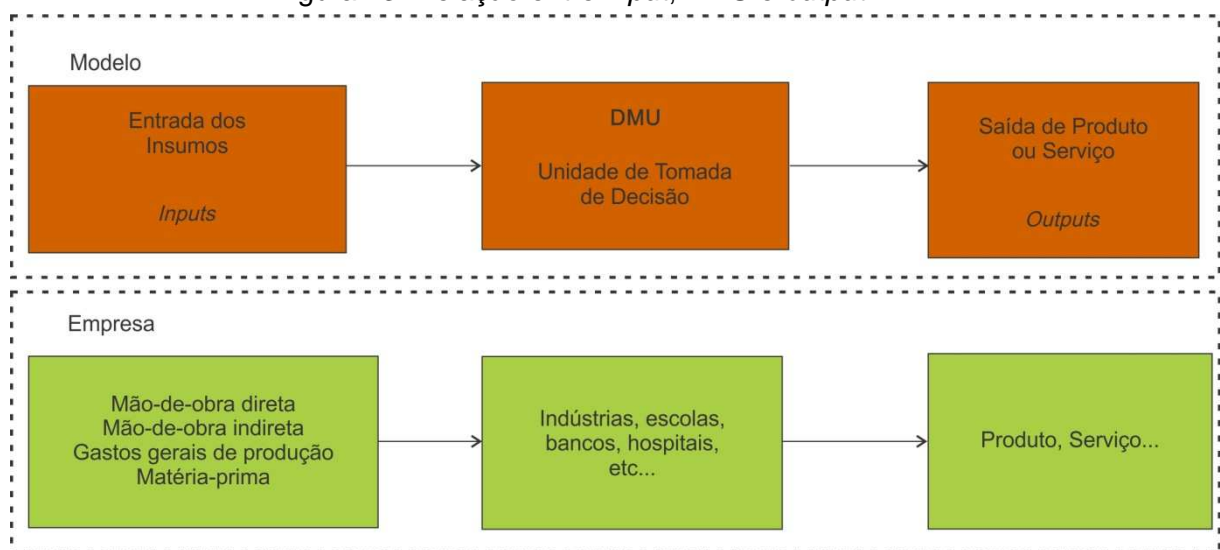
O contexto apresentado, entretanto, pode não ser uma regra geral, havendo exceções como, por exemplo, os poluentes de um processo de produção. Nesse caso, quanto mais alto é o nível de saída, pior é o desempenho do processo analisado. Também existem modelos da DEA que tratam essas saídas (ou entradas) consideradas indesejáveis. (SEIFORD; ZHU, 2002).

Considerando, por exemplo, um estudo de eficiência em hospitais, as entradas podem ser o número de dias de camas disponíveis e o orçamento do hospital. As saídas podem ser o número de pacientes atendidos e o de enfermeiros treinados. Nesse caso, se o objetivo é identificar a utilização dos recursos das unidades de análise, sugere-se que a redução das entradas (*inputs*) seja o foco central da análise. No que se refere ao estudo de uma universidade, por exemplo,

pode-se considerar como entradas (*inputs*) a qualidade dos alunos (percentual de alunos que conseguem bolsa, avaliações, etc..). Como saídas (*outputs*), pode-se considerar a colocação dos alunos em estágios e postos de trabalho. Nessa situação, o modelo pode ser orientado para saída (*output*). (COOK; TONE; ZHU, 2014).

Quanto à definição de DMU (*Decision Making Unit*), esta consiste em uma unidade para tomada de decisão de uma unidade produtiva. O termo DMU pode ser definido como um projeto, um produto, um departamento, divisão ou unidade administrativa. Do mesmo modo, as DMU's são consideradas unidades de análise essenciais para uso da análise envoltória de dados. (MACEDO; SILVA; SANTOS, 2006; SOUZA, 2014). A Figura 13 mostra a associação entre a DMU (unidade de tomada de decisão) e os *inputs* e *outputs* utilizados na análise envoltória de dados (DEA).

Figura 13: Relação entre *input*, DMU e *output* – DEA



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Von Gilsa (2012) e Souza (2014).

Cook, Tone e Zhu (2014) destacam que o elevado número de entradas e saídas em comparação ao número de DMU's tende a diminuir o poder do cálculo da eficiência na DEA. Golany e Roll (1989) sugerem que o número de DMU's definidas deve ser pelo menos o dobro do número de entradas e saídas combinadas, enquanto que Banker et al. (1989) descrevem que o número de DMU's deve ser pelo menos três vezes o número de entradas e saídas combinadas.

Liu et al. (2013) desenvolveram um estudo e comprovaram que a análise envoltória de dados é amplamente aceita no campo acadêmico, sendo

constantemente desenvolvida por pesquisadores. Os autores (LIU et al., 2013) identificaram os principais trabalhos que contribuíram para evolução da DEA. Estes são sintetizados no Quadro 9:

Quadro 9: Principais trabalhos sobre a DEA

<b>Autor (es) / Ano</b>	<b>Título da publicação</b>	<b>Periódico</b>
CHARNES; COOPER; RHODES, 1978	<i>Measuring the efficiency of decision making units</i>	<i>European journal of operational research</i>
CHARNES; COOPER; RHODES, 1979	<i>Measuring the efficiency of decision making units</i>	<i>European journal of operational research</i>
CHARNES; COOPER; RHODES, 1981	<i>Evaluating program and managerial efficiency: an application of data envelopment analysis to program follow through.</i>	<i>Management science</i>
BANKER; CHARNES; COOPER, 1984	<i>Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis</i>	<i>Management science</i>
CHARNES et al., 1985	<i>Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions</i>	<i>Journal of econometrics</i>
CHARNES; COOPER; THRALL, 1986	<i>Classifying and characterizing efficiencies and inefficiencies in data development analysis</i>	<i>Operations Research Letters</i>
SEIFORD; THRALL, 1990	<i>Recent developments in DEA: the mathematical programming approach to frontier analysis</i>	<i>Journal of econometrics</i>
THOMPSON et al., 1990	<i>The role of multiplier bounds in efficiency analysis with application to Kansas farming</i>	<i>Journal of econometrics</i>
ANDERSEN; PETERSEN, 1993	<i>A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis</i>	<i>Management science</i>
ATHANASSOPOULOS; BALLANTINE, 1995	<i>Ratio and frontier analysis for assessing corporate performance: evidence from the grocery industry in the UK</i>	<i>Journal of the Operational Research Society</i>
ATHANASSOPOULO, 1995	<i>Performance improvement decision aid systems (PIDAS) in retailing organizations using data envelopment analysis</i>	<i>Journal of Productivity Analysis</i>
SEIFORD, 1996	<i>Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978–1995)</i>	<i>Journal of Productivity Analysis</i>
KNEIP; PARK; SIMAR, 1998	<i>A note on the convergence of nonparametric DEA estimators for production efficiency scores</i>	<i>Econometric theory</i>
SIMAR; WILSON, 1999	<i>Some problems with the Ferrier/Hirschberg bootstrap idea</i>	<i>Journal of Productivity Analysis</i>
SIMAR; WILSON, 2000	<i>Statistical inference in nonparametric frontier models: The state of the art</i>	<i>Journal of productivity analysis</i>
FRIED et al., 2002	<i>Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis</i>	<i>Journal of productivity Analysis</i>
SIMAR; WILSON, 2007	<i>Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes</i>	<i>Journal of econometrics</i>
BANKER; NATARAJAN, 2008	<i>Evaluating contextual variables affecting productivity using data envelopment analysis</i>	<i>Operations research</i>
MCDONALD, 2009	<i>Using least squares and tobit in second stage DEA efficiency analyses</i>	<i>European Journal of Operational Research</i>

Fonte: Elaborado com base em Liu et al. (2013).

Liu et al. (2013) consideram 19 artigos como os principais trabalhos publicados sobre DEA ao longo dos anos. O principal, como esperado, é o trabalho seminal de Charnes, Cooper e Rhodes (1978), pois o artigo estabelece as bases da metodologia DEA. Posteriormente, Charnes, Cooper e Rhodes (1979) escreveram uma nota de uma página modificando as restrições da formulação principal do artigo de 1978. No artigo seguinte, Charnes, Cooper e Rhodes (1981) aplicaram a metodologia para avaliar programas de educação pública nos Estados Unidos. O artigo de Banker, Charnes e Cooper (1984) propôs o modelo retorno variável de escala. Charnes et al. (1985) apresentam um modelo aditivo e estabelecem a ligação da DEA com a teoria da produção através da análise de capacidades de Pareto-Koopmans. Charnes, Cooper e Thrall (1986) caracterizam e classificam as eficiências e ineficiências na DEA.

Trabalhos posteriores evoluíram na discussão sobre a DEA (SEIFORD; THRALL, 1990; ANDERSEN; PETERSEN, 1993; SEIFORD, 1996; KNEIP; PARK; SIMAR, 1998; SIMAR; WILSON, 1999; SIMAR; WILSON, 2000; FRIED et al., 2002), exemplificando aplicações no ramo agrícola (THOMPSON et al., 1990) e no varejo. (ATHANASSOPOULOS; BALLANTINE, 1995; ATHANASSOPOULOS, 1995).

Alguns autores (SIMAR; WILSON, 2007; BANKER; NATARAJAN, 2008; MCDONALD, 2009) fornecem uma base estatística para a abordagem de análise de duas fases. A abordagem de duas fases consiste em, na fase 1, utilizar a DEA não paramétrica para calcular a eficiência pela qual a saída é produzida a partir de entradas físicas. Na fase 2, utiliza-se regressão linear para relacionar as influências nas pontuações dos fatores de eficiência observados. (MCDONALD, 2009).

Atualmente, os modelos mais utilizados na DEA são: modelo retorno constante de escala (CRS) e modelo retorno variável de escala (VRS). Esses modelos estão sendo aplicados em diversos contextos industriais e não industriais (bancos, hospitais, educação, etc.). (EMROUZNEJAD; PARKER; TAVARES, 2008). O modelo CRS é apresentado na seção 2.2.21, e o modelo VRS na seção 2.2.2.2.

### 2.2.2.1 Modelo Retorno Constante de Escala (CRS)

Charnes, Cooper e Rhodes (1978) propõem uma abordagem orientada a entradas (*inputs*) para medir a eficiência, definido como modelo CRS (**C**onstant **R**eturns to **S**cale). (LIU et al., 2013). 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. (FERREIRA; GOMES, 2009; SOUZA, 2014). Para Mariano et al. (2006) e Souza (2014), o modelo CRS pode ser ilustrado pelas Equações (1), (2) e (3):

$$MAXpo = \frac{\sum_i^m = 1 u_i y_{io}}{\sum_j^n = 1 v_j x_{jo}} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

$$u_i \text{ e } v_j > 0$$

(3)

Onde:

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

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

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

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

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

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

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

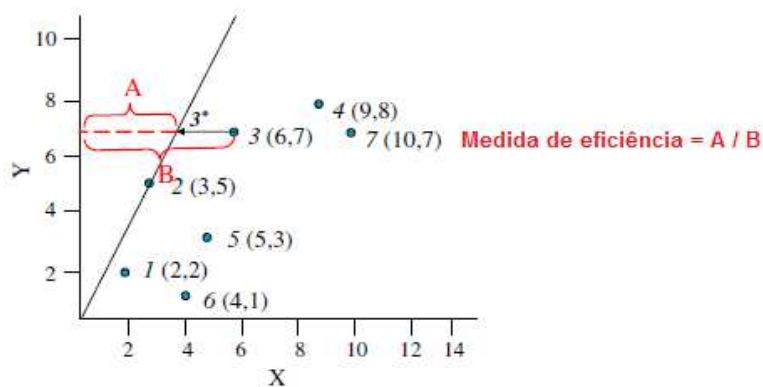
A primeira equação é a função objetivo (F.O) do modelo de programação matemática que deve ser maximizada. A segunda equação é um conjunto de

restrições (uma para cada DMU do setor, inclusive para aquela que está sendo avaliada) que limita a produtividade de todas as DMU's da primeira equação. Essa restrição é muito importante porque a produtividade de uma DMU teoricamente pode assumir qualquer valor (ela é ilimitada) e, se não fosse essa restrição, não seria possível maximizar a função objetivo. (MARIANO et al., 2006).

Após a resolução do modelo matemático, é possível verificar a eficiência da DMU analisada. Se o resultado da função objetivo for igual a 1, a DMU é eficiente, pois nenhuma restrição limitou seu valor e sua produtividade atingiu o valor máximo. Por outro lado, se o resultado for menor que 1, a DMU é ineficiente, pois mesmo com as utilidades que maximizam sua produtividade existem DMU's mais produtivas. (MARIANO et al., 2006). A Figura 14 ilustra um caso de modelo de retorno constante de escala (CRS) orientado por uma única entrada e uma única saída.

Figura 14: CRS com uma entrada (*input*) e uma saída (*output*)

DMU	1	2	3	4	5	6	7
X	2	3	6	9	5	4	10
Y	2	5	7	8	3	1	7

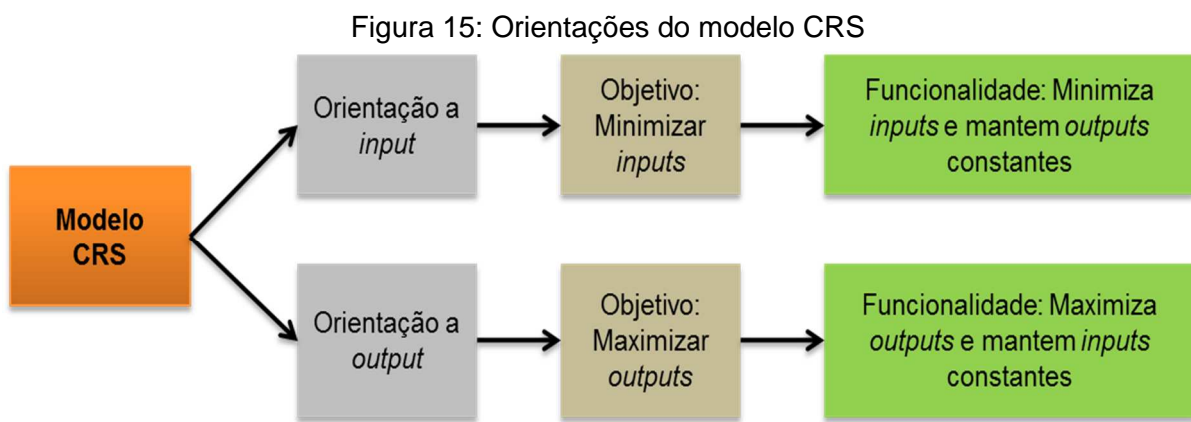


Fonte: Cook e Seiford (2009).

Cook e Seiford (2009) exemplificam o caso da DMU 3. Nessa DMU, a projeção da fronteira é representada pelo ponto 3\*, no qual a medida da eficiência pode ser representada pela razão  $A/B = 4,2 / 6 = 0,70$ , ou seja, 70%. Nessa DMU, o desempenho definido (relação entre entradas e saídas) foi de 1,43 e consideraria a eficiência  $1 / 1,43 = 0,70$ , ou 70%, que é o mesmo resultado obtido na demonstração. Para resolver esse modelo orientado à produção, é necessária uma projeção vertical da DMU 3 até a fronteira, e não uma projeção horizontal para a esquerda, conforme mostrado na Figura 14.



A Figura 15 ilustra o modelo CRS e as orientações para *input* e *output*. O modelo CRS deve ser utilizado quando existe proporcionalidade entre as variáveis (*inputs* e *outputs*) das DMU's que estão sendo analisadas. Nesse sentido, pode-se exemplificar a utilização do modelo CRS para um *benchmark* interno, no qual as variáveis das DMU's definidas possuem amplitude semelhante entre si. Quanto à orientação, deve-se defini-la para *input* quando o objetivo é minimizar as entradas e manter as saídas constantes. O modelo com orientação para *output* objetiva maximizar as saídas e manter as entradas constantes. (COOK; TONE; ZHU, 2014).



Fonte: Adaptado de Souza (2014).

Nesse sentido, Eslami e Khoveyni (2013) descrevem as equações do CRS com a orientação para *input*:

$$MAX_{po} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i y_{io}}{1} = \sum_{i=1}^m u_i y_{io} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n v_j x_{jo} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m u_i y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j x_{jk}} \leq 1 = \sum_{i=1}^m u_i y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (6)$$

$$u_i = v_j > 0 \quad (7)$$

Onde:

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

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

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

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

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

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

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

Eslami e Khoveyni (2013) descrevem as equações do CRS com a orientação para *output*:

$$MAX_{PO} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n v_j x_{jo}} = MIN_{FO} = \sum_{j=1}^n v_j x_{jo} \quad (8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m u_i y_{io} = 1 \quad (9)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m u_i y_{ik}}{\sum_{j=1}^n v_j x_{jk}} \leq 1 = \sum_{i=1}^m u_i y_{jk} - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (10)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0 \quad (11)$$

Onde:

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

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

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

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

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

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

$z$  = número de unidades em avaliação

$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

Após a apresentação do modelo com retornos constantes de escala (CRS) com orientações para *input* e *output*, na próxima seção é evidenciado o modelo com retornos variáveis de escala (VRS).

### 2.2.2.2 Modelo Retorno Variável de Escala (VRS)

Banker, Charnes e Cooper (1984) propõem o modelo retorno variável de escala, conhecido como VRS (**V**ariable **R**eturns to **S**cale). Banker, Charnes e Cooper (1984) argumentam que uma DMU não pode ser comparada com todas as DMU's de um determinado setor, mas com as DMU's que operam em escala semelhante a sua.

Diferente do modelo CRS, no modelo VRS a função produção não é linear, podendo ser dividida em dois tipos de rendimentos de escala na fronteira eficiente: o primeiro tipo seria o modelo com retorno decrescente de escala, em que um aumento nos *inputs* provoca um aumento proporcionalmente menor nos *outputs*. O segundo tipo seria o modelo com retorno crescente de escala, em que um aumento nos *outputs* é proporcionalmente maior ao aumento nos *inputs*. (FERREIRA; GOMES, 2009; SOUZA, 2014). O modelo VRS é representado pelas equações (12), (13) e (14):

$$MAX_{PO} = \frac{\sum_{i=1}^m ui yio + u}{\sum_{j=1}^n vj xjo} \text{ ou } MAX_{PO} = \frac{\sum_{i=1}^m ui yio}{\sum_{i=1}^n vj xjo + v} \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{i=1}^m ui yik + u}{\sum_{j=1}^n vj xjk} \leq 1 \text{ ou } \frac{\sum_{i=1}^m ui yik}{\sum_{j=1}^n vj xjk + v} \leq \text{para } k = 1, 2 \dots z \quad (13)$$

$ui$  e  $vj > 0$ ;  $u$  e  $v$  sem restrição de sinal

$$(14)$$

Onde:

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

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

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

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

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

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

$u$  = variável de retorno de escala

$v$  = variável de retorno de escala do denominador

$z$  = número de unidades em avaliação

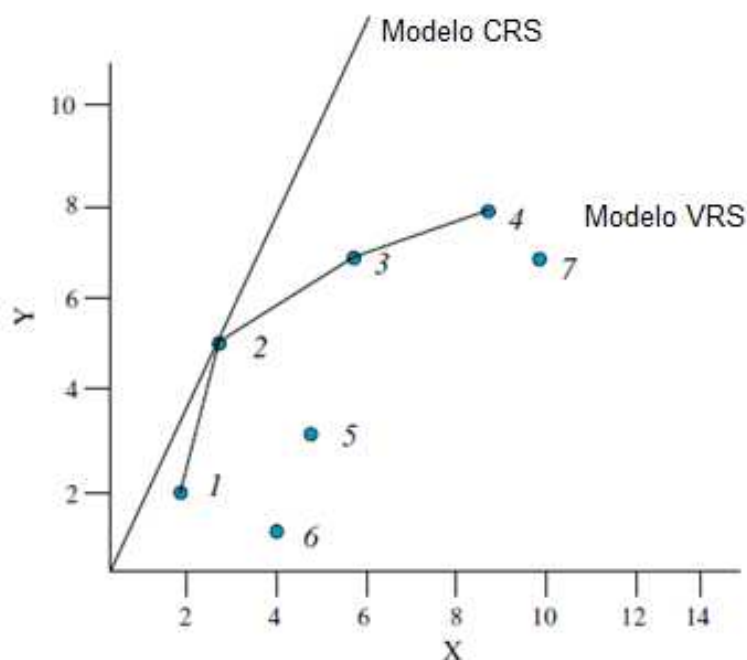
$m$  = número de *outputs*

$n$  = número de *inputs*

Para Mariano et al. (2006), as variáveis  $u$  e  $v$  têm a função de garantir que as restrições das DMU's que operam em escala diferente da DMU em análise não limitem sua função objetivo. Com essa variável é possível avaliar o retorno de escala em que a DMU está operando. Se o valor de  $u$  for maior que zero, significa que a empresa opera com retornos decrescentes à escala. Se o valor de  $u$  for menor que zero, significa que os retornos são crescentes à escala. Se o valor de  $u$  for igual a zero, tem-se retornos constantes à escala. A variável  $v$  também pode ser utilizada para estimar o tipo de escala de uma DMU, porém deve ser interpretada de maneira oposta ao  $u$ , ou seja: caso  $v > 0$ , os retornos serão crescentes; se  $v = 0$ , os retornos serão constantes; e caso  $v < 0$ , os retornos serão decrescentes. Os retornos de escala não são necessariamente iguais para as duas orientações.

A Figura 16 apresenta uma ilustração de um caso de modelo de retorno variável de escala (VRS).

Figura 16: Exemplificação do modelo VRS

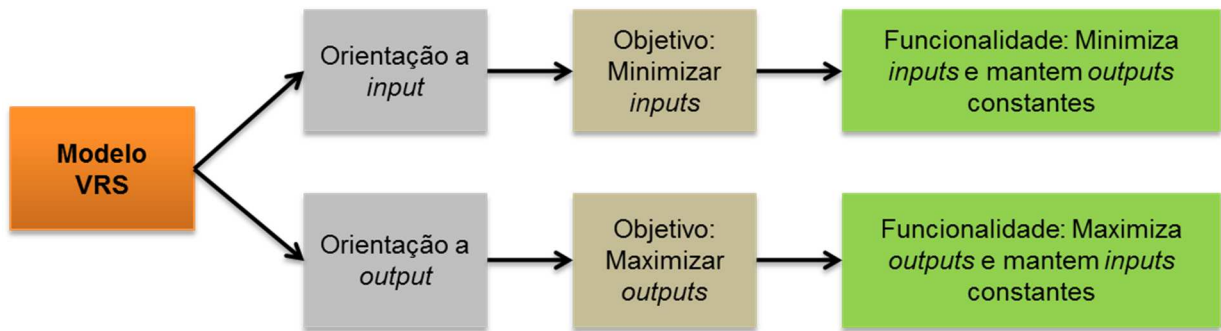


Fonte: Cook e Seiford (2009).

Na Figura 16, a linha reta representa a fronteira do modelo CRS, e a linha com os pontos demarcados representa as fronteiras VRS. O modelo VRS considera a fronteira a partir do ponto 1 até o ponto 2. Nesse sentido, o ponto 2 está enfrentando retornos constantes de escala, pois todos os pontos à direita do ponto 2 (2-3 e 3-4) possuem rendimentos decrescentes à fronteira da escala. (COOK; SEIFORD, 2009).

A Figura 17 ilustra o modelo VRS e as orientações para *input* e *output*. O modelo VRS deve ser utilizado quando não existe proporcionalidade entre as variáveis (*inputs* e *outputs*) das DMU's que estão sendo analisadas. Nesse sentido, pode-se exemplificar a utilização do modelo VRS para um *benchmarking* externo, em que as DMU's definidas (podem ser diferentes empresas) não possuem amplitude semelhante entre si (por exemplo, uma pequena empresa comparada a uma grande empresa). Quanto à orientação, deve-se defini-la para *input* quando o objetivo é minimizar as entradas e manter as saídas constantes. O modelo com orientação para *output* objetiva maximizar as saídas e manter as entradas constantes. (COOK; TONE; ZHU, 2014).

Figura 17: Orientações do modelo VRS



Fonte: Souza (2014).

O processo de linearização do modelo VRS utiliza os mesmos procedimentos do modelo CRS. A convexidade do modelo VRS é gerada por meio da inclusão das variáveis  $u$  e  $v$ . Para Eslami e Khoveyni (2013), o modelo VRS orientado a *input* é representado pelas equações (15), (16), (17) e (18):

$$MAX = \sum_{i=1}^m u_i y_{io} + u \quad (15)$$

Sujeito a:

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

$$\sum_{j=1}^n v_j x_{jo} = 1 \quad (17)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0; u \text{ e } v \text{ sem restrição de sinal, } i = 1, \dots, n \quad (18)$$

Onde:

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

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

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

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

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

$x_{jo}$  = quantidade do *input*  $j$  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*

Para Eslami e Khoveyni (2013), o modelo VRS orientado a *output* é representado pelas equações (19), (20), (21) e (22):

$$MAX = \sum_{j=1}^n v_j x_{jo} + v \quad (19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m u_i y_{ik} - v - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2 \dots z \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^m u_i y_{io} = 1 \quad (21)$$

$$u_i \text{ e } v_j > 0; u \text{ e } v \text{ sem restrição de sinal, } i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (22)$$

Onde:

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

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

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

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

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

$y_{io}$  = 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*

Após a apresentação dos modelos CRS e VRS, discutem-se os conceitos referentes aos tipos de eficiência que são calculados pela técnica da análise envoltória de dados.

### 2.2.2.3 Tipos de eficiência calculados em DEA

A técnica DEA permite o cálculo de diferentes tipos de eficiência, a saber: i) eficiência padrão; ii) fronteira invertida; iii) eficiência composta; e iv) eficiência composta\*. Os conceitos relativos a cada tipo de eficiência são descritos no Quadro 10:

Quadro 10: Tipos de eficiência calculados em DEA

<b>Eficiência</b>	<b>Descrição</b>
Eficiência Padrão	Constituída pelas unidades eficientes, ou seja, pelas DMU's com os melhores desempenhos, que executam as melhores práticas
Fronteira Invertida	Constituída pelas unidades ineficientes, ou seja, pelas DMU's com os piores desempenhos, que não executam as melhores práticas
Eficiência Composta	Constituída por um índice agregado entre eficiência padrão e fronteira invertida. Para que uma DMU tenha eficiência máxima, é necessário que obtenha elevado escore na eficiência padrão e reduzido escore na fronteira invertida
Eficiência Composta*	Constituída pela normalização do escore de eficiência da DMU com melhor desempenho na eficiência composta. Nesse caso, essa DMU é considerada 100% eficiente e os demais escores de eficiência são normalizados sucessivamente

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Souza (2014).

Após a abordagem dos tipos de eficiência calculados em DEA, são apresentados os conceitos referentes aos alvos e folgas para as DMU's. Os alvos e folgas são os valores que permitem tornar uma DMU ineficiente em uma DMU eficiente.

### 2.2.2.4 Alvos e Folgas

Os modelos de análise envoltória de dados permitem o cálculo dos alvos e folgas, que são os valores de referência que devem ser visados pelas DMU's



ineficientes para cada *input* ou *output*. (VON GILSA, 2012). Nesse caso, os valores alvo elevariam a eficiência da DMU ao valor um (SOUZA, 2014), podendo fornecer indicativos de recursos que estão sendo subutilizados no processo em análise. Para calcular o alvo (Equação 23) para uma determinada DMU é necessário realizar o produto da posição atual de um insumo pelo valor ( $\lambda$ ) pertencente à DMU de referência, ou seja, *benchmarking*. (SOUZA, 2014).

$$\sum_{k=1}^n X_{ik} \lambda_k \tag{23}$$

Onde:

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

$\lambda_k$  = contribuição da unidade  $k$  na formação do alvo/folga da DMU

Na próxima seção são relacionados trabalhos que utilizam a análise envoltória de dados (DEA) e que podem servir de apoio no processo de modelagem da presente pesquisa.

### **2.2.3 Estudos Relacionados com a Utilização da Análise Envoltória de Dados (DEA)**

Embora a DEA tenha ligação com a teoria de produção em economia, o método e seus modelos vêm sendo cada vez mais utilizados no campo da gestão de operações. (COOK; TONE; ZHU, 2014). Nesse sentido, Oliveira (2008) descreve três etapas básicas a serem cumpridas para aplicação da análise envoltória de dados (DEA): i) definição e seleção das unidades de análise (DMU's); ii) definição e seleção das variáveis (*inputs* e *outputs*); e iii) escolha do modelos de aplicação (CRS ou VRS). Assim, para apoiar a definição do modelo da presente pesquisa, efetuou-se uma análise na literatura (Quadro 11) para avaliar como os pesquisadores têm definido as etapas de modelagem DEA.

Quadro 11: Estudos relacionados com a utilização da DEA

<b>Autor</b>	<b>Aplicação</b>	<b>DMU</b>	<b>Inputs</b>	<b>Outputs</b>	<b>Modelo</b>
CHANDRA et al., 1998	29 empresas têxteis do Canadá	Cada empresa foi considerada uma DMU	Número de funcionários e investimento médio anual (10 anos)	Vendas anuais em valores	CRS
SHAMMARI, 1999	55 Indústrias da Jordânia	Cada empresa foi considerada uma DMU	Número de funcionários, valor do capital social e dos ativos imobilizados	Faturamento líquido e lucro líquido	CRS
ZHU, 2000	364 empresas dos Estados Unidos	Cada empresa foi considerada uma DMU	Número de funcionários, valor dos ativos e patrimônio líquido	Faturamento líquido e lucro líquido	CRS
SWINK; TALLURI; PANDEJPONG, 2006	137 projetos de diferentes empresas	Cada projeto foi considerado uma DMU	Custo do projeto, custo do produto e requisitos de qualidade do produto	Tempo de desenvolvimento do projeto	VRS
DUZAKIN; DUZAKIN, 2007	480 indústrias da Turquia	Cada empresa foi considerada uma DMU	Patrimônio líquido e número médio de empregados	Lucro líquido	CRS
TRAPPEY; CHIANG, 2008	1 empresa fabricante de motocicletas	Cada projeto foi considerado um DMU	Custo do projeto, horas de projeto, tempo de projeto em dias ( <i>lead time</i> )	Número de projetos desenvolvidos	CRS
JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011	1 empresa fabricante de eletroeletrônicos	Cada linha de montagem foi considerada uma DMU	Horas de trabalho, tempo de atividade, quantidade de material utilizado e custos de fornecimento	Volume de produção do produto analisado	CRS
JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011	1 empresa fabricante de pastilhas <i>wafer</i>	Lote de produtos fabricados ao longo do tempo	Horas de trabalho, quantidade de lotes iniciados e testados na produção, estoque em elaboração	Número de lotes completados, número de lotes completos em cada operação e lotes sucateados	CRS
VON GILSA, 2012	1 indústria petroquímica	Lote de borracha produzido (chamado de <i>grades</i> ) ao longo do tempo	Horas de fabricação e materiais utilizados no processo	Produto produzido (Borracha)	CRS e VRS
HWANG et al., 2013	35 indústrias de automóvel na Europa, América Ásia	Cada projeto de produto (automóvel) foi considerado uma DMU	Especificações de engenharia (potência nominal, taxa de compreensão, etc.)	Emissões de poluentes (monóxido e dióxido de carbono etc.)	VRS
SOUZA, 2014	Indústria de fabricação de munições	Lote mensal de munição produzido	Horas de fabricação e materiais utilizados do processo	Produto produzido (munições)	CRS e VRS
PARK; LEE; ZHU, 2014	1 empresa fabricante de navios da Coreia.	Setor de fabricação de blocos do navio	Tempo total de produção e tempo de espera do conjunto de peças	Operações e volume total de material utilizado na fabricação do bloco do navio	CRS

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

A etapa de elaboração do modelo DEA é um dos aspectos mais críticos em pesquisas que utilizam a análise envoltória de dados (DEA) como técnica para efetuar medições e análises. Nesse sentido, entende-se que verificar na literatura e elencar as definições utilizadas em pesquisas anteriores pode servir de apoio para definir o modelo a ser usado na presente pesquisa. Na próxima seção, são abordados os conceitos referentes ao teste estatístico ANOVA e os pressupostos para utilização da ANOVA, que são empregados para complementar a análise quantitativa desta pesquisa.

### 2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A série temporal relativa aos escores de eficiência obtidos com os cálculos através da análise envoltória de dados (DEA) foi submetida a análises estatísticas. Essas análises estatísticas são: i) teste de Shapiro Wilk; ii) teste de Levene; e iii) Análise de Variância (ANOVA). Os testes de Shapiro Wilk e Levene são considerados pressupostos para a utilização da ANOVA. Nesse sentido, o teste de Shapiro Wilk (também conhecido como teste de normalidade) é aplicado para verificar se os dados analisados são provenientes de uma distribuição normal. Sua utilização é recomendada quando o número de observações analisadas é menor ou igual a 50 ( $n \leq 50$ ). (HAIR et al., 2005). O teste de Levene é aplicado para verificar se há homogeneidade das variâncias. (NATARAJA; JOHNSON, 2011).

Nos testes de Shapiro Wilk e Levene, a hipótese nula  $h_0$ , quando verdadeira, indica que os dados são provenientes de uma distribuição normal e são homogêneos, respectivamente. A condição de aceitabilidade que valida as hipóteses  $h_0$  e  $h_1$  é dependente do valor *Sign.* obtido no teste, que para ser significativo deve ser maior ou igual a 0,05 ( $Sign. \geq 0,05$ ). (HAIR et al., 2005).

Quanto à ANOVA, trata-se de um método estatístico utilizado para interpretar dados experimentais. A ANOVA é usada para detectar diferenças no desempenho médio nos grupos de itens testados. O principal objetivo da análise de variância é extrair os resultados da variação de cada elemento em relação à causa da variação total observada no resultado final. (NEGRETE, 2013).

O desafio na utilização da ANOVA é determinar se há diferenças efetivas entre as características médias ou se a variação percebida é somente aleatória. (HAIR et al., 2005). Nesse sentido, Freund (2006) exemplifica o uso da ANOVA da seguinte forma: com base em dados amostrais, pode-se decidir se realmente há alguma diferença na eficiência de dois ou mais métodos diferentes de ensino de uma língua estrangeira. Também se pode comparar o rendimento médio por hectare de diferentes variedades de trigo, ou se realmente existe alguma diferença na quilometragem média obtida com o uso de diferentes tipos de gasolina.

Na ANOVA, a hipótese nula  $h_0$ , quando verdadeira, indica que não existe diferença entre as médias das amostras. A condição de significância que valida as hipóteses  $h_0$  e  $h_1$  é dependente do valor  $p$ -value obtido no teste. Um valor  $p$ -value significativo deve ser menor ou igual a 0,05 ( $p$ -value  $\leq 0,05$ ). (HAIR et al., 2005). O Quadro 12 sintetiza as análises estatísticas mencionadas, descrevendo os seus objetivos, condições e parâmetros de aceitabilidade.

Quadro 12: Testes Estatísticos

<b>Análise</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Condições</b>	<b>Parâmetros de aceitabilidade</b>
Shapiro Wilk	Avaliar se os dados analisados são provenientes de uma distribuição normal	<b>H0:</b> Os dados são normais <b>H1:</b> Os dados não são normais	<i>Sign.</i> $\geq 0,05$
Levene	Avaliar se os dados analisados são homogêneos	<b>H0:</b> Os dados são homogêneos <b>H1:</b> Os dados não são homogêneos	<i>Sign.</i> $\geq 0,05$
Anova	Avaliar se existe diferença significativa entre as médias de grupos da amostra analisada	<b>H0:</b> Não existem diferenças significativas entre as médias dos grupos da amostra <b>H1:</b> Existem diferenças significativas entre as médias dos grupos da amostra	$p$ -value $\leq 0,05$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que os testes de Shapiro Wilk e Levene servem para viabilizar ou não a utilização da ANOVA. No caso do teste ANOVA, este serve para testar a hipótese principal deste trabalho. Além da utilização da DEA, do teste de Shapiro Wilk, do teste de Levene e da ANOVA, também são analisados os impactos de uma inferência causal em uma série temporal. Os conceitos relativos às análises de séries temporais são descritos na próxima seção.

## 2.4 ANÁLISE DE UMA INFERÊNCIA CAUSAL EM SÉRIES TEMPORAIS

Uma série temporal pode ser compreendida como uma sequência de observações de uma variável efetuadas ao longo do tempo. (AUSÍN; GALEANO; GHOSH, 2014). Uma inferência causal pode ser compreendida como uma intervenção ou um tratamento sofrido por uma série temporal. (BRODERSEN et al., 2014). Dessa forma, a análise da inferência causal em uma série temporal é a forma de medir o efeito de uma causa. (ANTONAKIS et al., 2010).

Brodersen et al. (2014) discorrem sobre a relevância de avaliar o efeito de uma inferência causal em um série temporal, como: i) avaliar o efeito da introdução de um novo produto no mercado; ii) avaliar o efeito de uma campanha publicitária; e iii) avaliar o efeito de programas de melhoria implementados nas empresas. Buscando auxiliar gestores e pesquisadores em tais avaliações, a pesquisa de Brodersen et al. (2014) apresenta a técnica *Causallmpact*.

A técnica *Causallmpact* foi desenvolvida por pesquisadores e profissionais da Google com o objetivo de encontrar uma maneira de medir o efeito causal de uma intervenção no mercado. Brodersen et al. (2014) exemplificam a aplicação da técnica analisando o efeito de uma campanha publicitária de um dos anunciantes da Google nos EUA. A pesquisa estuda efeitos causais quanto ao número de vezes em que um usuário da internet era direcionado ao site do anunciante a partir da página de pesquisa da Google, e estima como teriam se comportado os cliques nas páginas do mesmo anunciante caso a campanha publicitária não tivesse sido desenvolvida. Dessa forma, é possível medir os efeitos dos anúncios efetuados.

Conforme Brodersen et al. (2014), a técnica desenvolvida para cálculo do efeito da inferência causal efetua a modelagem do *confractual* de uma série temporal observada. Isso é realizado considerando-se os períodos antes e depois da intervenção, sendo que a técnica se baseia em dois aspectos: fornece uma série temporal com o efeito estimado com base nas séries de Bayesian e utiliza o modelo de média para construir o controle sintético mais apropriado para modelar o *confractual*.

O *confractual* pode ser entendido como o que teria acontecido com o resultado da série temporal na ausência do tratamento. (BRODERSEN et al., 2014). Nesta dissertação, o *confractual* pode ser compreendido como; qual seria o

comportamento da eficiência do projeto/produto modularizado na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo caso a empresa não tivesse implementado a modularização. Dessa forma, por meio do *Causallmpact*, é possível estimar a amplitude do efeito atribuído à modularização, bem como a evolução do efeito ao longo do tempo.

Na abordagem Bayesiana, o conhecimento atual sobre os parâmetros do modelo são expressos pela colocação de uma distribuição de probabilidade chamada de distribuição a *priori*. Quando novos dados que contêm informações relacionadas aos parâmetros do modelo tornam-se disponíveis, entende-se que pode ser expressa uma probabilidade que é proporcional à distribuição dos dados observados. Essa informação, então, é combinada com a distribuição a *priori*, produzindo uma distribuição de probabilidade atualizada chamada de distribuição a *posteriori*, na qual toda inferência Bayesiana é baseada. (AUSÍN; GALEANO; GHOSH, 2014).

Conforme Brodersen et al. (2014), em termos gerais existem três fontes de informações disponíveis para construção de um controle sintético adequado. A primeira é o comportamento da própria série temporal de resposta antes da intervenção. A segunda é o comportamento de outras séries temporais que não sofreram a intervenção (série temporal de controle). E a terceira fonte de informação é o conhecimento prévio disponível sobre os parâmetros do modelo.

Entende-se que apesar de ter sido desenvolvida para aplicação em campanhas publicitárias, a técnica *Causallmpact* pode ser utilizada em outras aplicações. (BRODERSEN et al., 2014). Nesta pesquisa, a técnica é empregada para quantificar os efeitos percebidos no tocante à implementação da modularização na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo da empresa pesquisada. Nesse sentido, os escores de eficiência resultantes da utilização da DEA foram usados para análise. A técnica *Causallmpact* retornou os cálculos considerando o cenário atual, ou seja, os mesmos escores de eficiência inseridos. Além disso, a técnica retornou os escores de eficiência relativos ao cenário contrafactual, evidenciando como seria o comportamento da eficiência se a modularização não tivesse sido implementada. Com essas informações, torna-se possível analisar o efeito absoluto e relativo da modularização sobre os escores de eficiência.

Após a descrição do referencial teórico desta dissertação, no capítulo 3 são delineados os aspectos metodológicos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. O método de pesquisa está organizado da seguinte forma: delineamento da pesquisa, método de trabalho, projeto do modelo DEA, procedimento de coleta de dados, refinamento do modelo da análise envoltória de dados (DEA), procedimentos de análise de dados e delimitações do trabalho.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Para o progresso da pesquisa científica, é importante que os pesquisadores avaliem os métodos empregados, pois a adequação e o rigor do método escolhido impactarão a qualidade dos estudos. (SCANDURA; WILLIAMS, 2000). Para garantir que uma pesquisa seja reconhecida como sólida e potencialmente relevante, tanto pelo campo acadêmico quanto pela sociedade em geral, ela deve demonstrar que foi desenvolvida com rigor e que é passível de debate e verificação. (LACERDA et al., 2013). É nesse âmbito que a seleção de um método adequado é fundamental para o sucesso de qualquer projeto de pesquisa. (BARNES, 2001).

Métodos de pesquisa podem ser compreendidos como conjuntos de regras e procedimentos reconhecidos pela comunidade acadêmica para o desenvolvimento do conhecimento científico. (BARNES, 2001). Os métodos de pesquisa permitem que um nível adequado de informações possa ser coletado para servir de suporte ao cumprimento dos objetivos das pesquisas.

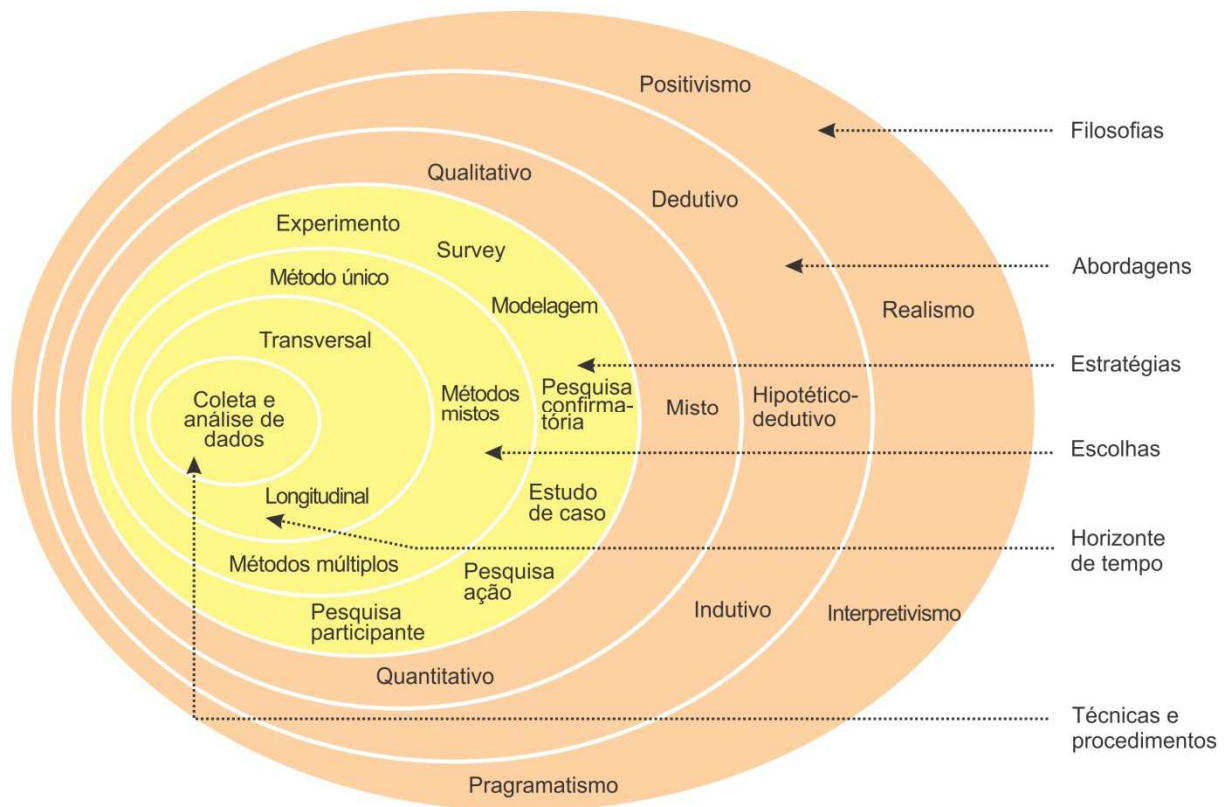
Em função da relevância do método, este capítulo é dedicado à descrição dos procedimentos e das etapas utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa. Dessa forma, a seguir, apresenta-se o delineamento da pesquisa, pelo qual se procura explicitar um conjunto de decisões que confirmem o método de pesquisa e sustentem os procedimentos adotados na investigação.

#### 3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento de uma pesquisa refere-se ao planejamento do estudo em uma dimensão mais ampla, auxiliando o pesquisador a planejar o trabalho, a definir a coleta de dados e a interpretar as informações obtidas. (YIN, 2005). Esse delineamento tem como principal objetivo considerar o ambiente em que os dados são coletados, analisando as formas de controle das variáveis envolvidas e o procedimento adotado para coletar as informações. (GIL, 2002). A Figura 18 contextualiza uma abordagem abrangente sobre o desenvolvimento do conhecimento científico:



Figura 18: A lógica da Cebola



Fonte: Adaptado de Saunders, Lewis e Thornhill (2009, p. 108).

Segundo Saunders, Lewis e Thornhill (2009), a filosofia da pesquisa adotada (positivismo, realismo, interpretivismo ou pragmatismo) contém suposições importantes sobre a forma como o pesquisador enxerga o mundo. Nessa perspectiva, a presente pesquisa adota uma abordagem positivista. O positivismo enfatiza a ciência e o método científico como únicas fontes de conhecimento, estabelecendo distinção entre fatos e valores (RICHARDSON, 1999; SOUZA, 2014), e estabelece que a ciência, de fato, deve ser traduzida em declarações sobre observações. (HJORLAND, 2005). De acordo com Singhal e Singhal (2012), a área de Gestão de Operações teve sua evolução mais influenciada por um paradigma positivista, com origens em modelagem matemática e testes de hipóteses (aos quais a presente pesquisa se alinha).

Quanto à abordagem, a pesquisa utiliza o método hipotético-dedutivo, considerando que foram testadas hipóteses para avaliar efeitos da modularização. O método hipotético-dedutivo é focado na construção de hipóteses que, posteriormente, devem ser submetidas a testes. (SINGHAL; SINGHAL, 2012). Para

Saunders, Lewis e Thornhill (2009), o objetivo do método hipotético-dedutivo é procurar explicar relações causais entre as variáveis analisadas.

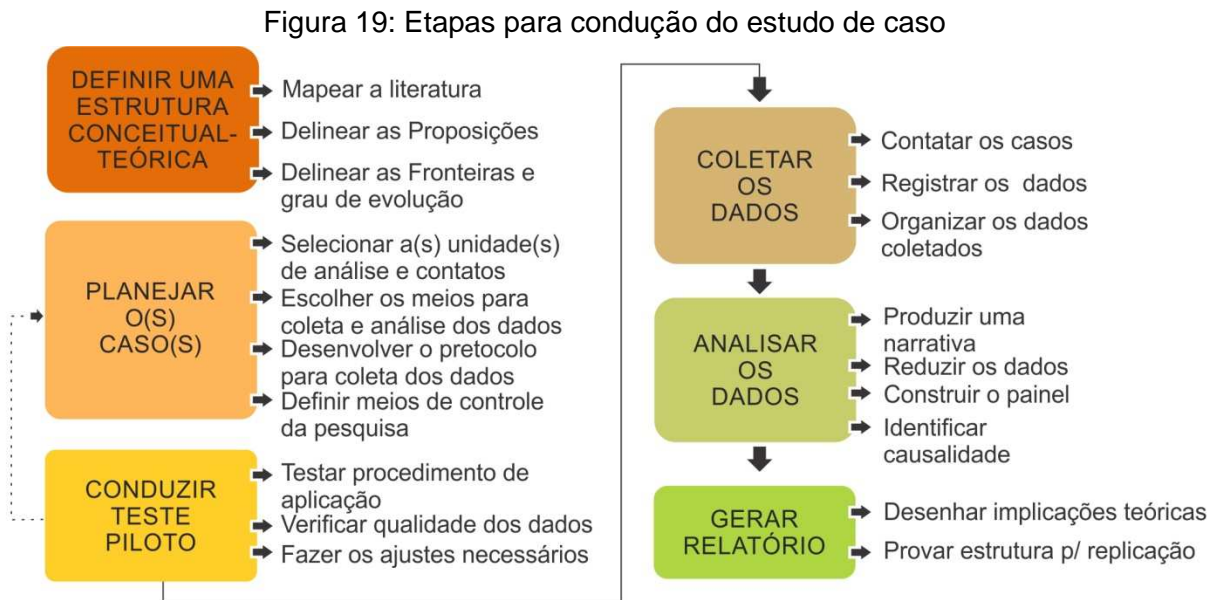
Em relação ao tipo de abordagem, os estudos podem ser classificados em quantitativos e qualitativos. (BARRAT; CHOI, LI, 2011). Alguns autores (VENKATESH; BROWN; BALA, 2013; ZACHARIADIS; SCOTT; BARRETT, 2013) indicam o uso de uma abordagem mista. A abordagem mista é a utilizada nesta pesquisa. A abordagem quantitativa é considerada visto que são usadas técnicas matemáticas e estatísticas para avaliar os impactos da adoção da modularização na eficiência de uma empresa montadora de carrocerias de ônibus. Ainda que em menor grau, também se utiliza uma abordagem qualitativa para melhor compreender as variáveis empregadas no estudo.

Quanto à estratégia de pesquisa, é realizado um estudo de caso incorporado, considerando que foi investigada mais de uma unidade de contexto de análise (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo). Conforme Yin (2005), os estudos de caso são utilizados quando se objetiva compreender fenômenos sociais complexos, pois permitem uma investigação que visa a preservar as características holísticas e significativas dos acontecimentos da vida real.

O estudo de caso também é apropriado nos casos em que é necessário profundidade na pesquisa (DUBÉ; PARÉ, 2003) e nas áreas de investigação para as quais a teoria existente parece inadequada. (EISENHARDT, 1989). Barrat, Choi e Li (2011) argumentam que os estudos de caso permitem que o pesquisador capture detalhadamente o contexto em que os fenômenos ocorrem. Considerando que o objetivo do trabalho é entender os efeitos da modularização, torna-se necessário um estudo de caso desenvolvido em profundidade e não baseado em percepções, como outras pesquisas. (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; WORREN; MOORE; CARDONA, 2002; LAU ANTONIO; YAM; TANG, 2007; LAU ANTONIO; RICHARD; TANG, 2009; DANESE; FILIPPINI, 2010; JACOBS et al., 2011; DANESE; FILIPPINI, 2013). Outro aspecto considerado é que Eisenhardt (1989) afirma que o estudo de caso tem como objetivo, dentre outros, testar uma teoria existente. O presente trabalho busca testar a teoria que atribui benefícios (efeitos positivos) à utilização da modularização.

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 de caso ou casos, a

condução do teste piloto, a coleta e análise de dados e a confecção de relatório com resultados. Os detalhamentos das etapas para condução do estudo de caso estão sintetizados na Figura 19:



Fonte: Cauchick Miguel et al. (2010, p.134).

Para Voss, Tsiriktsis e Frohlich (2002), existem vários desafios na condução de um estudo de caso: é demorado, precisa de pesquisadores qualificados, não se pode generalizar conclusões, entre outros. Apesar disso, os resultados dos estudos de caso podem ter impacto relevante. Sem as restrições de limites rígidos de questionários e de modelos inflexíveis de outras estratégias, o estudo de caso pode levar a novas e criativas ideias, ao desenvolvimento de novas teorias, além de ter alta relevância com os profissionais (um dos usuários finais das pesquisas).

No que se refere ao horizonte de tempo, este trabalho apresenta uma pesquisa longitudinal. Para Voss, Tsiriktsis e Frohlich (2002), a pesquisa longitudinal parece ser a mais útil para estudos de caso únicos ou incorporados. A classificação como pesquisa longitudinal se dá em função de a análise dos dados ser realizada ao longo de um determinado tempo, demarcado em períodos específicos de análise (semanas, meses ou anos). Os estudos longitudinais podem descrever os eventos ao longo do tempo. (BARRAT; CHOI; LI, 2011).

Finalmente, a pesquisa é classificada como aplicada, pois objetiva gerar conhecimento para aplicação prática, dirigida à solução de problemas específicos.

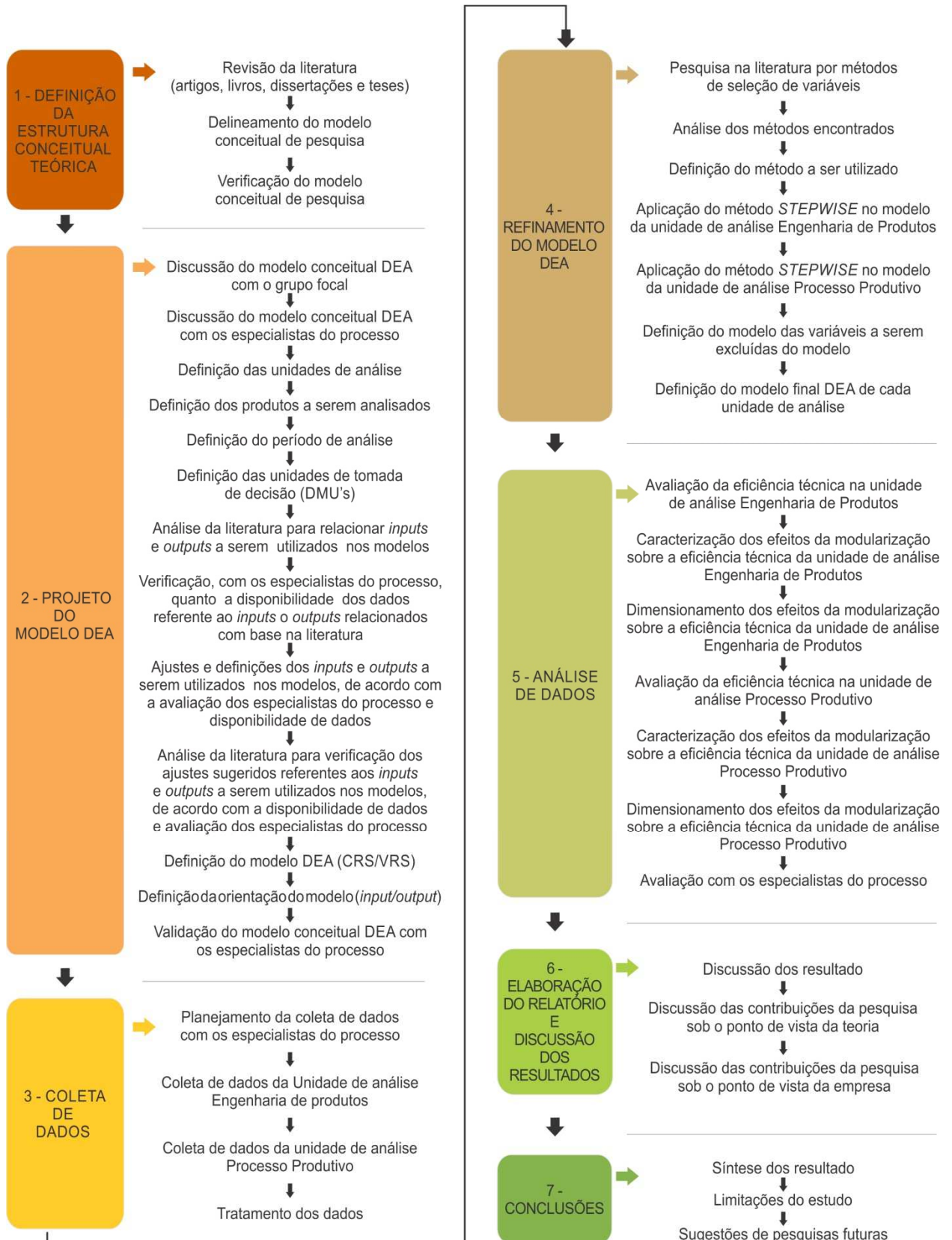
Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como explicativa, pois objetiva explicar a razão do fenômeno, aprofundando o conhecimento de uma determinada realidade. (YIN, 2005). Na seção 3.2 é detalhado o método de trabalho desta dissertação.

### 3.2 MÉTODO DE TRABALHO

Nesta seção, apresenta-se o método de trabalho para o desenvolvimento do estudo. Conforme Saunders, Lewis e Thornhill (2009), o método de trabalho é um conjunto de técnicas e procedimentos sistemáticos para se obter e analisar dados. Para Yin (2005), o método de trabalho é o caminho a ser seguido para se atingir o objetivo da pesquisa. Nesse sentido, o método de trabalho da presente pesquisa é composto pela seguinte sequência: 1) Definição da estrutura conceitual-teórica; 2) Projeto do modelo DEA; 3) Coleta de dados; 4) Refinamento do modelo DEA; 5) Análise de dados; 6) Elaboração do relatório; e 7) Descrição das conclusões.

As etapas do método de trabalho são planejadas de acordo com a sugestão de Cauchick Miguel et al. (2010), e estão ilustradas na Figura 19, apresentada anteriormente. No entanto, são efetuadas algumas adaptações nos passos sugeridos, como por exemplo, a substituição do teste piloto pelo refinamento do modelo DEA. O teste piloto poderia servir para definir quais dados seriam coletados para análise na pesquisa. No entanto, no presente trabalho optou-se por coletar um número maior de dados, e posteriormente definir, na etapa de refinamento do modelo DEA, quais informações seriam utilizadas ou não. O método de trabalho está ilustrado de forma detalhada na Figura 20.

Figura 20: Método de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Fase 1 do método de trabalho consiste na definição da estrutura conceitual-teórica da presente pesquisa. Nessa etapa, efetuou-se uma revisão sistemática da literatura, contemplando artigos, dissertações e teses de bancos de dados nacionais e internacionais. Também foram consultados livros sobre os temas de interesse. Na pesquisa, buscou-se identificar trabalhos sobre modularização, eficiência, análise envoltória de dados, análises estatísticas e análise de inferência causal em séries temporais. Após essa pesquisa, realizou-se o delineamento e a avaliação do modelo conceitual de pesquisa. O modelo conceitual de pesquisa é apresentado capítulo 1 da dissertação.

Na Fase 2 do trabalho, foi projetado o modelo DEA. Após a definição do modelo conceitual de pesquisa, formou-se um grupo focal, com a participação de 1 especialista em utilização da técnica DEA e 1 especialista do segmento investigado (indústria fabricante de ônibus). Posteriormente, foi explicado e discutido o modelo conceitual DEA com os especialistas do processo da empresa estudada. Na seção 3.4 (Coleta de Dados) são informados quais são os especialistas e os critérios para sua seleção. Na sequência, com base na literatura e com o apoio do grupo focal e dos especialistas do processo da empresa, foi efetuado o projeto do modelo DEA. Após o desenvolvimento do modelo DEA, foram feitos ajustes e uma avaliação final. Além disso, validou-se o modelo com o grupo focal e os especialistas da empresa que auxiliaram no desenvolvimento do estudo. Nesse sentido, entende-se que a validação de um modelo, principalmente o que envolve gestores e especialistas, auxilia a eliminar distorções no processo de pesquisa e a aumentar a credibilidade da análise conclusiva de um estudo. (JONSEN; JEHN, 2009; SODHI, TANG, 2014). A Fase 2, é apresentada na seção 3.3 Projeto do modelo DEA.

Após a definição e validação do modelo DEA a ser utilizado no estudo, iniciou-se a Fase 3, que é a coleta de dados. Os dados foram coletados com o apoio dos especialistas da empresa na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo. Após coletados, eles foram tratados e posteriormente analisados. A Fase 3 é apresentada na seção 3.4 Coleta de Dados.

Na Fase 4 do trabalho, houve um refinamento do modelo DEA. Essa fase objetiva, após pesquisa na literatura, determinar a utilização de um método que auxilie o pesquisador a definir se existem variáveis que podem ser consideradas irrelevantes e, assim, excluídas do modelo aplicado, com o intuito de evitar

problemas de discriminação nos escores de eficiência. O problema de discriminação ocorre quando não é possível distinguir DMU's eficientes e ineficientes em estudos utilizando análise envoltória de dados. Nesse sentido, entende-se que tal processo pode auxiliar no aumento do rigor da pesquisa, no que tange à determinação do modelo. Dessa forma, além do apoio dos especialistas do processo, aplicou-se um método para seleção de variáveis formalizado na literatura. A Fase 4 desta dissertação é apresentada na seção 3.5 Refinamento do modelo DEA.

Na Fase 5 foram analisados os resultados obtidos por meio da análise envoltória de dados. Inicialmente, efetuou-se uma avaliação para verificar o comportamento da eficiência na unidade de contexto de análise Engenharia de Produtos. Posteriormente, realizaram-se análises estatísticas com o objetivo de caracterizar os efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos. Após essas análises, buscou-se quantificar os efeitos percebidos da modularização sobre a Engenharia de Produtos. Isso é realizado com o apoio da técnica *CausalImpact*, que estima os efeitos de uma inferência causal em séries temporais, e consegue auxiliar a previsão de como se comportaria a eficiência analisada se a modularização não tivesse sido implementada. No que se refere ao processo Produtivo, adotou-se o mesmo procedimento pelo qual se analisou o comportamento da eficiência e se buscou caracterizar e quantificar os efeitos da modularização detectados sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo.

Na Fase 6 desta pesquisa, os resultados obtidos foram discutidos. Nesse sentido, procurou-se verificar quais foram as contribuições dos resultados sob o ponto de vista da teoria e da empresa. A Fase 6 é apresentada no capítulo 6, discussão dos resultados. A última Fase (Fase 7) do método de trabalho consistiu na descrição das conclusões acerca do problema estudado, e na discussão de limitações do estudo e de 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 na qual é desenvolvido o estudo é uma fabricante de ônibus que está implementando a estratégia de modularização. A seleção da empresa é



suportada por autores encontrados na literatura que destacam um crescente interesse da indústria automobilística pela modularização. (FINE; GOLANY; NASERALDIN, 2005; CABIGIOSU; ZIRPOLI; CAMUFFO, 2013). 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 modularização.

Nessa etapa de projeto do modelo DEA, recomenda-se buscar o apoio de especialistas e profissionais da organização estudada. (SENRA et al., 2007). No caso deste trabalho, este apoio foi prestado por um grupo focal e também por profissionais da empresa em que se desenvolveu o estudo. O grupo focal conta com 1 especialista na aplicação da técnica da DEA e um consultor especialista nos processos da indústria de fabricação de ônibus. Tal grupo fornece orientações preliminares quanto à definição de variáveis e quanto ao processo de coleta e tratamento de dados. No que tange aos profissionais da empresa, estes são consultados nessa etapa da pesquisa e também nas etapas subsequentes. Tais profissionais estão listados no Quadro 13. O Quadro 13 também sintetiza a função de apoio exercida por cada especialista da empresa e o tempo de atuação de cada profissional na organização.

Quadro 13: Profissionais da empresa consultados

<b>Função</b>	<b>Apoio no Projeto</b>	<b>Tempo empresa (anos)</b>
Engenheiro de Produto	Apoio na definição do modelo	8 anos
Engenheiro de Produto	Apoio na definição do modelo	13 anos
Coordenador <i>Team Center</i>	Apoio na definição do modelo e na coleta de dados da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo	10 anos
Gerente da Engenharia de Produtos	Apoio na definição do modelo	10 anos
Diretor de Engenharia	Apoio na definição do modelo, coleta de dados, validação do modelo e interpretação dos resultados	7 anos
Diretor Industrial	Apoio na definição do modelo, coleta de dados, validação do modelo e interpretação dos resultados	7 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os profissionais foram escolhidos em função da experiência no segmento, do conhecimento dos processos da empresa, por terem condições de apoiar o desenvolvimento do projeto e, principalmente, por terem participado ativamente da implementação da modularização na empresa, tanto na Engenharia de Produto



quanto no Processo Produtivo. A equipe formada para participar do projeto é multidisciplinar, visto que os profissionais envolvidos exercem cargos estratégicos (por exemplo, diretores), táticos (por exemplo, gerente) e operacionais (por exemplo, engenheiro de produto). Essa multidisciplinaridade é relevante, pois as diferentes posições organizacionais influenciam diferentemente os indivíduos na interpretação dos eventos. (O'LEARY-KELLY; VOKURKA, 1998).

Depois de definir os especialistas da empresa, conforme descrito no método de trabalho, inicia-se a fase de projeto do modelo DEA. O projeto do modelo DEA a ser utilizado pelo pesquisador é um dos pontos mais relevantes em avaliações com uso da análise envoltória de dados (COOK; TONE; ZHU, 2014), pois entende-se que modelos especificados de maneira não criteriosa têm impactos negativos nos resultados obtidos para análise. (NATARAJA; JOHNSON, 2011). Nesse sentido, na próxima seção, são discutidos os aspectos referentes à definição das unidades de contexto de análise.

### **3.3.1 Definição das unidades de contexto de análise**

A modularização do projeto e da produção contemplam as abordagens mais estudadas nas pesquisas que compreendem o tema da modularização. (CAMPAGNOLO; CAMUFFO, 2009). Nesse sentido, Campagnolo e Camuffo (2009) realizam uma investigação para verificar as abordagens que as pesquisas sobre modularização focam. Os resultados de Campagnolo e Camuffo (2009) apontam que, de um total de 140 trabalhos classificados, 56 trabalhos (40%) foram desenvolvidos com foco na modularidade de projetos e 49 trabalhos (35%) foram desenvolvidos com foco na modularidade de produção.

Ao discutir essas informações com os especialistas da empresa, identificou-se que essas duas abordagens eram utilizadas na organização e seriam passíveis de análises. Dessa forma, definiu-se que a pesquisa seria desenvolvida na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo da empresa. A partir dessa definição, dois modelos DEA foram desenvolvidos, um deles contemplando as características da Engenharia de Produtos e o outro contemplando as características do Processo Produtivo.

### 3.3.2 Definição dos produtos a serem analisados

A fabricante de carroceria de ônibus estudada possui 4 linhas de produtos, que são: Rodoviário, Intermunicipal, Urbano e Micro. Somente na linha Micro os produtos ainda não foram modularizados. No entanto, os especialistas do processo recomendaram que o estudo fosse desenvolvido nos produtos da linha Rodoviário, visto que em relação a eles os dados a serem coletados estavam disponíveis no *software* de gestão da empresa. No que tange aos demais produtos, (linha Urbano, por exemplo) haveria dificuldades para coletar dados, pois a empresa modificou o *software* de gestão da informação dificultando o acesso a algum dados.

Os produtos da linha Rodoviário são desenvolvidos para o transporte de passageiros em médias e longas distâncias e também para atividades de turismo. Essas características funcionais agregam a necessidade de que os veículos produzidos possuam um design diferenciado e uma estrutura interna ampla, garantindo maior segurança e conforto aos passageiros. Dessa forma, eleva-se a necessidade de variações do produto, o que aumenta a complexidade no desenvolvimento e na produção desses veículos.

Os especialistas da empresa também apontaram que a linha Rodoviário possui produtos que foram reprojatados e transformados de não modulares para modulares. Essa transformação do produto não modular para modular é essencial para o desenvolvimento desta análise, pois permite verificar o comportamento ao longo do tempo de um mesmo produto. Nessa análise longitudinal, verifica-se se a modularização proporcionou efeitos na eficiência técnica. Tal situação pode ser comprovada analisando-se o comportamento da eficiência do período anterior à modularização em comparação ao comportamento da eficiência do período posterior à modularização no mesmo produto avaliado.

Portanto, um produto da linha Rodoviário foi definido para estudo. Nesta pesquisa, tal produto é descrito somente como “projeto/produto modularizado”, para preservar dados sigilosos da empresa. Com o objetivo de reforçar o rigor e a confiabilidade dos efeitos detectados na pesquisa, também se optou por pesquisar um “projeto/produto não modularizado”. Esse projeto/produto serve para confirmar que os efeitos observados no projeto/produto da linha modularizada são realmente oriundos da modularização e não de outras melhorias e processos implementados

na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo (como por exemplo, aquisição de novas tecnologias, projetos de melhoria contínua, entre outros).

Entende-se que outras melhorias efetuadas no período pesquisado impactam igualmente em ambos os projetos/produtos (modularizado ou não modularizado), podendo isolar os efeitos da modularização. Assim, definiu-se um projeto/produto da linha Micro para pesquisar o segmento “projeto/produto não modularizado”. Tal escolha se deu em função de esta ser, atualmente, a única linha da empresa que não está modularizada. No entanto, o projeto/produto da Linha Micro que foi definido é fabricado na mesma linha de produção que o produto modularizado. Dessa forma, para o desenvolvimento e a produção dos dois produtos, são utilizadas as mesmas pessoas, máquinas, equipamentos e demais recursos. Outro aspecto apontado pelos especialistas do processo é que o produto da Linha Micro é similar ao produto da linha Rodoviário analisado. Dessa forma, os especialistas corroboram que os dois produtos possuem características que permitem a análise proposta. Destaca-se que nesta etapa ficou definido que os mesmos projetos/produtos (modularizado e não modularizado) serão utilizados para as duas análises (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo).

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

Como a pesquisa é longitudinal, uma das etapas é a determinação do período de análise. O primeiro aspecto que envolve tal decisão é verificar em que período o projeto/produto analisado foi reprojetoado e transformado de projeto/produto não modularizado para modularizado. Também é importante verificar em que período de tempo o produto modularizado passou a ser produzido. Após consulta aos especialistas da empresa, verificou-se que o projeto/produto modular objeto de estudo desta pesquisa foi modularizado na Engenharia de Produtos e introduzido no Processo Produtivo entre os meses de setembro e outubro de 2013. Como o produto era confeccionado anteriormente de forma não modular, durante esses dois meses foram finalizados, na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo, todos os projetos e produtos não modulares. Dessa forma, a partir de novembro de 2013, a empresa passou a projetar e produzir modularmente o produto analisado. Destaca-se que os especialistas da organização apontam que após um projeto ser

modularizado, este deve ser introduzido no Processo Produtivo em um intervalo de aproximadamente 15 dias, sendo que depois desse tempo se pode considerar que o projeto e a fabricação do produto foram modularizados simultaneamente.

Com essa definição, verificou-se com os especialistas da empresa o período de tempo em relação ao qual havia informações disponíveis para efetuar a coleta de dados. Obteve-se a informação de que em outubro de 2010 a empresa efetuou a alteração do *software* de gestão. Assim, os especialistas do processo recomendaram que se iniciasse o período de análise em janeiro de 2011. Conforme os profissionais, o novo *software* implementado a partir do final de 2010 fornece informações mais detalhadas e confiáveis.

Dessa maneira, definiu-se o período inicial de análise como janeiro de 2011 e o período final como junho de 2014. A escolha de tal período levou em conta o fato de que a coleta de dados foi efetuada nos meses de julho, agosto e setembro de 2014. O projeto/produto modularizado e o projeto/produto não modularizado são analisados no mesmo período nas duas unidades de contexto de análises definidas para estudo (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo).

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

Após a determinação do período de análise, definiram-se as DMU's com base longitudinal no período de três anos (2011, 2012, 2013) e seis meses de análise dos dados (semestre 1 de 2014). Esse período foi utilizado para as duas unidades de análise contempladas nesta pesquisa: Engenharia de Produtos e Processo Produtivo.

Inicialmente, planejou-se considerar cada ônibus projetado e produzido como uma DMU. No entanto, após discussão com os especialistas do processo, verificou-se a impossibilidade desse processo, pois apesar de cada projeto ser único na Engenharia de Produtos, pode gerar mais do que um produto fabricado. Por exemplo, se determinado cliente compra somente 1 (um) ônibus, o projeto e a fabricação serão para 1 (um) ônibus. No entanto, existem clientes que compram vários ônibus iguais. Nessa situação, a empresa confecciona 1 (um) projeto e pode produzir vários ônibus a partir dele. Essa realidade faz com que o projeto e a produção tenham DMU's com características diferentes, o que não é o objetivo do

trabalho, pois inviabiliza a utilização da DEA. Também se identificou no período de análise um volume elevado de projetos desenvolvidos e de unidades produzidas, o que tornaria inviável a análise de todo esse material.

Para auxiliar nesse impasse, buscou-se apoio na literatura. Nesse sentido, os trabalhos de Jain, Triantis e Liu (2011) e de Souza (2014) servem de suporte para definição da DMU. Jain, Triantis e Liu (2011) determinam como DMU o lote semanal de produção dos produtos em análise na pesquisa. Souza (2014) define DMU como o lote mensal da produção do produto determinado para análise. Assim, na Engenharia de Produtos, definiu-se como DMU o lote mensal de projetos modularizados e o lote mensal de projetos não modularizados. O lote mensal consiste no total de projetos elaborados no período de um mês pela Engenharia de Produtos. No Processo Produtivo, definiu-se como DMU o lote mensal de produtos modularizados e o lote mensal de produtos não modularizados. O lote mensal consiste no total de ônibus produzidos no período de um mês no Processo Produtivo.

Dessa forma, as análises na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo contemplam 42 DMU's, sendo: i) 12 DMU's referente aos meses do ano de 2011; ii) 12 DMU's referentes aos meses do ano de 2012; iii) 12 DMU's referentes aos meses do ano de 2013; e iv) 6 DMU's referente ao primeiro semestre de 2014. Entende-se que a avaliação do lote mensal é importante para a empresa no sentido de comparar os resultados da análise com os indicadores utilizados pela organização (SOUZA, 2014), considerando que esses indicadores geralmente são analisados mensalmente. Na próxima seção, estão descritos os procedimentos de definição das variáveis do modelo DEA.

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

A definição das variáveis de entrada (*input*) e de saída (*output*) pode ser considerada a etapa mais importante do processo de modelagem utilizando a análise envoltória de dados (DEA). (WAGNER; SHIMSHAK, 2007). Nesse sentido, Cook, Tone e Zhu (2014) destacam que em análises utilizando DEA não é possível ter completa certeza de que todas as variáveis relevantes foram incluídas no modelo definido. No entanto, Cook, Tone e Zhu (2014) apontam que devem ser feitos todos

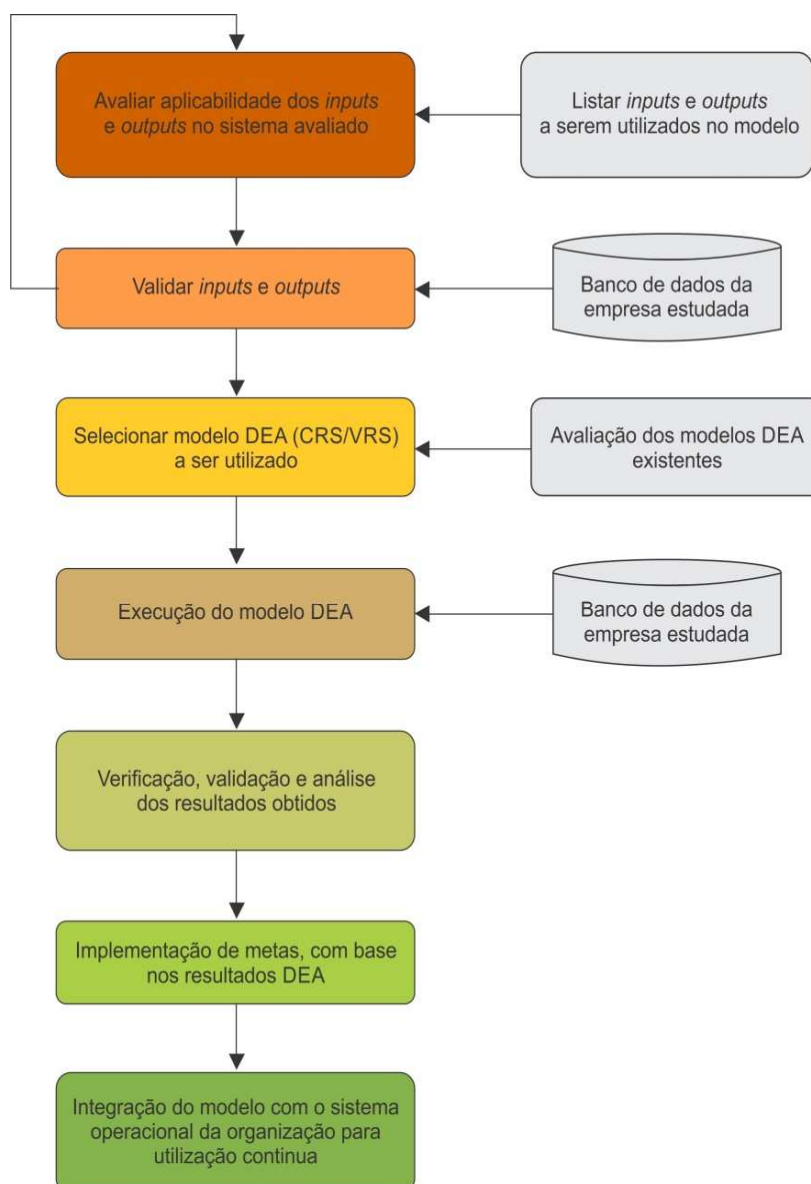
os esforços possíveis para incluir as variáveis que fazem sentido prático para a investigação proposta.

Dyson et al. (2001) argumentam que na definição de um conjunto de variáveis de entrada (*input*) e saída (*output*) deve-se procurar respeitar pressupostos fundamentais, tais como: i) procurar abranger a maior gama possível de recursos utilizados no processo em análise; ii) procurar captar todos os níveis de atividades e o máximo possível de medidas de desempenho; iii) definir um conjunto de variáveis comum a todas as unidades de análise; e iv) procurar considerar variáveis ambientais, se necessário.

Considerando que a definição de variáveis é apontada como uma questão central na modelagem DEA, os pesquisadores podem tender a definir um número elevado de variáveis para garantir que o modelo DEA desenvolvido represente adequadamente o processo analisado. No entanto, conforme Adler e Yazhemsky (2010), se um modelo DEA possuir um número relativamente elevado de variáveis em relação às DMU's definidas, tenderá a apresentar problema de discriminação entre as DMU's. O problema de discriminação ocorre quando não é possível distinguir as DMU's eficientes das ineficientes, comprometendo a análise de resultados. Assim, é necessário construir um modelo DEA com as variáveis consideradas relevantes na análise proposta. (WAGNER; SHIMSHAK, 2007).

Diante do contexto exposto, procurou-se o apoio do grupo focal e do *framework* proposto por Jain, Triantis e Liu (2011) para definir variáveis e modelo DEA (CRS/VRS) em análises utilizando a técnica da análise envoltória (Figura 21). Conforme Jain, Triantis e Liu (2011), existem duas etapas principais necessárias para execução DEA. Primeiro, um conjunto de entradas e saídas adequado precisa ser determinado e, segundo, o modelo DEA adequado precisa ser utilizado. As duas etapas descritas exigem muito envolvimento e discussão entre especialistas (grupo focal) e profissionais das empresas (especialistas do processo). Recomenda-se, na medida do possível, limitar o número de variáveis a serem consideradas no modelo, pois isso permite uma melhor discriminação, facilitando a identificação das unidades de tomada de decisão (DMU) eficientes e ineficientes. (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011).

Figura 21: Framework para seleção de variáveis DEA



Fonte: Traduzido de Jain, Triantis e Liu (2011).

Na Figura 21, verifica-se que o processo de definição de variáveis do modelo DEA deve iniciar com uma lista dos possíveis *inputs* e *outputs* do processo que se objetiva analisar. Posteriormente, deve-se verificar quais dessas variáveis relacionadas estão mais alinhadas com o processo estudado. Com isso, vê-se a disponibilidade de informações na empresa em que se desenvolve o estudo e, depois, efetua-se uma análise e validação dos dados a serem coletados. É comum que o modelo conceitual planejado não possa ser aplicado na íntegra devido à disponibilidade de dados das organizações, no entanto fornece uma boa orientação para o processo inicial de definição de variáveis.

Destaca-se que o *framework* proposto por Jain, Triantis e Liu (2011) limita-se a auxiliar os pesquisadores na definição de variáveis e de modelo DEA (CRS/VRS) a serem utilizadas na análise. Portanto, outros passos necessários para modelagem DEA (definição das unidades de análise, período de análise, DMU e orientação do modelo) não são abordados por Jain, Triantis e Liu (2011).

O processo de listagem e definição de variáveis realizado em conjunto com o grupo focal e com os especialistas da empresa foi desenvolvido integradamente para a Engenharia de Produtos e para o Processo Produtivo. No entanto, para melhor compreensão, os processos são apresentados separadamente. Na seção 3.3.5.1, são descritos os procedimentos para definição de variáveis na unidade de contexto de análise Engenharia de Produtos e na seção 3.3.5.2 são descritos os procedimentos relativos à definição de variáveis na unidade de contexto de análise referente ao Processo Produtivo.

#### 3.3.5.1 Definição das variáveis do modelo (*inputs e outputs*) na unidade de contexto de análise da Engenharia de Produtos

Seguindo os procedimentos sugeridos por Jain, Triantis e Liu (2011), inicialmente efetuou-se uma lista de variáveis a serem utilizadas na avaliação da Engenharia de Produtos. Para tanto, buscou-se suporte com o grupo focal e na literatura, considerando trabalhos sobre modularização e pesquisas que empregam a análise envoltória de dados (DEA) para avaliar o processo de desenvolvimento de produtos. Esse suporte da literatura para elaborar a lista de variáveis não é discutido no *framework* proposto por Jain, Triantis e Liu (2011). No entanto, entende-se que tal procedimento reforça o rigor da modelagem efetuada nesta pesquisa. As variáveis listadas para análise na Engenharia de Produtos e os trabalhos que serviram como base estão sintetizados no Quadro 14:



Quadro 14: Lista de potenciais variáveis da Engenharia de Produtos

Variável	Fonte
Horas de trabalho no projeto	TRAPPEY; CHIANG, 2008
<i>Part numbers</i>	ERIXON, 1998; ERICSON; ERIXON, 1999; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens comprados	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens produzidos	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de pessoas utilizadas no processo (Engenharia)	CHANDRA et al., 1998; SHAMMARI, 1999; ZHU, 2000; DUZAKIN; DUZAKIN, 2007
Número de problemas técnicos reportados	STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de produtos reclamados pelos clientes	NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Cumprimento do prazo de entrega dos projetos (projetos entregues na data ou atrasados)	SWINK; TALLURI; PANDEJPONG, 2006
Custo do projeto (em R\$)	SWINK; TALLURI; PANDEJPONG, 2006; TRAPPEY; CHIANG, 2008;
Quantidade de projetos desenvolvidos	TRAPPEY; CHIANG, 2008;

Fonte: Elaborado pelo autor.

As horas utilizadas na elaboração do projeto são definidas como variável na avaliação utilizando DEA desenvolvida por Trappey e Chiang (2008), que destacam que a variável relativa ao tempo é considerado um fator relevante a ser medido em avaliações nas empresas. A redução do número de *part numbers* é um dos principais benefícios citados na literatura proporcionados pela implementação da modularização. (ERIXON, 1998; ERICSON; ERIXON, 1999; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014). Napper (2014) destaca que a redução de componentes (*part numbers*) é concomitante com melhorias dos produtos, pois simplifica as especificações e a construção do ônibus e proporciona a redução de trabalho na Engenharia de Produtos. Destaca-se que as variáveis referentes ao número de itens comprados e produzidos também devem impactar o processo, como resultado da redução de componentes. (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002).

O número de pessoas que atuam no processo em avaliação é apontado como relevante, e é variável empregada em pesquisas identificadas na literatura. (CHANDRA et al., 1998; SHAMMARI, 1999; ZHU, 2000; DUZAKIN; DUZAKIN, 2007). A melhoria da qualidade dos produtos é apontada como um efeito da modularização. (STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014). Nanci et al., (2004) utilizam a variável número de reclamações de clientes em pesquisa utilizando DEA.

Swink, Talluri e Pandejpong (2006) destacam que é importante efetuar avaliações analisando pontualidade de entrega nas empresas, e avaliam o desempenho do desenvolvimento de novos produtos em 137 empresas, incluindo variáveis que contemplam o cumprimento do prazo estabelecido para execução dos projetos. A variável custo do projeto é utilizada em pesquisas desenvolvidas por Swink, Talluri e Pandejpong (2006) e Trappey e Chiang (2008). Na pesquisa de Trappey e Chiang (2008), os autores fazem uma avaliação do desenvolvimento de produtos de uma empresa fabricante de motocicletas e consideraram fundamental incluir a variável quantidade de projetos desenvolvidos como saída (*output*) do modelo DEA elaborado.

Após a elaboração do modelo teórico DEA com base em Jain, Triantis e Liu (2011), cada variável listada foi discutida com os especialistas da empresa com o objetivo de se validar a sua utilização e de se verificar a disponibilidade de dados a serem coletados. Inicialmente, as seguintes variáveis com dados disponíveis foram apontadas e validadas pelos especialistas da empresa: *part numbers*, número de itens comprados, número de itens produzidos, número de pessoas utilizadas na Engenharia, número de problemas técnicos reportados, número de produtos reclamados pelos clientes e quantidade de projetos desenvolvidos.

Quanto à variável *part numbers*, definiu-se utilizar o número de partes não compartilhadas entre os produtos da empresa. Dessa forma, quanto menos partes não compartilhadas houver (e conseqüentemente mais partes compartilhadas), melhor é o desempenho do modelo. O número de itens comprados e produzidos é considerado relevante pela empresa e pode mostrar a complexidade do projeto.

O número de pessoas utilizadas na Engenharia mostra a evolução do quadro de funcionários da unidade de análise em contexto. O número de problemas técnicos reportados representa o volume de problemas de projetos que impactam a produção dos produtos e é considerado um indicador relevante pela empresa. O número de produtos reclamados pelos clientes foi validado pois as reclamações recebidas na assistência técnica possibilitam o desenvolvimento de planos de ação entre Engenharia e Produção. Tais planos de ação demandam horas de trabalho dos engenheiros e mostram problemas constatados no produto final que são oriundos do projeto elaborado pela Engenharia de Produtos. A quantidade de projetos desenvolvidos é um dos principais indicadores de desempenho da Engenharia de Produtos.

No entanto, identificou-se indisponibilidade de dados por parte da empresa relativas a variáveis descritas nessa listagem inicial. O problema da indisponibilidade de dados de variáveis definidas no modelo conceitual é comum no processo de modelagem DEA e é relatado na literatura por Nataraja e Johnson (2011). Conforme Nataraja e Johnson (2011), na análise envoltória de dados a especificação de variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*output*) deve ser reavaliada pelo pesquisador com apoio dos utilizadores (os profissionais das empresas). Vários problemas podem surgir na elaboração de um modelo DEA, como por exemplo, a inexistência de dados planejados nos modelos iniciais. (NATARAJA; JOHNSON, 2011).

As variáveis com dados indisponíveis foram identificadas e excluídas do modelo. Estas variáveis são: i) horas de trabalho no projeto; ii) cumprimento dos prazos de entrega dos projetos; e iii) custo do projeto. Conforme os especialistas do processo, a empresa não controla a quantidade de horas empregadas no desenvolvimento de cada projeto. Dessa forma, a variável referente ao tempo de execução de projeto teve que ser excluída do modelo.

O controle relativo ao cumprimento do prazo de entrega de cada projeto também não é efetuado pela empresa, visto que existem alterações constantes no sequenciamento de produção. Dessa forma, a prioridade de execução dos projetos é alterada constantemente, impossibilitando um controle individual de cada projeto quanto ao prazo de entrega. Os especialistas destacaram que quanto a prazo, o objetivo da Engenharia de Produtos é entregar os projetos de acordo com o sequenciamento de produção efetuado, e que um controle individual de desempenho de entrega por projeto não é necessário. O controle de custo unitário real não foi disponibilizado pela organização, pois é considerado um dado sigiloso.

Após a eliminação das variáveis com dados indisponíveis, percebeu-se que o modelo não apresentava nenhuma variável relativa a tempo. Nesse sentido, os especialistas da empresa indicaram que o *lead time* do projeto (tempo de atravessamento, em dias, para especificação e configuração do projeto do ônibus na Engenharia de Produtos) é uma informação disponível. Assim, a variável *lead time* foi incluída no modelo DEA para representar a variável tempo. O *lead time* é uma variável relevante pela organização (de acordo com os especialistas é mais relevante do que as horas de trabalho). Também se detectou que poderiam ser coletados dados detalhados sobre essa variável segregando o *lead time* por processos dentro da Engenharia de Produtos. Foi sugerida, ainda, a inclusão do *lead time* de negociação

(tempo, em dias, do início da negociação do pedido até o fechamento do pedido), pois, apesar de tal processo ser executado pela área Comercial, também envolve aspectos técnicos com os quais a Engenharia de Produtos se envolve. Nesse sentido, a empresa está em processo de implementação do configurador de produtos, o que facilita a negociação por parte dos vendedores. Com a avaliação do *lead time* de negociação, entende-se que serão capturados aspectos importantes que envolvem a Engenharia no que tange ao processo de vendas.

Apesar de se julgar relevante a opinião dos especialistas do processo, buscou-se suporte na literatura para validar o uso da variável *lead time* na Engenharia de Produtos. Esse suporte na literatura contemplou pesquisas sobre modularização e avaliação da Engenharia de Produtos com a utilização da DEA. Em pesquisa sobre modularização, foi possível perceber que a análise do *lead time* é considerada importante (JONEJA; LEE, 2007; JACOBS et al., 2011), inclusive em pesquisas em empresas fabricantes de ônibus. (LIN; MA; ZHOU, 2012; NAPPER, 2014).

Joneja e Lee (2007), Jacobs et al. (2011) e Napper (2014) destacam que a modularização pode proporcionar redução do *lead time* de projeto. Lin, Ma e Zhou (2012) citam que a redução do *lead time* de projeto é fundamental para melhorar o desempenho das empresas fabricantes de ônibus. Também se verificou, na literatura, a indicação de oportunidades de estudo envolvendo *lead time*. Nessa direção, Kubota, Campos e Cauchick Miguel (2014) sugerem o desenvolvimento de pesquisas que demonstrem a redução de *lead time*, pois esses efeitos, dentre outros, são benefícios citados na literatura sobre modularização. A utilização da variável *lead time* como fator que considera o tempo de atividade também foi identificada no estudo de Trappey e Chiang (2008), que empregam a técnica da análise envoltória de dados (DEA) para avaliar o desenvolvimento de produtos de uma empresa fabricante de motocicletas.

Outro aspecto relevante é que os especialistas do processo indicaram que na dimensão qualidade de projetos/produtos (contemplada por número de problemas técnicos reportados e produtos reclamados pelos clientes) pode-se considerar também a variável número de itens reclamados, que consiste na quantidade de itens de um veículo que receberam reclamação de clientes (por exemplo, problemas com poltronas, motor, suspensão, etc.). Como essa variável foi considerada relevante pelos especialistas e está evidenciada na literatura (NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014), também foi incluída no modelo.

Nesse sentido, a variável *lead time* foi segregada para utilização neste trabalho em: i) *lead time* comercial (negociação); ii) *lead time* de engenharia (especificação do pedido); e iii) *lead time* de engenharia (configuração do produto). Também foi incluída a variável número de itens reclamados pelos clientes nos produtos. Dessa forma, é possível apresentar a lista final das variáveis definidas para serem utilizadas na análise da Engenharia de Produtos, conforme o Quadro 15:

Quadro 15: Lista final de variáveis da Engenharia de Produtos

Variável	Fonte
<i>Lead time</i> comercial (negociação)	TRAPPEY; CHIANG, 2008
<i>Lead time</i> de engenharia (especificação do pedido)	JONEJA; LEE, 2007; TRAPPEY; CHIANG, 2008; JACOBS et al., 2011; LIN; MA; ZHOU, 2012; KUBOTA; CAMPOS; CAUCHICK MIGUEL, 2014; NAPPER, 2014
<i>Lead time</i> de engenharia (configuração do produto)	JONEJA; LEE, 2007; TRAPPEY; CHIANG, 2008; JACOBS et al., 2011; LIN, MA, ZHOU, 2012; KUBOTA; CAMPOS; CAUCHICK MIGUEL, 2014; NAPPER, 2014
<i>Part numbers</i>	ERIXON, 1998; ERICSON; ERIXON, 1999; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens comprados	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens produzidos	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de pessoas utilizadas no processo (Engenharia)	CHANDRA et al., 1998; SHAMMARI, 1999; ZHU; 2000; DUZAKIN; DUZAKIN, 2007
Número de problemas técnicos reportados	STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de produtos reclamados pelos clientes	NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de itens reclamados pelos clientes	NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de projetos desenvolvidos	TRAPPEY; CHIANG, 2008

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição das variáveis a serem utilizadas, foi efetuada a descrição de cada variável e a definição de quais seriam usadas como entradas (*inputs*) no modelo e quais seriam utilizadas como saídas (*outputs*) no modelo. Também foi identificada a forma como os dados estavam disponíveis, visto que as variáveis definidas devem estar dispostas por projeto ou por período (por exemplo, o *lead time* de cada produto ou o número de pessoas na Engenharia por mês). Dessa forma, definiu-se a seguinte representação:

lj : Para variáveis cujos dados foram coletados com indicadores individuais, ou seja, por projeto;

j : Para variáveis cujos dados foram coletados com indicadores mensais.

Outro aspecto considerado é que os *inputs* e *output* foram classificados em fixos (F) e variáveis (V). Os *inputs/output* fixos referem-se a recursos que não variam de acordo com a demanda (número de pessoas utilizadas no processo, por exemplo). Os *inputs/output* variáveis referem-se a recursos que variam de acordo com a demanda (*lead time*, por exemplo). Essa classificação (fixos e variáveis) auxiliou o entendimento dos resultados. Dessa forma, o Quadro 16 apresenta o detalhamento das variáveis utilizadas na análise da Engenharia de Produtos:

Quadro 16: Detalhamento das variáveis da Engenharia de Produtos

Variável	Nome	Descrição	Indicador	F/V
Input1	Lead time comercial (negociação)	Tempo, em número de dias, referente à digitação do orçamento no sistema até a formalização da venda	lj – por projeto	Variável
Input2	Lead time de engenharia (especificação do pedido)	Tempo, em número de dias, referente ao detalhamento e refinamento do pedido vendido	lj – por projeto	Variável
Input3	Lead time de engenharia (configuração do produto)	Tempo, em número de dias, referente à elaboração do projeto do ônibus	lj – por projeto	Variável
Input4	Part numbers	Quantidade de itens (partes) não compartilhados com outros produtos contemplados na estrutura de cada projeto	lj – por projeto	Variável
Input5	Número de itens comprados	Quantidade de itens (partes), contemplados na estrutura de cada projeto, que são comprados de fornecedores externos	lj – por projeto	Variável
Input6	Número de itens produzidos	Quantidade de itens (partes), contemplados na estrutura de cada projeto, que são produzidos internamente	lj – por projeto	Variável
Input7	Número de pessoas utilizadas na Engenharia de Produtos	Quantidade de pessoas envolvidas nos processos da Engenharia de Produtos	J - mensal	Fixo
Input8	Número de problemas técnicos reportados	Número de vezes que a Produção reportou problemas de projeto detectados na fabricação dos produtos analisados	J - mensal	Variável
Input9	Número de produtos reclamados pelos clientes	Número de veículos reclamados pelos clientes para assistência técnica dos produtos analisados	J - mensal	Variável
Input10	Número de itens reclamados pelos clientes	Quantidade total de itens reclamados pelos clientes dos produtos analisados (veículo x itens por veículo)	J - mensal	Variável
Output1	Número de projetos desenvolvidos	Número total de projetos finalizados pela Engenharia de Produtos no período definido (mês)	J - mensal	Variável

Fonte: Elaborado pelo autor.

As definições das variáveis como *inputs* ou *outputs* foram feitas com base na literatura (COOK; TONE; ZHU, 2014) e em discussões com os especialistas do processo. Cook, Tone e Zhu (2014) destacam que os recursos utilizados no processo que está sendo avaliado devem ser definidos como *inputs* e que os resultados da utilização/transformação desses recursos devem ser definidos como *outputs*. Após discussão com os especialistas do processo, chegou-se ao consenso de que o *output*, ou seja, a saída a ser utilizada na Engenharia de Produtos, são os projetos desenvolvidos. Essa definição está alinhada ao trabalho de Trappey e Chiang (2008). Quanto às demais variáveis, o consenso foi de que deveriam ser utilizadas como *inputs*, ou seja, como entradas do modelo DEA. As variáveis de entrada (*inputs*) são: *lead time* comercial, *lead time* de engenharia (especificação do produto), *lead time* de engenharia (configuração do produto), *part numbers*, número de itens comprados, número de itens produzidos, número de pessoas utilizadas no processo (Engenharia), número de problemas técnicos reportados, número de produtos reclamados pelos clientes e número de itens reclamados pelos clientes. Na próxima seção, são discutidos os procedimentos de definição de variáveis do modelo DEA do Processo Produtivo.

#### 3.3.5.2 Definição das variáveis do modelo (*inputs* e *outputs*) na unidade de contexto de análise do Processo Produtivo

Conforme evidenciado, a definição de variáveis para a Engenharia de Produtos e para o Processo Produtivo foi efetuada conjuntamente, considerando, portanto, os mesmos procedimentos. Conforme sugerido por Jain, Triantis e Liu (2011), inicialmente, efetuou-se uma lista de variáveis a serem utilizadas na avaliação do Processo Produtivo. Para tanto, buscou-se suporte do grupo focal e da literatura, considerando trabalhos sobre modularização e pesquisas que empregam a análise envoltória de dados (DEA) para avaliações do Processo Produtivo. As variáveis listadas para análise no Processo Produtivo e os trabalhos que serviram como base estão sintetizados no Quadro 17:

Quadro 17: Lista de potenciais variáveis do Processo Produtivo

Variável	Fonte
Principais materiais utilizados na fabricação	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
Horas de trabalho na produção	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014
<i>Part numbers</i>	ERIXON, 1998; ERICSON; ERIXON, 1999; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens comprados	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens produzidos	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de pessoas utilizadas no processo (Produção)	CHANDRA et al., 1998; SHAMMARI, 1999; ZHU, 2000; DUZAKIN; DUZAKIN, 2007
Número de problemas técnicos reportados	STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de produtos reclamados pelos clientes	NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Cumprimento do prazo de entrega dos pedidos (pedidos entregues na data ou atrasados)	SWINK; TALLURI; PANDEJPONG, 2006; PARK; LEE; ZHU, 2014
Custo total unitário do produto (em R\$)	SWINK; TALLURI; PANDEJPONG, 2006
Quantidade de produtos produzidos	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA 2012; SOUZA, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma avaliação que contempla o Processo Produtivo, Jain, Traintis e Liu (2011) destacam que devem ser considerados como variáveis recursos tidos como primários para um processo de produção, como por exemplo, os principais materiais utilizados na fabricação dos produtos e as horas de trabalho (que representam a variável tempo). Essas variáveis (materiais e horas de fabricação) também foram utilizadas em outras pesquisas. (VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014). Os principais insumos (materiais) utilizados na fabricação também são apontados por Cook, Tone e Zhu (2014) como variáveis a serem usadas na avaliação do processo de produção.

O número de partes de um produto (*part numbers*) foi considerado com base em Erixon (1998), Ericson e Erixon (1999), Chakravarty e Balakrishnan (2007) e Napper (2014). Napper (2014) destaca que a redução de componentes (*part numbers*) simplifica a fabricação do ônibus e facilita o trabalho da produção. Entende-se que as variáveis referentes ao número de itens comprados e produzidos devem simplificar o processo de produção e proporcionar efeitos na fabricação, oriundos da redução de componentes. (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002).



A mão de obra direta, considerada como o número de pessoas, é apontada como variável relevante, sendo referenciada em pesquisas identificadas na literatura. (CHANDRA et al., 1998; SHAMMARI, 1999; ZHU, 2000; DUZAKIN; DUZAKIN, 2007). A melhoria da qualidade dos produtos é apontada como um dos efeitos da modularização. (STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014). Nesse sentido, Nanci et al. (2004) utilizam a variável número de reclamações de clientes em pesquisa utilizando DEA.

O desempenho no cumprimento de prazos de entrega também pode ser considerado variável a ser utilizada nas análises DEA, sendo listado nos trabalhos de Swink, Talluri e Pandejpong (2006) e Park, Lee e Zhu (2014). A variável custo unitário total do produto foi apontada como relevante por Swink, Talluri e Pandejpong (2006). No que se refere à quantidade de produtos produzidos, foram encontradas pesquisas (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014) que consideram esse dado como variável, em modelos utilizando DEA, para analisar o desempenho no Processo Produtivo. Nesse sentido, Cook, Tone e Zhu (2014) destacam que os produtos finais (entendidos neste trabalho como ônibus) resultantes das transformações de insumos (materiais) são comumente utilizados como saídas (*outputs*) em pesquisas que utilizam a técnica de análise envoltória de dados.

Com a listagem primária de possíveis variáveis a serem contempladas no processo produtivo, discutiu-se com os especialistas da empresa a fim de validar cada variável e avaliar a disponibilidade de dados a serem coletados. Inicialmente, as seguintes variáveis com dados disponíveis foram apontadas e validadas pelos especialistas: principais materiais utilizados na fabricação, *part numbers*, número de itens comprados, número de itens produzidos, número de pessoas utilizadas na Produção, número de problemas técnicos reportados, número de produtos reclamados pelos clientes e quantidade de produtos produzidos.

Quanto às variáveis *part numbers*, número de itens comprados, número de itens produzidos e número de pessoas utilizadas no processo, definiu-se a utilização dos mesmos critérios abordados na Engenharia de Produtos. O número de problemas técnicos reportados representa o volume de problemas de projetos de produtos que impactam diretamente a fabricação dos ônibus e prejudicam a produtividade da empresa. As reclamações dos clientes possibilitam o desenvolvimento de planos de ação entre Produção e Engenharia e demandam

tempo e esforços dessas equipes. A quantidade de produtos produzidos é um dos principais indicadores de desempenho do Processo Produtivo da empresa.

No que se refere aos principais materiais utilizados na fabricação, procurou-se definir quais poderiam ser incluídos na presente pesquisa. Conforme orientação dos especialistas, foram definidos os materiais considerados da curva A, dentre os utilizados no processo. Os materiais considerados mais relevantes (itens A) na fabricação de ônibus são: aço, alumínio, fibra, passadeira, tecidos e vidros. Conforme informação dos especialistas do processo, esse itens representam 73% do custo total com materiais de um produto (ônibus). Dessa forma, esses materiais (aço, alumínio, fibra, passadeira, tecidos, vidros) foram considerados variáveis a serem utilizadas na avaliação do Processo Produtivo.

Quanto às horas de trabalho, verificou-se na empresa que não seria possível efetuar o levantamento das horas de trabalho reportadas para cada produto produzido. A empresa utiliza, atualmente, um *software* que contempla essa informação, no entanto, os dados estão disponíveis a partir de 2014, não sendo possível coletar informações referentes aos anos de 2011, 2012 e 2013. Como a pesquisa efetua uma análise longitudinal, não é possível utilizar informações parciais dos períodos. A empresa também não forneceu dados referentes ao custo total unitário dos produtos, visto que mantém essa informação como sigilosa.

Com os dados informados pelos especialistas acerca das datas de entrega e dias de atraso, verificou-se que muitos produtos, apesar de prontos e liberados para envio ao cliente, ficam na empresa aguardando a liberação da validação do chassi (no *PDI*), que é efetuada pelo fornecedor do chassi, ou definições comerciais. Dessa forma, com base na opinião dos especialistas e em Jain, Triantis e Liu (2011), optou-se por retirar a variável referente ao cumprimento de prazos de entrega do modelo.

Nesse sentido Jain, Trinatis e Liu (2011) destacam que modelos DEA funcionam melhor quando as variáveis (*inputs* e *outputs*) estão claramente relacionadas com o processo em análise. Isso pode resultar em exclusão de medidas, tais como desempenho de datas de entrega, que podem ser baseadas em esforços externos de fabricação, como promoção de vendas e relações comerciais. (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011). Assim, observa-se que dificuldades com variáveis que contemplam datas de entrega e atraso já foram enfrentadas em pesquisas anteriores. Entende-se, então, que a decisão de exclusão dessa variável está embasada pela literatura. (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011).

Em resumo, com o apoio dos especialistas do processo, ajustou-se o modelo DEA a ser utilizado para avaliar o Processo Produtivo com a exclusão das seguintes variáveis, consideradas como indisponíveis: i) horas de trabalho na produção dos produtos; ii) cumprimento de prazos de entrega; e iii) custo total unitário do produto.

Após a eliminação das variáveis cujos dados estavam indisponíveis, percebeu-se que o modelo não apresentava nenhuma variável relativa a tempo. Nesse sentido, os especialistas da empresa sugeriram efetuar a mesma modelagem já realizada para a Engenharia de Produtos: utilizar o *lead time*. O *lead time* é considerado uma variável relevante pela organização, e percebeu-se que poderiam ser coletados dados detalhados dessa variável segregando o *lead time* por processo dentro da Produção. A segregação por processo sugerida se deu entre o setor de Fabricação e Montagem. A Montagem contempla os processos de Casulo, Chapeamento, Pintura e Rodagem.

Para validar a utilização da variável *lead time* no Processo Produtivo, buscou-se, na literatura, suporte em pesquisas que contemplam modularização e avaliação do Processo Produtivo com o uso da DEA. Em pesquisa sobre modularização, percebeu-se que a importância da análise do *lead time* é considerada em estudos de Joneja e Lee (2007), Starr (2010), Jacobs et al. (2011), Lin, Ma e Zhou (2012), Napper (2014) e Park, Lee e Zhu (2014).

Joneja e Lee (2007), Jacobs et al. (2011) e Napper (2014) destacam que a modularização pode proporcionar a redução do *lead time* de produção. Starr (2010) cita que a modularização pode acelerar a entrega de produtos ao cliente, e Lin, Ma e Zhou (2012) argumentam que a redução do *lead time* de produção pode melhorar a competitividade das empresas fabricantes de ônibus, pois em tal mercado a questão tempo é considerada uma vantagem competitiva. Park, Lee e Zhu (2014) efetuam uma avaliação utilizando a técnica da análise envoltória de dados (DEA) no processo de fabricação de uma empresa da indústria naval Coreana. Segundo os autores, a redução do período global de fabricação (entendido neste trabalho como *lead time*) permite que a organização obtenha um desempenho eficiente.

Os especialistas do processo fizeram, para o Processo Produtivo, a mesma recomendação efetuada para a Engenharia de Produtos no que tange à dimensão de qualidade de produtos. Nesse sentido, indicaram que fosse considerada a variável número de itens reclamados, que consiste na quantidade de itens de um veículo que receberam reclamação por parte dos clientes (por exemplo, problemas

com poltronas, motor, suspensão, etc.). Como essa variável foi considerada relevante pelos especialistas, também foi incluída no modelo do Processo Produtivo (assim como já havia sido considerada na Engenharia de Produtos).

Nesse sentido, a variável *lead time* foi incluída na lista de variáveis do Processo Produtivo, segregada em duas etapas na produção: i) *lead time* de fabricação; e ii) *lead time* de montagem. Conforme sugestão dos especialistas, foi incluída a variável iii) número de itens dos produtos reclamados pelos clientes. Dessa maneira, é possível apresentar a lista final das variáveis definidas para serem utilizadas na análise do Processo Produtivo, conforme o Quadro 18:

Quadro 18: Lista final de variáveis do Processo Produtivo

Variável	Embasamento
Aço	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
Alumínio	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
Fibra	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
Passadeira	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
Tecidos	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
Vidros	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014
<i>Lead time</i> de Fabricação	JONEJA; LEE, 2007; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; LIN; MA; ZHOU, 2012; NAPPER, 2014
<i>Lead time</i> de Montagem	JONEJA; LEE, 2007; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; LIN; MA; ZHOU, 2012; NAPPER, 2014
<i>Part numbers</i>	ERIXON, 1998; ERICSON; ERIXON, 1999; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens comprados	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de itens produzidos	SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002; CHAKRAVARTY; BALAKRISHNAN, 2007; NAPPER, 2014
Número de pessoas utilizadas no processo (Produção)	CHANDRA et al., 1998; SHAMMARI, 1999; ZHU, 2000; DUZAKIN; DUZAKIN, 2007
Número de problemas técnicos reportados	STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de produtos reclamados pelos clientes	NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Número de itens reclamados pelos clientes	NANCI et al., 2004; STARR, 2010; JACOBS et al., 2011; FENG; ZHANG, 2014
Quantidade de produtos produzidos	JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011, VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; COOK; TONE; ZHU, 2014

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição das variáveis a serem utilizadas, foi efetuada a descrição de cada variável e decidido quais seriam utilizadas como entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) no modelo. Também foi identificada a forma como os dados estavam disponíveis, visto que as variáveis definidas devem estar dispostas por produtos ou por período (por exemplo o *lead time* de cada produto ou o número de pessoas do Processo Produtivo). Dessa forma, definiu-se a seguinte representação:

lj : Para variáveis cujos dados foram coletados com indicadores individuais, ou seja, por produto.

j : Para variáveis cujos dados foram coletados com indicadores mensais.

Para auxiliar o entendimento dos resultados, os *inputs* e *output* são classificados em fixos (F) e variáveis (V). Dessa forma, o Quadro 19 apresenta o detalhamento das definições das variáveis utilizadas na análise do Processo Produtivo:

Quadro 19: Detalhamento das variáveis do Processo Produtivo

(Continua)

Variável	Nome	Descrição	Indicador	F/V
Input1	Aço	Quantidade em kg de aço utilizado na fabricação do ônibus	lj – por produto	Variável
Input2	Alumínio	Quantidade em kg de alumínio utilizado na fabricação do ônibus	lj – por produto	Variável
Input3	Fibra	Quantidade em kg de fibra utilizada na fabricação do ônibus	lj – por produto	Variável
Input4	Passadeira	Quantidade em m <sup>2</sup> de passadeira utilizada na fabricação do ônibus	lj – por produto	Variável
Input5	Tecidos	Quantidade em m <sup>2</sup> de tecido utilizado na fabricação do ônibus	lj – por produto	Variável
Input6	Vidros	Quantidade em unidades de vidros utilizados na fabricação do ônibus	lj – por produto	Variável
Input7	Lead time de Fabricação	Tempo, em número de dias, referente à entrada do produto em produção até a saída do setor de Fabricação	lj – por produto	Variável
Input8	Lead time de Montagem	Tempo, em número de dias, do início até o final da montagem do ônibus	lj – por produto	Variável
Input9	Part numbers	Quantidade de itens (partes) não compartilhados com outros produtos contemplados na estrutura de cada produto produzido	lj – por produto	Variável
Input10	Número de itens comprados	Quantidade de itens (partes) contemplados na estrutura de cada produto que é comprado de fornecedores externos	lj – por produto	Variável
Input11	Número de itens produzidos	Quantidade de itens (partes) contemplados na estrutura de cada produto produzido internamente	lj – por produto	Variável
Input12	Número de pessoas utilizadas no processo (Produção)	Quantidade de pessoas envolvidas no processo de produção dos produtos	J - mensal	Fixo

(Conclusão)

Variável	Nome	Descrição	Indicador	F/V
<i>Input13</i>	Número de problemas técnicos reportados	Número de vezes que a Produção reportou problemas de projeto/produto detectados na fabricação dos ônibus analisados	J - mensal	Variável
<i>Input14</i>	Número de produtos reclamados pelos clientes	Número de veículos reclamados pelos clientes para assistência técnica dos produtos analisados	J - mensal	Variável
<i>Input15</i>	Número de itens reclamados pelos clientes	Quantidade total de itens reclamados pelos clientes dos produtos analisados (veículo x itens por veículo)	J - mensal	Variável
<i>Output1</i>	Quantidade de produtos produzidos	Número total de produtos finalizados pela Produção no período definido (mês)	J - mensal	Variável

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que os recursos utilizados no processo devem ser definidos como *inputs* e que os resultados da utilização/transformação desses recursos devem ser definidos como *outputs* (COOK; TONE; ZHU, 2014), com o apoio dos especialistas do processo os produtos produzidos foram definidos como *output* do Processo Produtivo. Essa definição está alinhada aos trabalhos de Jain, Triantis e Liu (2011), Von Gilsa (2012) e Souza (2014).

No que se refere às demais variáveis, o consenso foi de que deveriam ser utilizadas como *inputs*, ou seja, como entradas do modelo DEA. As variáveis de entrada (*inputs*) são: principais materiais utilizados no processo (aço, alumínio, fibra, passadeira, tecidos, vidros), *lead time* de fabricação, *lead time* de montagem, *part numbers*, número de itens comprados, número de itens produzidos, número de pessoas do processo (Produção), número de problemas técnicos reportados, número de produtos reclamados pelos clientes e número de itens reclamados pelos clientes.

Após a escolha do modelo, define-se e justifica-se a opção pelo modelo DEA CRS ou VRS e a orientação final do modelo *input* ou *output*.

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

Após a escolha das variáveis a serem utilizadas na presente análise, seguindo o *framework* proposto por Jain, Triantis e Liu (2011), a próxima etapa é a definição do modelo DEA a ser empregado. Nesse sentido, a literatura sobre DEA contempla dois modelos que são usados na aplicação da técnica. O primeiro é o modelo CRS (*Constant Returns to Scale*), recomendado quando o objetivo é comparar unidades de tomada de decisão (DMU) de variáveis com amplitudes

similares. O segundo é o modelo VRS (*Variable Returns to Scale*), recomendado quando o objetivo é comparar DMU's de variáveis com amplitudes diferentes.

O modelo a ser utilizado neste trabalho é o CRS, visto que é efetuada uma análise interna (*benchmark* interno) na empresa foco do estudo. Dessa forma, a amplitude e escala das variáveis selecionadas são similares entre as DMU's, indicando a utilização do modelo CRS. Outro aspecto que embasa a utilização do modelo CRS é que tal modelo é o mais recomendado para cálculo de eficiência, cujo objetivo é testar a habilidade de evitar desperdícios, produzindo o máximo de resultado que os recursos permitem, ou utilizando o mínimo de recursos para a produção executada. (KLEINE, 2004). Dessa forma, definiu-se o uso do modelo CRS para avaliar as duas unidades de análise, a saber, Engenharia de Produtos e Processo Produtivo.

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

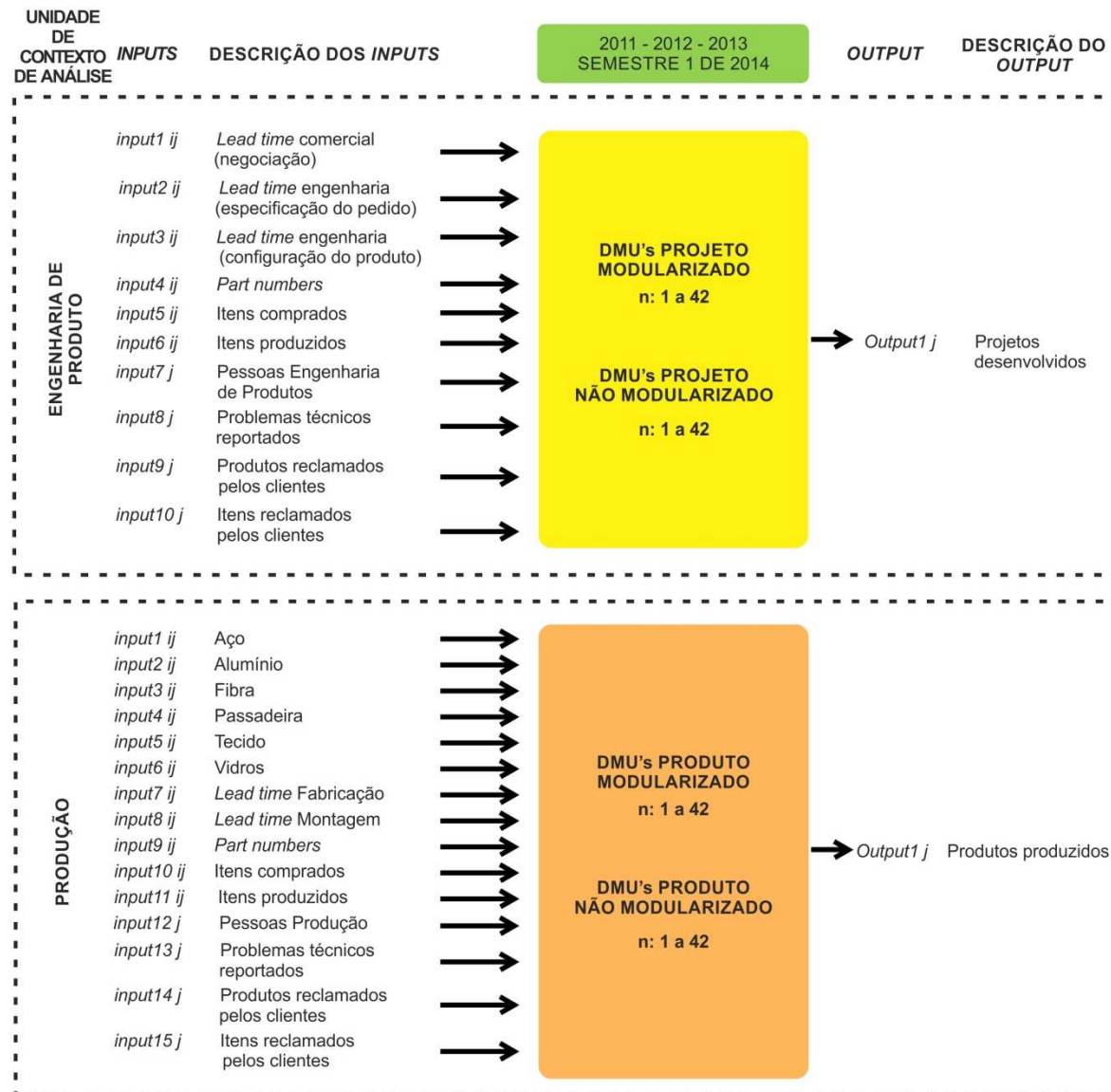
Existem duas possibilidades de orientação do modelo DEA: entrada (*input*) ou saída (*output*). A orientação a *input* ocorre quando se busca minimizar a utilização dos recursos (variáveis de entrada) e manter os *outputs* (saídas) constantes. Nessa situação, os resultados DEA retornam ao pesquisador e tomador de decisão o montante dos recursos de entrada estabelecidos no modelo que poderiam ser utilizados e economizados. A orientação a *output* ocorre quando se busca manter os *inputs* (variáveis de entradas) constantes e maximizar os *outputs* (saídas). Nesse caso, os resultados DEA retornam ao pesquisador e tomador de decisão o montante que poderia ser produzido com a mesma quantidade de recursos consumidos. (COOK; TONE; ZHU, 2014).

Na presente pesquisa, utiliza-se a orientação a *input*. A orientação a *input* é recomendada quando os recursos utilizados no processo (*inputs*) são mais controláveis do que as saídas (*outputs*). (HAMDAN; ROGERS, 2008). Nesse sentido, entende-se que os recursos utilizados, tanto na Engenharia de Produtos quanto no Processo Produtivo, são mais controláveis do que o número de projetos desenvolvidos e o número de ônibus produzidos (considerados as saídas dos modelos). Essa orientação foi validada pelos especialistas da empresa, tendo em vista que o volume de projetos desenvolvidos e o número de ônibus produzidos dependem

da demanda de mercado. Nesse caso, a orientação a *input* propõe a redução da utilização dos recursos das unidades ineficientes. (HAMDAN; ROGERS, 2008).

A orientação a *input* também foi escolhida por Jain, Triantis e Liu (2011) quando estes avaliaram processo produtivo utilizando análise envoltória de dados DEA. Assim, entende-se que a escolha orientada a *input* desta pesquisa é suportada pela literatura. Destaca-se que a escolha da orientação de modelo DEA efetuada nesta seção é considerada a última etapa da modelagem DEA. Portanto, realizadas as definições do projeto do modelo DEA, é possível apresentar a esquematização (Figura 22) do modelo definido para esta pesquisa, contemplando as unidades de análise de Engenharia de Produtos e Processo Produtivo.

Figura 22: Modelo DEA utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo Autor.



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

### 3.4 COLETA DE DADOS

Nesta seção são apresentados os procedimentos utilizados para coleta de dados. Ao testar ou construir teorias a partir de estudos de caso, os pesquisadores devem ter foco claro para coletar dados específicos de maneira sistemática. (MINTZBERG, 1979). Apesar de as questões de pesquisa evoluírem ao longo do trabalho, deve-se manter o foco e a coerência ao longo da coleta e análise de dados. (EISENHARDT, 1989; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Inicialmente, foram efetuadas 2 reuniões com o grupo focal que apoiou a pesquisa. Nesses encontros foram discutidas orientações para coleta de dados. Posteriormente, conversou-se com os especialistas da empresa (apresentados no Quadro 13), que além de apoiarem a definição do modelo DEA, também auxiliaram a coleta de dados da pesquisa. A definição dos profissionais ocorreu após visita de 2 dias à empresa estudada. Durante essa visita, realizou-se uma discussão com o Diretor de Engenharia e o Diretor Industrial. Também foram observados os processos de engenharia e manufatura, com visitas guiadas pelo Coordenador de Engenharia de Produtos.

As discussões com os profissionais dirigentes da empresa foram úteis para se entender se a modularização é vista como uma estratégia para a empresa e como ocorreu o processo de implementação. As informações obtidas com os diretores de Engenharia e Produção foram relevantes para melhor compreensão da empresa e de seus processos. Destaca-se também o apoio por parte da direção em todas as etapas do desenvolvimento da pesquisa de campo. Os demais diálogos ocorreram com os engenheiros e coordenadores, com os quais foram definidos e posteriormente discutidos os parâmetros do modelo DEA. O objetivo da coleta foi obter dados completos para operacionalização do modelo DEA.

Após a definição do modelo DEA, foi elaborado, também em conjunto com os especialistas da organização, um planejamento da coleta de dados a ser efetuada. Nessa etapa, o trabalho foi desenvolvido principalmente em conjunto com o coordenador do *Team Center*, profissional que atua na Engenharia Corporativa da organização e que possui acesso ao banco de dados do *software* de gestão da

empresa. Destaca-se, nesse ponto, que o apoio do Coordenador do *Team Center* foi importante, pois, em muitos casos, ele elaborou relatórios que ainda não eram analisados sistematicamente pela empresa (*Lead time* de negociação, por exemplo). Nesse sentido, relatórios foram elaborados e dados foram extraídos diretamente do banco de dados da organização. Esses dados que não eram observados anteriormente exigiram extensos esforços de tratamento por parte do pesquisador e do Coordenador de *Team Center* da organização.

A coleta de dados foi efetuada, primeiramente, na Engenharia de Produtos, e ocorreu nos meses de julho e agosto de 2014. Após definições de produtos e de períodos a serem analisados, foi levantado o número de projetos desenvolvidos, no que se refere aos projetos do produto modularizado e do produto não modularizado. Os dados coletados relativos à quantidade de projetos estão sintetizados na Tabela 4:

Tabela 4: Quantidade de projetos da coleta de dados

Período	Quantidade de projetos produto modularizado	Quantidade de projetos produto não modularizado	Quantidade total de projetos do período
2014 (jan/jun)	49	129	178
2013 (jan/dez)	105	165	270
2012 (jan/dez)	135	110	245
2011 (jan/dez)	140	113	253
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>429</b>	<b>517</b>	<b>946</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

A coleta de dados foi efetuada de acordo com o período proposto para investigação. Após o levantamento dos projetos executados no período (*output* da análise), buscou-se informações referentes aos dados das variáveis definidas no modelo DEA. Nesse sentido, cada projeto elaborado pela organização recebe um número de identificação (*ID*) exclusivo. Através deste *ID* foi possível rastrear os dados dos projetos no *software* de gestão. Os demais dados, que são indicadores mensais (número de pessoas na Engenharia, por exemplo), foram obtidos nos relatórios de indicadores gerenciais fornecidos pela direção da Engenharia da empresa.

Após a coleta de dados da unidade de análise Engenharia de Produtos, iniciou-se a coleta de dados da unidade de análise Processo Produtivo, o que ocorreu nos meses de setembro e outubro de 2014. Nessa etapa, foram extraídos e gerados relatórios utilizados em análises da gestão da produção. Relatórios contendo, por exemplo, o *Lead time* de produtos e os consumos de materiais foram extraídos diretamente do banco de dados do sistema da organização. Na coleta de

dados da produção também foi fundamental o suporte do Diretor Industrial, que apoiou a condução de todo o trabalho, disponibilizando dados dos indicadores gerenciais utilizados pela organização.

Após definidos produtos e períodos a serem investigados, levantou-se o número de produtos produzidos no período em análise relativos à fabricação do produto modularizado e do produto não modularizado. Os dados coletados no que diz respeito à quantidade de produtos produzidos estão sintetizados na Tabela 5:

Tabela 5: Quantidade de produtos da coleta de dados

Período	Quantidade produzida produto modularizado	Quantidade produzida produto não modularizado	Quantidade total produzida no período
2014 (jan/jun)	211	148	359
2013 (jan/dez)	500	296	796
2012 (jan/dez)	450	300	750
2011 (jan/dez)	645	401	1.046
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>1.806</b>	<b>1.145</b>	<b>2.951</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Após o levantamento dos produtos produzidos no período (*output* da análise), buscou-se informações referentes aos dados das variáveis definidas no modelo DEA. Nesse sentido, cada produto recebe um número de identificação (*ID*), o que possibilitou coletar informações no sistema de gestão da empresa. Destaca-se que os demais dados, considerados indicadores mensais (por exemplo, número de pessoas na Produção), foram fornecidos pela direção de Produção da empresa. Também foram fornecidos vídeos explicativos sobre a implementação da modularização. Além disso, o pesquisador, durante visitas à empresa, registrou notas de campo a fim de coletar informações adicionais.

Após a coleta de todas as informações necessárias para análise, e de acordo com as sugestões do grupo focal, iniciou-se o processo de tratamento dos dados. Inicialmente, as informações foram organizadas em planilhas eletrônicas. Conforme explicado anteriormente, os dados foram coletados de duas formas: i) como indicadores individuais, considerando os projetos da Engenharia de Produtos e os produtos produzidos no Processo Produtivo; e ii) como indicadores mensais, considerando as informações controladas mensalmente na Engenharia de produtos e no Processo Produtivo.

Dessa forma, definiu-se que os dados seriam alinhados de acordo com as DMU's, que são os lotes mensais de projetos desenvolvidos e os lotes mensais de

produtos produzidos. As informações que foram coletadas dos indicadores mensais não necessitaram de ajustes, pois estavam alinhadas com a definição da DMU. No entanto, as informações coletadas de forma individual necessitaram ser tratadas. Para tanto, efetuou-se um somatório desses dados de acordo com a data dos projetos desenvolvidos e com os produtos produzidos mensalmente.

No que se refere à Engenharia de Produtos, inicialmente os projetos foram agregados de acordo com o mês de liberação. Por exemplo, se no mês de janeiro de 2011 foram liberados dois projetos, estes foram considerados com o lote de projetos desenvolvidos no mês. Com as variáveis de entrada (*inputs*) executou-se o mesmo procedimento: se o *lead time* de negociação do projeto 1 (janeiro de 2011, considerado anteriormente) foi de 5 dias e o do projeto 2 foi de 10 dias, o somatório dessas variáveis (15 dias) foi considerado como informação. Quanto ao Processo produtivo, o procedimento executado foi o mesmo, considerando-se o somatório dos produtos individuais das informações coletadas nos produtos produzidos mensalmente. Na seção 3.5 será apresentado o processo de refinamento do modelo DEA.

### 3.5 REFINAMENTO DO MODELO DEA

A partir dos dados tratados, iniciou-se a fase de cálculos da produtividade e eficiência no aplicativo SIAD v 3.0 (*software* utilizado para efetuar os cálculos desta pesquisa) e buscou-se um refinamento do modelo DEA definido. A modelagem DEA não fornece propriamente uma orientação para especificação de variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*), em vez disso, tais definições são deixadas a critério do utilizador. (NATARAJA; JOHNSON, 2011). Primeiramente, foi elaborada uma listagem de variáveis potenciais (com apoio do grupo focal e da literatura) que foram discutidas e avaliadas pelos especialistas do processo analisado. O apoio dos especialistas do processo é recomendado pela literatura (SENRA et al., 2007) e está explicitado em pesquisas e avaliações que utilizam a técnica da análise envoltória de dados (DEA). (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014).

Mesmo entendendo que o modelo DEA perde o poder discriminatório com um elevado número de variáveis (*inputs* e *outputs* somados) (ADLER; YAZHEMSKY,

2010; NATARAJA; JOHNSON, 2011), procurou-se não limitar a participação e as sugestões do grupo focal e dos especialistas da empresa no processo de definição de entradas e saídas consideradas relevantes para serem incluídas na análise. Nesse sentido, após a modelagem dos processos da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo, percebeu-se que os modelos definidos com apoio do grupo focal, da literatura e dos especialistas da empresa apresentaram um elevado número de variáveis. Além disso, o modelo do Processo Produtivo rompeu a regra de que o número de DMU's deve ser no mínimo 3 (três) vezes maior do que o número de variáveis (*inputs* e *outputs* somados). (BANKER et al., 1989; COOK; TONE; ZHU, 2014). O cumprimento dessa regra é importante para o modelo DEA não apresentar problema de discriminação, ou seja, conseguir distinguir as DMU's eficientes das ineficientes.

Percebeu-se que o modelo do Processo Produtivo definido conta com 15 variáveis de entrada (*input*) e 1 variável de saída (*output*), ou seja, com 16 variáveis no total. Para cumprir a regra de se ter 3 vezes mais DMU's, o modelo deveria apresentar 48 DMU's. No entanto, na presente pesquisa, o modelo definido possibilita 42 DMU's. Quanto ao modelo definido na Engenharia, destaca-se que a regra foi obedecida, pois o modelo conta com 11 variáveis de 42 DMU's.

Diante do contexto apresentado, consultou-se a literatura, buscando identificar estudos que auxiliassem o pesquisador a solucionar a questão exposta quanto ao elevado número de variáveis dos modelos. Identificou-se, então, que tal problema é comumente enfrentado por pesquisadores que se propõem a utilizar a técnica DEA. (SENRA et al., 2007; WAGNER; SHIMSHAK, 2007; ADLER; YAZHEMSKY, 2010; NATARAJA; JOHNSON, 2011; COOK; TONE; ZHU, 2014). A sugestão dos pesquisadores é utilizar técnicas estatísticas que auxiliem a definir variáveis importantes a serem utilizadas no modelo, desconsiderando variáveis que não contribuem nos cálculos de produtividade e eficiência efetuados pela DEA. Esse procedimento é conhecido como abordagem *Stepwise* (passo a passo) para seleção de variáveis em DEA.

Quanto à utilização de técnicas de seleção de variáveis em DEA, Adler e Yazhensky (2010) destacam que, ao avaliar a omissão ou adição de variáveis consideradas importantes, entende-se como preferível adicionar todas as variáveis consideradas relevantes no momento da modelagem DEA e, posteriormente, aplicar métodos de seleção de variáveis. Senra et al. (2007) destacam que a análise prévia

de possíveis conjuntos de variáveis é uma etapa fundamental a ser feita conjuntamente com decisores, especialistas e analistas. Somente após essa escolha prévia faz sentido pensar em métodos de seleção de variáveis. (SENRA et al., 2007). Dessa forma, esse foi o procedimento adotado nesta pesquisa, ou seja, não restringir inicialmente a lista de variáveis sugeridas e, posteriormente, buscar apoio na literatura para selecionar as variáveis mais relevantes.

Embora um procedimento de seleção de variáveis passo a passo possa auxiliar os pesquisadores e tomadores de decisão a escolher o melhor modelo DEA, também se deve confiar na opinião e no conhecimento dos gestores das operações analisadas. (WAGNER; SHIMSHAK, 2007). Esses gestores são representados pelos especialistas do processo. Entende-se que a participação dos especialistas do processo, aliada à aplicação de um método de seleção de variáveis DEA, pode elevar o rigor da modelagem DEA na presente pesquisa.

Dessa forma, efetuou-se uma análise na literatura para identificar métodos de seleção de variáveis em DEA, com o objetivo de definir qual o método a ser aplicado. Os métodos de seleção de variáveis identificados estão sintetizados no Quadro 20:

Quadro 20: Métodos para seleção de variáveis em DEA

<b>Método</b>	<b>Autor(es)</b>
<i>PCA DEA - Principal component analysis</i>	UEDA; HOSHIAI, 1997, ADLER; GOLANY, 2001
<i>Bootstrapping for Variable Selection</i>	SIMAR; WILSON, 2001
<i>ECM - Efficiency contribution measure</i>	PASTOR; RUIZ; SIRVENT, 2002
<i>Recursive method</i>	FANCHON, 2003
<i>A Regression-based test</i>	RUGGIERO, 2005
<i>Selecting variables based on partial covariance</i>	JENKINS, ANDERSON, 2003
<i>Progressive or "STEPWISE" Selection Process</i>	WAGNER, SHIMSHAK, 2007

Fonte: Elaborado pelo autor.

A verificação dos métodos apresentados no Quadro 20 aponta o uso de procedimentos estatísticos, considerando análises a partir de remoção ou inclusão de variáveis ou testes de correlação entre variáveis. No contexto desta pesquisa, optou-se por utilizar o método desenvolvido por Wagner e Shimshak (2007), o qual sugere procedimentos simples e eficazes, considerados de fácil entendimento e aplicabilidade por parte de pesquisadores e gestores. Se o método para seleção de variáveis relevantes em DEA for complexo, existe tendência de haver rejeição por parte dos gestores da empresa analisada. (WAGNER; SHIMSHAK, 2007).

Wagner e Shimshak (2007) desenvolveram um método para um processo de seleção progressiva de variáveis, o qual denominam de *Stepwise*. No método *Stepwise* é considerada a variação média da eficiência conforme variáveis são retiradas ou adicionadas no modelo. Esse método se destina a auxiliar o refinamento de modelos DEA, de modo que sejam consideradas somente variáveis que impactarão a eficiência do modelo em utilização. Conforme Wagner e Shimshak (2007), esse método é de simples entendimento para os gestores e não necessita de extensos cálculos adicionais. Para aplicação nesta pesquisa, optou-se pela abordagem que considera a análise na medida em que as variáveis são retiradas do modelo.

De acordo com Wagner e Shimshak (2007), na abordagem que contempla a retirada de variáveis inicia-se considerando todas as variáveis de entrada e saída elencadas no modelo DEA. Posteriormente, a cada passo uma variável é retirada do modelo por meio da análise de escores de eficiência das DMU's. Os passos sugeridos pelos autores (WAGNER; SHIMSHAK, 2007) são os seguintes:

**Passo 1:** Executar a análise DEA contemplando o modelo originalmente definido, ou seja, considerando todas as entradas e saídas (representado por  $E^*0$ );

**Passo 2:** Registrar os escores de eficiência de cada DMU da análise executada;

**Passo 3:** Efetuar o cálculo da média aritmética dos escores das eficiências das DMU's analisadas (representado por  $Ex^*0$ );

**Passo 4:** Executar a análise DEA retirando uma variável de cada vez do modelo (por exemplo, retirar a variável 1 e executar a análise DEA, posteriormente colocar a variável 1 de volta no modelo e retirar a variável 2, executando novamente a análise DEA. Repetir o processo sucessivamente até contemplar todas as variáveis (representado por  $E^*1, E^*2, \dots, E_n$ );

**Passo 5:** Registrar os escores de eficiência de cada DMU para cada análise executada, contemplando a retirada de cada variável;

**Passo 6:** Efetuar o cálculo da média aritmética dos escores das eficiências das DMU's analisadas, na qual foi contemplada a retirada de 1 variável (representado por  $Ex^*1, Ex^*2, \dots, Ex_n$ );

**Passo 7:** Calcular a diferença entre a eficiência média resultante da análise contemplando o modelo original (com todas as variáveis) e as análises executadas

no passo 3 (retirando uma variável de cada vez), ou seja,  $Ex^0 - Ex^1$ ,  $Ex^0 - Ex^2, \dots$ ,  $Ex^0 - Ex^n$ .

Após efetuar os cálculos, deve-se verificar qual(is) análise(s) ( $Ex^0 - Ex^1$ ,  $Ex^0 - Ex^2, \dots$ ,  $Ex^0 - Ex^n$ ) contempla a menor variação entre as médias das eficiências. Nesse sentido, entende-se que as variáveis que apresentaram menor variação, ou, variação igual a 0, não estão contribuindo significativamente para a eficiência e podem ser excluídas do modelo. Após a exclusão das variáveis que não impactam o modelo, o pesquisador deve retornar ao Passo 1 do procedimento e reiniciar o *Stepwise*. Essa análise de *Stepwise* em que variáveis podem ser excluídas pode ser executada até que o modelo apresente uma única entrada e uma única saída. (WAGNER; SHIMSHAK, 2007).

A aplicação do método foi exemplificada por Wagner e Shimshak (2007) em análises de eficiências aplicadas em uma rede hoteleira, em bibliotecas da cidade de Tóquio e em departamentos acadêmicos de uma universidade. Nessas análises, pode-se observar que existiam variáveis que apresentavam variação de eficiência igual a 0 (exemplo,  $Ex^0 - Ex^1 = 0$ ). Nesses casos, conforme Wagner e Shimshak (2007), as variáveis testadas podem ser retiradas do modelo sem afetar um único score de eficiência, uma vez que não estão apresentando efeitos sobre a eficiência final do modelo DEA que foi desenvolvido. No âmbito deste trabalho, propõe-se utilizar o método *Stepwise* para executar o refinamento do modelo DEA, de modo a identificar variáveis que, após serem retiradas dos modelos, apresentem variação igual a zero na eficiência, não contribuindo como o modelo DEA proposto.

Nas próximas seções, são apresentados os resultados obtidos após a aplicação do método *Stepwise* na Engenharia de Produtos (seção 3.5.1) e no Processo produtivo (seção 3.5.2).

### **3.5.1 Aplicação do Stepwise no modelo DEA da Engenharia de Produtos**

O método *Stepwise* utilizado na Engenharia de Produtos foi aplicado no projeto modularizado e no projeto não modularizado, conforme orientações de Wagner e Shimshak (2007). Destaca-se que ao executar uma análise DEA, quatro



tipos de eficiência são calculados pela técnica: i) eficiência padrão; ii) eficiência invertida; iii) eficiência composta; e iv) eficiência composta\*. Para execução desse *Stepwise* e para as demais análises foram utilizados os escores da eficiência composta. A Tabela 6 apresenta os resultados da aplicação dos *Stepwise* no modelo do projeto modularizado da Engenharia de Produtos:

Tabela 6: Stepwise projeto modularizado

Representação (E*)	Descrição da variável	Média Eficiências (EX*)	Var. média Eficiências (EX*0-EX*n)
E*0 Projeto modularizado	Modelo original (todas as variáveis)	0,6138	-
E*1 Retira <i>input1 ij</i>	<i>Lead time</i> comercial (negociação)	0,6691	-0,0553
E*2 Retira <i>input2 ij</i>	<i>Lead time</i> engenharia (especificação do pedido)	0,6563	-0,0425
E*3 Retira <i>input3 ij</i>	<i>Lead time</i> engenharia (configuração do produto)	0,6888	-0,0750
E*4 Retira <i>input4 ij</i>	<i>Part numbers</i>	0,6694	-0,0556
E*5 Retira <i>input5 ij</i>	Itens comprados	0,6961	-0,0824
E*6 Retira <i>input6 ij</i>	Itens produzidos	0,6691	-0,0553
E*7 Retira <i>input7 j</i>	Pessoas Engenharia de Produtos	0,6694	-0,0556
E*8 Retira <i>input8 j</i>	Problemas técnicos reportados	0,6723	-0,0586
E*9 Retira <i>input9 j</i>	Produtos reclamados pelos clientes	0,6681	-0,0543
E*10 Retira <i>input10 j</i>	Itens reclamados pelos clientes	0,6733	-0,0595

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 6, está ilustrada a aplicação do *Stepwise* proposto por Wagner e Shimshak (2007). Inicialmente, executou-se o cálculo DEA, contemplando o modelo original com todas as variáveis de entrada e saída definidas. Posteriormente, retirou-se cada variável e executou-se o cálculo do modelo novamente. Ao analisar a diferença dos resultados da eficiência média do modelo original, subtraída a média obtida com a exclusão de cada variável, percebe-se que nenhum resultado foi igual a 0, ou seja, todas as variáveis estabelecem impacto sobre os escores de eficiência do modelo proposto. Desta forma, de acordo com critério definido nesta pesquisa de que somente seriam excluídas do modelo variáveis que não impactam a eficiência (variação média igual a 0), definiu-se que no modelo do projeto modularizado da Engenharia de Produtos não seriam excluídas variáveis. Assim, o modelo permaneceu conforme estabelecido originalmente.

Posteriormente, efetuou-se o mesmo cálculo explicado no modelo DEA para o modelo do projeto não modularizado da Engenharia de Produtos. Os resultados estão sintetizado na Tabela 7:

Tabela 7: Stepwise projeto não modularizado

Representação (E*)	Descrição da variável	Média Eficiências (EX*)	Var. média Eficiências (EX*0-EX*n)
E*0 Projeto não modularizado	Modelo original (todas as variáveis)	0,5115	-
E*1 Retira <i>input1 ij</i>	<i>Lead time</i> comercial (negociação)	0,4728	0,0387
E*2 Retira <i>input2 ij</i>	<i>Lead time</i> engenharia (especificação do pedido)	0,4808	0,0307
E*3 Retira <i>input3 ij</i>	<i>Lead time</i> engenharia (configuração do produto)	0,4818	0,0297
E*4 Retira <i>input4 ij</i>	<i>Part numbers</i>	0,4807	0,0308
E*5 Retira <i>input5 ij</i>	Itens comprados	0,4724	0,0391
E*6 Retira <i>input6 ij</i>	Itens produzidos	0,4808	0,0307
E*7 Retira <i>input7 j</i>	Pessoas Engenharia de Produtos	0,4808	0,0307
E*8 Retira <i>input8 j</i>	Problemas técnicos reportados	0,5650	0,0535
E*9 Retira <i>input9 j</i>	Produtos reclamados pelos clientes	0,4838	0,0277
E*10 Retira <i>input10 j</i>	Itens reclamados pelos clientes	0,4758	0,0357

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da Tabela 7 também evidencia que todas as variáveis definidas impactam a eficiência, portanto não foi excluída nenhuma variável da análise do modelo referente ao projeto não modularizado da Engenharia de Produtos. Dessa forma, definiu-se que o modelo DEA desenvolvido para a execução da análise na Engenharia de Produtos não passaria por nenhuma alteração. Na próxima seção, apresenta-se a aplicação do método *Stepwise* no modelo referente ao Processo Produtivo.

### 3.5.2 Aplicação do Stepwise no modelo DEA do Processo Produtivo

Para a análise do *Stepwise* do Processo Produtivo, efetuou-se o mesmo procedimento já realizado para a Engenharia de Produtos, ou seja, aplicou-se o método no modelo do produto modularizado e no modelo do produto não modularizado. A Tabela 8 apresenta o resultado da aplicação de *Stepwise* no modelo do produto modularizado do Processo Produtivo:

Tabela 8: Stepwise produto modularizado

Representação (E*)	Descrição da variável	Média Eficiências (EX*)	Var. média Eficiências (EX*0-EX*n)
<i>E*0 Produto modularizado</i>	Modelo original (todas as variáveis)	0,4988	-
<b>E*1 Retira <i>input1 ij</i></b>	<b>Aço</b>	<b>0,4988</b>	<b>0,0000</b>
E*2 Retira <i>input2 ij</i>	Alumínio	0,5047	-0,0059
E*3 Retira <i>input3 ij</i>	Fibra	0,4975	0,0013
E*4 Retira <i>input4 ij</i>	Passadeira	0,4980	0,0008
E*5 Retira <i>input5 ij</i>	Tecido	0,4991	-0,0003
E*6 Retira <i>input6 ij</i>	Vidros	0,5048	-0,0060
E*7 Retira <i>input7 ij</i>	<i>Lead time</i> Fabricação	0,4993	-0,0005
E*8 Retira <i>input8 ij</i>	<i>Lead time</i> Montagem	0,4985	0,0003
<b>E*9 Retira <i>input9 ij</i></b>	<b>Part numbers</b>	<b>0,4988</b>	<b>0,0000</b>
E*10 Retira <i>input10 ij</i>	Itens comprados	0,4988	-0,0001
E*11 Retira <i>input11 ij</i>	Itens produzidos	0,4991	-0,0003
E*12 Retira <i>input12 j</i>	Pessoas produção	0,4987	0,0001
E*13 Retira <i>input13 j</i>	Problemas técnicos reportados	0,5015	-0,0027
E*14 Retira <i>input14 j</i>	Produtos reclamados pelos clientes	0,4986	0,0002
<b>E*15 Retira <i>input15 j</i></b>	<b>Itens reclamados pelos clientes</b>	<b>0,4988</b>	<b>0,0000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a diferença entre os resultados da eficiência média do modelo original e da média obtida com a exclusão de cada variável, percebe-se que três variáveis apresentaram variação igual a 0, de modo que estas podem ser retiradas do modelo, pois não impactam os escores de eficiência do modelo DEA desenvolvido. Tais variáveis são: i) aço; ii) *part numbers*; e iii) itens reclamados pelos clientes. Conforme critério definido nesta pesquisa, essas variáveis foram excluídas do modelo.

Em uma análise inicial, a exclusão da variável aço não era esperada, visto que o aço é considerado a principal matéria-prima utilizada na fabricação do ônibus (representando 28% do custo total de matéria-prima do ônibus). No entanto, após discussão com os especialistas do processo, compreendeu-se que em nenhum momento a modularização do projeto e do produto buscou contemplar a redução ou o aumento do aço utilizado na confecção do produto. Os especialistas do processo apontaram que nos anos de 2007 e 2008 (período não considerado neste estudo) a empresa efetuou estudos e implementou ações para reduzir a quantidade de aço utilizado na fabricação dos ônibus. Isso aconteceu porque no período mencionado (2007 e 2008) o veículo da empresa estudada era considerado o mais pesado dentre os concorrentes do mercado. Dessa forma, compreendeu-se que a redução efetuada antes do período proposto para análise vem sendo praticada até os dias atuais. Nesse sentido, os especialistas do

processo concordaram que o volume de aço utilizado na fabricação dos veículos não apresentou variação ao longo do período analisado e que a variável aço poderia ser excluída da análise.

A redução de *part numbers* proporciona a diminuição da complexidade do processo e é um dos benefícios da modularização citados na literatura. No entanto, os especialistas do processo alertaram que as estruturas dos produtos passaram a ser mais detalhadas ao longo do tempo. Esse detalhamento aumentou a descrição do número de itens da estrutura do produto e a criação de códigos novos (os códigos foram utilizados para definir o que é compartilhado ou não). Este procedimento pode ter mitigado os efeitos percebidos com a redução dos *part numbers* não compartilhados, que foi proporcionada pela modularização.

Quanto à exclusão da variável relativa aos itens reclamados pelos clientes, entende-se que essa situação não prejudica o modelo, visto que a variável produtos reclamados pelos clientes permanece no estudo e pode representar a dimensão de qualidade do modelo DEA. Essa decisão foi corroborada pelos especialistas do processo.

Após a exclusão de variáveis cuja variação não influencia a eficiência, efetuou-se novamente o procedimento sugerido por Wagner e Shimshak (2007). Tais autores propõem que o *Stepwise* seja rodado até restar somente uma variável de entrada. Essa variável é a que está exercendo maior influência na eficiência do modelo. A variável com maior influência na eficiência do modelo DEA do Processo Produtivo foi a quantidade de alumínio utilizado na confecção dos veículos. Conforme os especialistas do processo, essa informação faz sentido, pois o alumínio usado provém de chapas que são recortadas, e esse procedimento proporciona as maiores perdas de matéria-prima dentre os materiais utilizados na fabricação. A detecção do alumínio como variável de maior impacto na eficiência do Processo Produtivo foi considerada uma informação relevante pelos especialistas e pode auxiliar os gestores no entendimento em relação a variáveis que servem para alavancar o desempenho do Processo Produtivo.

Posteriormente, foi executado o mesmo cálculo explicado no modelo DEA referente ao modelo não modularizado do Processo Produtivo, e os resultados estão sintetizado na Tabela 9:

Tabela 9: Stepwise produto não modularizado

Representação (E*)	Descrição da variável	Média Eficiências (EX*)	Var. média Eficiências (EX*0–EX*n)
E*0 Produto modularizado	Modelo original (todas as variáveis)	0,5022	-
<b>E*1 Retira input1 ij</b>	<b>Aço</b>	<b>0,5022</b>	<b>0,0000</b>
E*2 Retira input2 ij	Alumínio	0,5027	-0,0005
E*3 Retira input3 ij	Fibra	0,5017	0,0005
E*4 Retira input4 ij	Passadeira	0,5024	-0,0003
E*5 Retira input5 ij	Tecido	0,5020	0,0002
E*6 Retira input6 ij	Vidros	0,5023	-0,0001
E*7 Retira input7 ij	Lead time Fabricação	0,5026	-0,0004
E*8 Retira input8 ij	Lead time Montagem	0,5037	-0,0015
<b>E*9 Retira input9 ij</b>	<b>Part numbers</b>	<b>0,5022</b>	<b>0,0000</b>
E*10 Retira input10 ij	Itens comprados	0,5018	0,0003
E*11 Retira input11 ij	Itens produzidos	0,5021	0,0001
<b>E*12 Retira input12 j</b>	<b>Pessoas produção</b>	<b>0,5022</b>	<b>0,0000</b>
E*13 Retira input13 j	Problemas técnicos reportados	0,5020	0,0001
E*14 Retira input14 j	Produtos reclamados pelos clientes	0,5021	0,0001
<b>E*15 Retira input15 j</b>	<b>Itens reclamados pelos clientes</b>	<b>0,5022</b>	<b>0,0000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

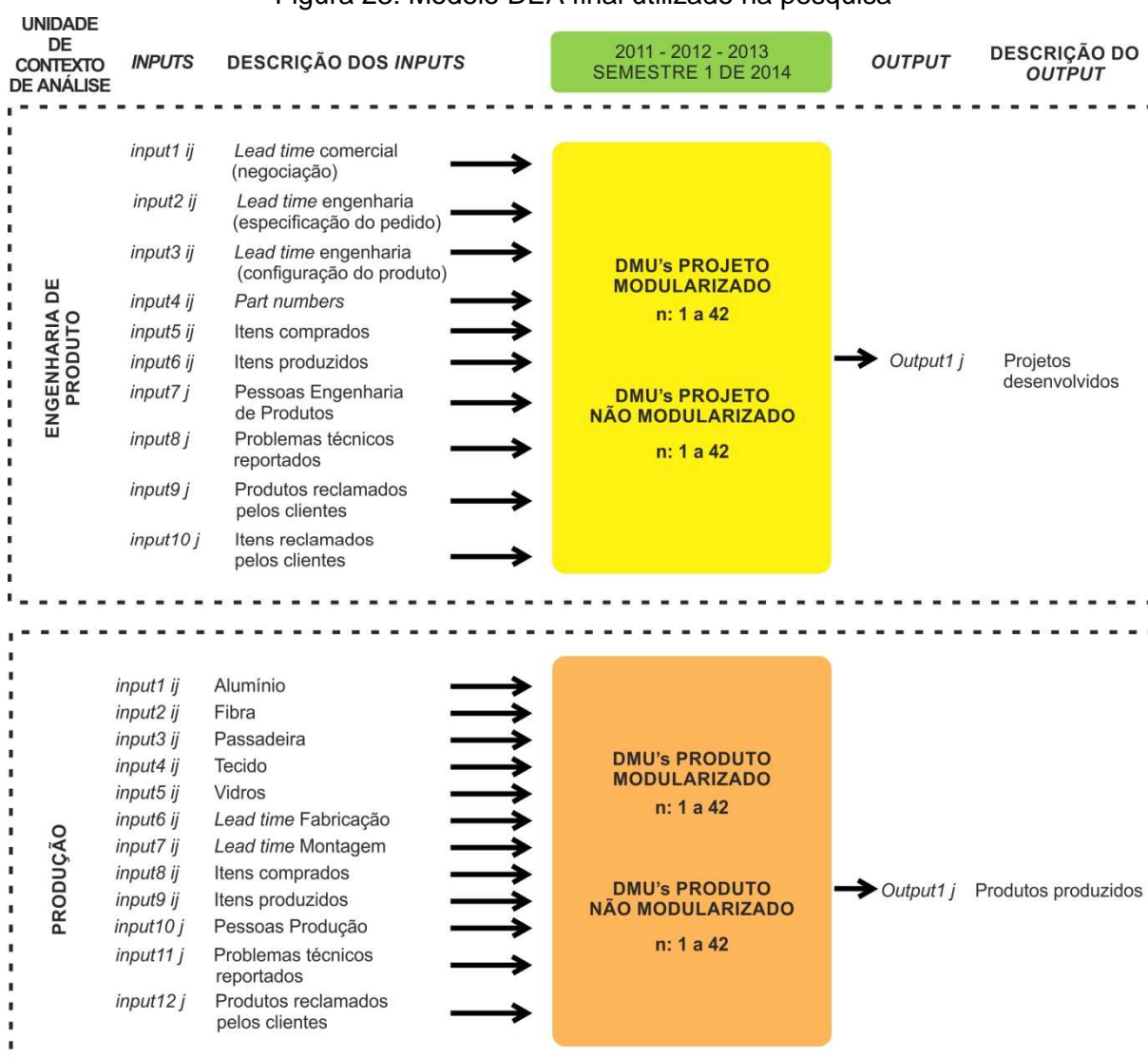
Após a execução dos procedimentos referentes ao *Stepwise* do produto não modularizado no Processo Produtivo, percebeu-se que o método sugeriu a exclusão de quatro variáveis, que são: i) aço; ii) *part numbers*; iii) pessoas produção; e iv) itens reclamados pelos clientes. Conforme observado, a exclusão de três dessas variáveis (aço, *part numbers* e itens reclamados pelos clientes) também foi sugerida na análise anterior referente ao produto modularizado. A variável relativa a pessoas na produção não foi excluída do modelo do produto modularizado, contudo, o método *Stepwise* sugeriu que ela fosse eliminada do modelo do produto não modularizado.

Conforme Dyson et al. (2001), um dos principais pressupostos para aplicação da análise envoltória de dados (DEA) é que o conjunto de variáveis definido deve ser comum a todas as unidades de análise. Dessa forma, optou-se por não excluir essa variável (pessoas na produção) da presente pesquisa. Um ponto relevante para a manutenção da variável no modelo é que ela foi considerada relevante na análise *Stepwise* efetuada para o produto modularizado. Entende-se que a análise da eficiência do produto modularizado é o principal foco deste trabalho e que a verificação do produto não modularizado serve para comprovar os efeitos da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo. Dessa forma, a manutenção da variável não prejudica a presente pesquisa, visto que o modelo não

modularizado pode cumprir o seu papel confirmatório (variável de controle). Essa decisão foi discutida e corroborada pelos especialistas do processo.

Outro aspecto relevante é que foram efetuados testes com a exclusão da variável “pessoas na produção” em ambos os modelos (produto modularizado e não modularizado), e verificou-se que tal eliminação não alterou os resultados finais que são apresentados nesta dissertação. Dessa forma, após serem excluídas do modelo do processo produtivo as variáveis *aço*, *part numbers* e itens reclamados pelos clientes, é possível apresentar o modelo refinado DEA que é utilizado no presente estudo (Figura 23):

Figura 23: Modelo DEA final utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Destaca-se que os modelos finais, tanto da Engenharia de Produtos quanto do Processo Produtivo, respeitam a condição indicada na literatura de que o número de DMU's deve ser no mínimo 3 vezes maior do que o número de *inputs* e *outputs* somados. (BANKER et al., 1989; COOK; TONE; ZHU, 2014). O *Stepwise* foi utilizado com o objetivo de determinar as variáveis que melhor representam o sistema analisado, visto que os resultados da análise envoltória de dados (DEA) dependem do conjunto de variáveis empregado. (WAGNER; SHIMSHAK, 2007). Na próxima seção, são apresentados os aspectos relativos à análise de dados desta dissertação.

### 3.6 ANÁLISE DE DADOS

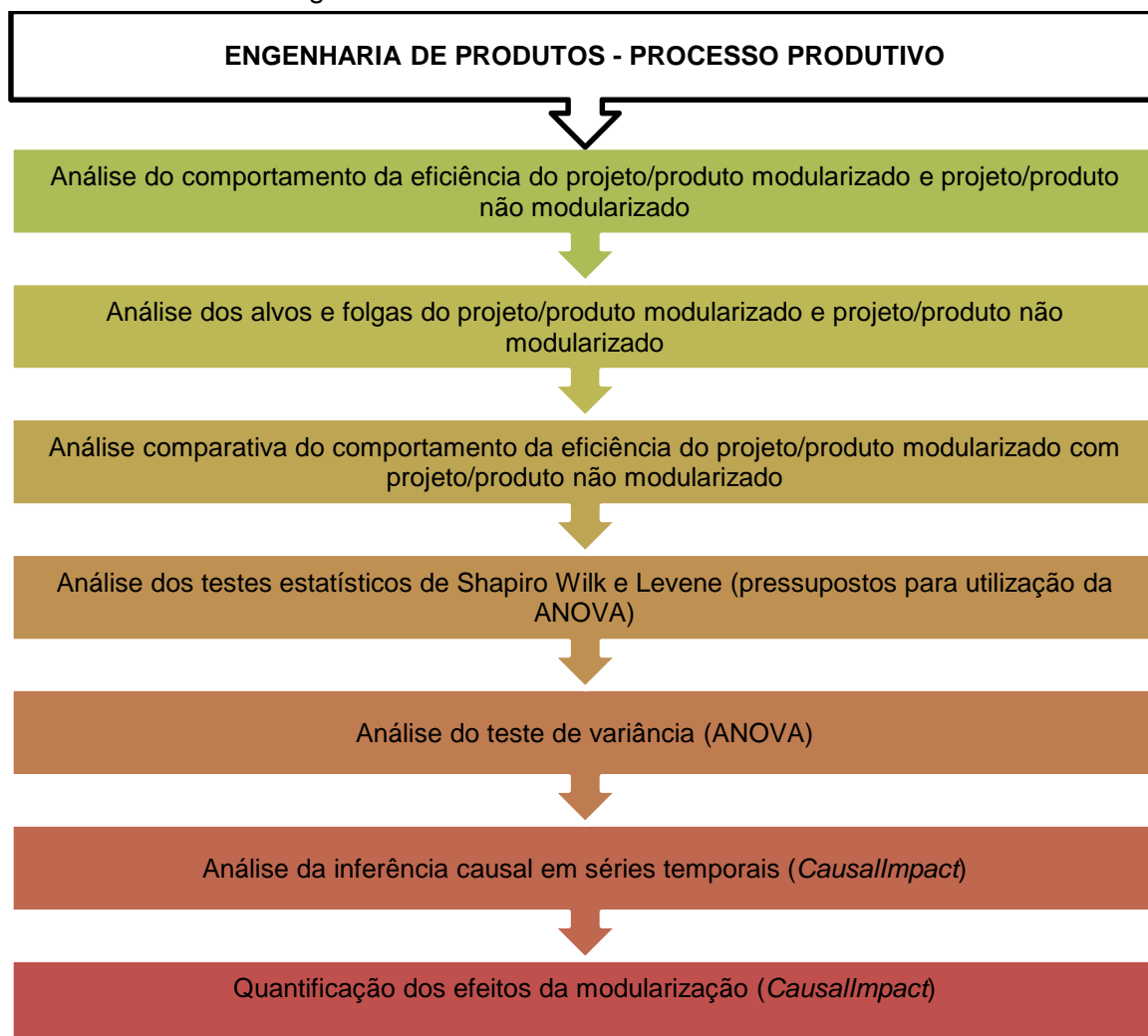
Na base da construção da teoria está a análise de dados. (EISENHARDT, 1989; DUBÉ; PARÉ, 2003). Um dos maiores desafios da análise de dados é que o pesquisador precisa demonstrar objetivamente o processo pelo qual os dados e notas de campo foram desenvolvidos em conclusões. (BARRAT; CHOI; LI, 2011). Barrat, Choi e Li (2011) também destacam que é importante que a análise de dados ocorra paralelamente à coleta dos dados, pois, dessa forma, é mais fácil para os pesquisadores entenderem a realidade que os dados estão apresentando.

A análise de dados consiste em examinar, categorizar, classificar em tabelas, testar, ou recombina as evidências quantitativas e qualitativas para tratar as proposições iniciais de um estudo. (YIN, 2005). Nesse sentido, após o levantamento dos dados, iniciou-se o processo de avaliação. Os dados obtidos foram organizados em planilha eletrônica e posteriormente inseridos no aplicativo SIAD v 3.0 para cálculo de desempenho de cada DMU. O SIAD v 3.0 é um *software* desenvolvido por pesquisadores brasileiros da Universidade Federal Fluminense (UFF).

Os resultados do SIAD v 3.0 retornam a eficiência padrão, eficiência invertida, eficiência composta e eficiência composta\*. Na análise de dados foram considerados os resultados obtidos a partir da eficiência composta. A eficiência composta foi desenvolvida por Yamada, Matui e Sugiyama (1994) e é definida como a média aritmética entre a eficiência em relação à fronteira DEA padrão e o complemento da eficiência em relação à fronteira invertida. (BARRETO; MELLO, 2012). Com as

informações de eficiência obtidas com o cálculo efetuado pelo SIAD v3, iniciou-se o processo de análise dos dados. A Figura 24 ilustra os procedimentos realizados.

Figura 24: Procedimentos de análise de dados



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Inicialmente, foi efetuado avaliação na Engenharia de Produtos, contemplando a eficiência técnica referente ao projeto modularizado e ao não modularizado. Essa análise permitiu verificar o comportamento da eficiência dos projetos ao longo do tempo, com os escores de eficiência segregados em períodos pré e pós-modularização. Também foram realizadas avaliações no que tange aos alvos e folgas de cada projeto (modularizado e não modularizado). Essa análise é importante, pois pode mostrar a amplitude das diferenças entre a real utilização dos recursos das DMU's e o que pode ser utilizado/economizado de recursos nas DMU's. (FERREIRA; GOMES, 2009). Nesse sentido, entende-se que a partir do



*benchmarking* interno efetuado pelo modelo DEA podem-se obter informações pertinentes para estabelecer metas de melhoria quanto à utilização dos recursos na empresa. Para finalizar as análises de eficiência calculadas em DEA, efetuou-se uma avaliação comparativa entre os comportamentos da eficiência dos projetos modularizado e não modularizado.

Posteriormente, iniciou-se o processo de análises estatísticas, no qual se efetuou o teste de Shapiro Wilk e Levene (considerados pressupostos para utilização da ANOVA) para verificar se os dados relativos à série de eficiência obtida nos cálculos eram provenientes de uma distribuição normal e homogêneos. (HAIR et al., 2005). A análise da variância (ANOVA) foi executada para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias dos grupos de eficiência relativas aos dois períodos propostos (anterior e posterior à modularização). Os parâmetros para aplicação dos testes estatísticos estão ilustrados no Quadro 21. Para análise estatística foi utilizado o *software* SPSS.

Quadro 21: Síntese das análises estatísticas efetuadas

<b>Análise</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Condições</b>	<b>Parâmetros de aceitabilidade</b>
Shapiro Wilk	Avaliar se os dados referentes aos escores da eficiência composta são provenientes de uma distribuição normal	<b>H0:</b> Os dados são normais <b>H1:</b> Os dados não são normais	<i>Sign.</i> $\geq 0,05$
Levene	Avaliar se os dados referentes aos escores de eficiência composta são homogêneos	<b>H0:</b> Os dados são homogêneos <b>H1:</b> Os dados não são homogêneos	<i>Sign.</i> $\geq 0,05$
Anova	Avaliar se existe diferença significativa entre as médias dos grupos de eficiência composta relativas aos períodos anterior e posterior à modularização	<b>H0:</b> Não existem diferenças significativas entre as médias dos grupos de eficiência composta <b>H1:</b> Existem diferenças significativas entre as médias dos grupos de eficiência composta	<i>p-value</i> $\leq 0,05$

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Hair et al., (2005)

Destaca-se que o teste de Shapiro Wilk e Levene serve para viabilizar ou não a utilização da ANOVA. No caso do teste ANOVA, este serve para testar a hipótese principal deste trabalho, pois se não existem diferenças significativas entre as médias dos grupos de eficiência dos períodos anterior e posterior à modularização, também não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica das unidades de análise (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo). No entanto, se existem diferenças significativas entre as médias dos grupos de

eficiência dos períodos anterior e posterior à modularização, pode-se afirmar que existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica das unidades de análise (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo).

Após essas análises, procurou-se verificar e quantificar os efeitos percebidos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos, por meio da técnica *CausalImpact*. Esse procedimento, recomendado por Brodersen et al. (2014), permitiu avaliar se houve efeito causal da modularização e qual a amplitude desse efeito. Para quantificar os efeitos da modularização foi utilizado o *software R*.

No Processo Produtivo, foram executados os mesmos procedimentos. Primeiramente, efetuou-se a análise do comportamento da eficiência técnica do produto modularizado e do não modularizado, além das análises estatísticas e da quantificação dos efeitos da modularização. Destaca-se que após analisar os resultados, realizou-se uma apresentação aos especialistas do processo que apoiaram o desenvolvimento da presente pesquisa. Essa discussão dos resultados com os especialistas é recomendada pela literatura (SENRA et al., 2007, WAGNER; SHIMSHAK, 2007) e foi identificada em trabalhos desenvolvidos com a utilização da análise envoltória de dados. (JAIN; TRIANTIS; LIU, 2011; VON GILSA, 2012; SOUZA, 2014; PARK; LEE; ZHU, 2014). Na próxima seção, são descritas as delimitações do trabalho.

### 3.7 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Devido à complexidade da realidade, qualquer estudo possui delimitações (DAFT; LEWIN, 2008). Quanto às abordagens da modularização, neste trabalho são analisados os efeitos da modularização de produto na Engenharia de Produto e no Processo Produtivo, ou seja, a modularidade de projeto e a modularidade de produção. Não são, portanto, efetuadas análises quanto às demais perspectivas, que contemplam: modularidade de uso, modularidade organizacional, modularidade em serviços e modularidade ambiental. A extensão da análise a demais abordagens (modularidade de uso, modularidade organizacional, modularidade em serviços e modularidade ambiental) não é possível, pois tais dimensões da modularização não foram implementadas pela organização estudada. Ademais, para serem

contempladas todas as abordagens relativas à estratégia de modularização, o escopo da pesquisa precisaria ser ampliado.

A análise da eficiência é efetuada na matriz da empresa na qual se desenvolve o estudo. A organização está localizada no estado do Rio Grande do Sul. Não é objetivo deste trabalho desenvolver ou replicar resultados para a outra unidade produtiva da empresa, localizada no estado de São Paulo. Na unidade de produção localizada em São Paulo, a empresa utiliza o arranjo produtivo conhecido como consórcio modular. No entanto, a extensão das análises para essa unidade de produção não foi possível, pois o produto analisado nesta dissertação não é fabricado na unidade de São Paulo. Destaca-se que o pesquisador visitou a unidade de produção de São Paulo e pôde observar as diferenças do processo produtivo da matriz e da filial. Descrever e analisar essas diferenças, no entanto, está fora do escopo deste trabalho.

Outra delimitação deste estudo é o foco de análise somente na eficiência técnica da organização. Não é objetivo deste trabalho efetuar análises referente à eficiência alocativa (eficiência em custos) da empresa. A análise da eficiência não é realizada para todos os produtos produzidos no período avaliado. O estudo está focado em duas linhas de produtos, sendo uma delas modularizada e a outra não modularizada, no período delimitado para análise. Nesse sentido, muitos produtos não são contemplados no estudo. No próximo capítulo, é apresentada a empresa analisada.

#### 4 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ANALISADA

A presente pesquisa é realizada em uma empresa fabricante de carrocerias de ônibus. Fundada em 1986, a organização possui duas unidades de fabricação, uma localizada na cidade de Erechim, no estado do Rio Grande do Sul, e outra na cidade de Lorena, no estado de São Paulo. No município de Erechim está localizada a matriz da empresa. É nessa unidade (matriz) que se desenvolve a presente pesquisa. A matriz conta com aproximadamente 2.400 colaboradores e produz, em média, de 10 ônibus/dia. Em Lorena está localizada a filial da empresa, que conta com aproximadamente 500 colaboradores e produz, em média, 5 ônibus/dia.

A empresa possui quatro linhas de produtos: Rodoviário, Intermunicipal, Urbano e Micro. A linha de veículos Rodoviários é projetada para atender as necessidades de transporte de passageiros preferencialmente em grandes distâncias ou em rodovias. A fabricação desses produtos requer maior investimento em itens de conforto e segurança. A linha de veículos Intermunicipal é projetada para viagens de média distância e a linha de Urbanos é projetada para viagens de pequena e média distância, ou seja, para utilização dentro das cidades. A linha de veículos Micros é projetada para atender a necessidade de transporte de passageiros que precisam de agilidade, atendendo menores demandas de passageiros.

O principal mercado de atuação da empresa é o nacional, no entanto a organização também exporta para mais de 30 países. Para exemplificar, pode-se utilizar os dados referentes ao ano de 2013, no qual a empresa comercializou 3.326 unidades, sendo 2.710 unidades (81,48%) para o mercado brasileiro e 616 unidades (18,52%) para o mercado externo. No mercado brasileiro, a empresa ocupa a terceira posição entre os grupos econômicos fabricantes e a quarta posição entre os fabricantes gerais de veículos coletivos (FABUS). A organização possui um faturamento anual em torno de meio bilhão de reais. Os dados referentes ao faturamento da empresa nos últimos anos, bem como sua receita líquida estão expostos na Tabela 10:

Tabela 10: Faturamento anual e receita líquida da empresa estudada

Ano	Faturamento (R\$)	Deduções Impostos (R\$)	Receita líquida (R\$)
2013	603.572	85.918	517.654
2012	537.259	75.522	461.737
2011	549.727	86.899	462.828
2010	433.448	95.375	338.073
2009	371.445	82.342	289.103

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 10, observa-se a evolução do faturamento anual da empresa entre os anos de 2009, 2010 e 2011. No ano de 2012, o faturamento apresentou uma retração de 2,27% em relação ao ano anterior (2011). No entanto, em 2013, o valor faturado pela organização voltou a apresentar crescimento. Observando o período ilustrado, pode-se verificar um aumento de 62,49% no faturamento da organização entre os anos de 2009 e 2013. A próxima seção apresenta a caracterização dos produtos analisados.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ANALISADOS NA ENGENHARIA DE PRODUTOS E NO PROCESSO PRODUTIVO

O projeto/produto modularizado da linha Rodoviário que foi selecionado para análise na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo está ilustrado na Figura 25:

Figura 25: Projeto/produto modularizado investigado



Fonte: Empresa estudada.

Considerando que o projeto/produto modularizado é planejado para atender as necessidades de clientes em viagens de média e longa distância, possui características como: i) mais itens de segurança e conforto, que aumentam a possibilidade de variação nos produtos; ii) projeto e produção complexos; iii) alta customização para atender as necessidades do cliente, entre outras. O projeto/produto não modularizado da linha Micro que foi selecionado para análise na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo está ilustrado na Figura 26:

Figura 26: Produto não modularizado investigado



Fonte: Dados da pesquisa.

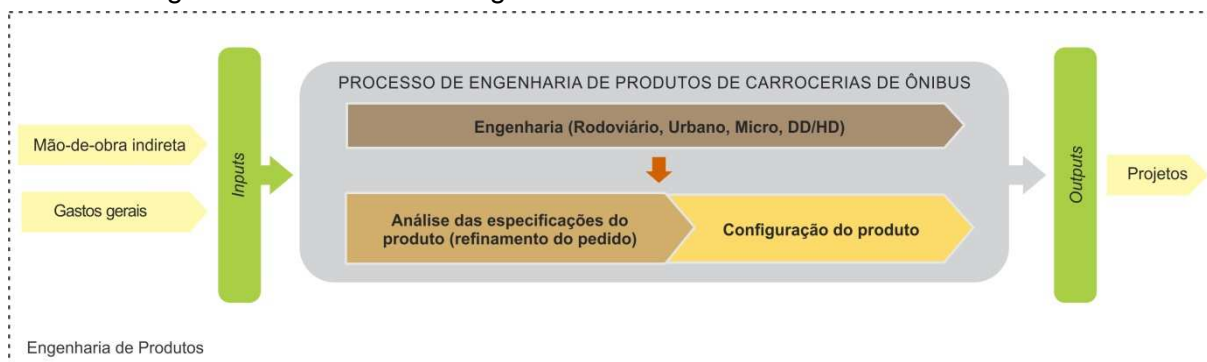
Conforme apontado pelos especialistas da empresa, apesar da diferença no porte, os produtos possuem características similares no que se refere a especificações de produto. Outro ponto determinante é que o produto Micro não modularizado é produzido na mesma linha de montagem do veículo modularizado. Na próxima seção, são caracterizados os processos analisados, a saber, Engenharia de Produtos e Processo Produtivo (seção 4.2).

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ENGENHARIA DE PRODUTOS E DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA

O processo de Engenharia de Produtos de carroceria de ônibus da empresa estudada é subdividido em equipes de trabalho, a saber: Engenharia para produtos da linha Rodoviário, linha Urbano, linha Micro e linha DD/HD. A Figura 27 ilustra o processo executado por cada equipe. Destaca-se que a linha Intermunicipal não

possui uma equipe de engenharia específica, sendo desenvolvida por uma das quatro equipes existentes (Rodoviário, Urbano, Micro, DD/HD).

Figura 27: Processo de Engenharia de Produtos de carroceria de ônibus



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por tratar-se de uma encarroçadora de ônibus, a empresa efetua o acoplamento dos seus modelos de carrocerias nos chassis adquiridos pelos clientes. Dessa forma, a Engenharia de Produtos necessita da definição de qual será o fornecedor do chassi da carroceria a ser produzida, juntamente com as devidas especificações exigidas pelo cliente. A especificação detalhada de cada pedido é discutida com a área Comercial da empresa. Nessa ocasião, todos os aspectos relativos ao projeto são analisados e o pedido é refinado de tal forma que possa ser desenvolvido pelos engenheiros da empresa. A segunda etapa é a configuração do produto, quando são considerados todos os aspectos técnicos para a elaboração final do projeto. Os processos da Engenharia de Produtos relativos às análises das especificações dos pedidos e à configuração do produto são analisados nesta pesquisa.

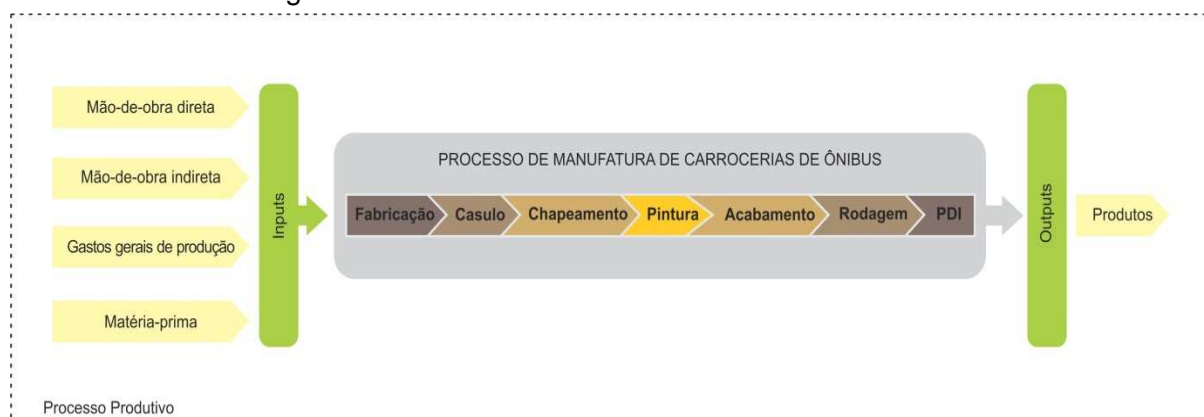
A Engenharia de Produtos é suportada por outras áreas que compõem o Desenvolvimento de Produtos. Essas áreas são: Engenharia Corporativa, *Design*, Elementos Finitos, Normas de Pesquisa e Desenvolvimento de materiais (P&D). Destaca-se que tais áreas de apoio não são analisadas nesta dissertação, no entanto, é efetuada uma breve descrição dos procedimentos executados para melhor compreensão dos processos.

A Engenharia Corporativa e a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais exercem função de suporte para as demais equipes de trabalho. Nesse sentido, a Engenharia Corporativa foca em manter o ambiente tecnológico (por

exemplo, *softwares* e parte conceitual) e o funcionamento das ferramentas que apoiam o desenvolvimento e aprimoramento dos produtos e dos processos. No que se refere ao grupo de trabalho P&D - Materiais, este é responsável pelas pesquisas e pela busca de alternativas de novos materiais e processos com o objetivo de propor soluções que melhorem a competitividade da organização no que tange à qualidade e aos custos de insumos. O *Design* trata da parte estética externa e interna do ônibus, bem como de questões que envolvem o conforto dos ocupantes do veículo (motorista e passageiros). A equipe de Elementos Finitos desenvolve o arranjo estrutural do produto baseado ou não na modularização. A equipe de Normas estuda e analisa agentes externos (EPTC, CONTRAN, DNER, CONAMA, DENATRAN, entre outros) que restringem ou normatizam questões de segurança do produto. Essas restrições e normatizações precisam ser cumpridas para que o veículo esteja apto a operar.

No que se refere à Engenharia de Produtos, entende-se que com a implementação da modularização a empresa otimizou os processos executados. Antes da implementação da modularização cada pedido era analisado e modelado de forma exclusiva. Com a utilização de conceitos e técnicas de modularização, passou-se de um processo de modelagem para um processo de configuração no atendimento dos pedidos. Nesse sentido, alguns dos subsistemas do arranjo estrutural do ônibus tornaram-se independentes das variantes de chassi, ou seja, tornaram-se blocos construtivos e passaram a fazer parte da biblioteca padrão de projetos do produto. A Figura 28 ilustra as etapas do Processo Produtivo da empresa.

Figura 28: Processo Produtivo da carroceria de ônibus



Fonte: Elaborado pelo autor.



Na Fabricação, executam-se os processos de corte e dobra dos componentes da estrutura do ônibus que são, basicamente, tubos e chapas. Também existem alguns processos de montagens de módulos ou blocos construtivos do arranjo estrutural. No setor de Casulo, inicia-se o processo de montagem da carroceria do ônibus, na qual os componentes e módulos recebidos do setor de Fabricação são montados para formar o arranjo estrutural do veículo. No que se refere aos produtos modularizados, ao término da montagem dos módulos estes são transferidos para o gabarito de fechamento do casulo, onde cada módulo é fixado ao outro através de processo de soldagem. Após a finalização do processo de construção do casulo, este é enviado ao setor de Chapeamento, onde recebe os acabamentos externos nas partes frontal, traseira e lateral. Após a execução desses processos, o veículo é enviado para pintura.

No processo de Pintura, inicialmente a carroceria recebe uma camada de produto químico, que serve como proteção da parte inferior. Após a aplicação da proteção, é efetuada uma limpeza externa no veículo, que dessa forma, fica disponível para o processo de pintura da cor base. Após a finalização do processo de pintura da cor base inicia-se, então, o processo de pintura customizada de acordo com a escolha e necessidade de cada cliente (processo de pintura de faixas na parte externa). Após a finalização da pintura, o veículo é enviado ao setor de Acabamento.

No setor de Acabamento, a carroceria do ônibus recebe as janelas, as poltronas, os componentes de iluminação externa, os componentes de iluminação interna e os acabamentos internos. Após a finalização desse processo, o ônibus é enviado para efetuar testes de rodagem. No setor de Rodagem são realizados todos os testes para verificar a construção da carroceria antes da liberação final do produto. Por fim, no setor chamado de PDI (*Pre Delivery Inspection*), são conferidas as conformidades do acoplamento das carrocerias nos chassis fornecidos pelos clientes. As montadoras de chassis (como por exemplo MBB, Scania e MAN) dispõem de funcionários que trabalham no setor de PDI e que são responsáveis pela inspeção.

### 4.3 HISTÓRICO DA MODULARIZAÇÃO NA EMPRESA

A empresa iniciou os estudos para implementar a modularização no ano de 2007. Em 2008, foi desenvolvido o primeiro produto com a aplicação dos conceitos modulares. No ano de 2009, esse produto foi introduzido na Produção. Para melhor entendimento do processo de implementação da modularização na empresa, foi elaborada uma linha do tempo, conforme Figura 29:



Fonte: Elaborado pelo autor.

A decisão de implementar a modularização foi tomada no ano de 2007. Inicialmente, o objetivo da modularização era minimizar problemas ocasionados por paradas da linha de montagem por falta de peças. O plano era confeccionar módulos laterais do arranjo estrutural do veículo fora da linha de montagem final. Os problemas de parada na linha de montagem eram ocasionados devido ao uso do processo de produção denominado *stick building*, pelo qual a montagem da estrutura era efetuada em barras unitárias de aço, sendo montadas tubo a tubo (a empresa chama esse processo de montagem “palito por palito”). Nas indústrias de carrocerias de ônibus brasileiras o conceito construtivo predominante na montagem da estrutura da carroceria é o *stick building*. Segundo Mello, Bandeira e Farias Filho (2011), esse conceito de construção tubo a tubo foi empregado, por muito tempo, pela indústria naval. Essa forma de montagem, que ocorre em especial no arranjo estrutural da carroceria, faz com que cada carroceria construída seja única.

Após os estudos iniciais, a empresa desenvolveu o primeiro projeto modular no ano de 2008. O produto escolhido foi um veículo da linha Urbano, que era, no

período, e continua sendo atualmente, o produto com maior volume de vendas da organização. Esse veículo foi introduzido na produção no mês de maio de 2009. Conforme relatos dos especialistas da empresa, muitas dificuldades foram enfrentadas nas fases iniciais, tanto de projeto como de produção, no que se refere à introdução dos produtos modulares.

No ano de 2010, efetuou-se a modularização em um produto da linha Rodoviário. No mesmo ano, também se iniciou o processo de modularização dos interiores dos ônibus, sendo que até então a modularização era focada no arranjo estrutural. Nesse período, a organização buscou ampliar os objetivos da modularização, que inicialmente eram minimizar as paradas da linha de montagem. Dentre os novos objetivos, pode-se destacar o aumento da produtividade buscando otimizar a utilização dos recursos empregados no desenvolvimento e na fabricação do veículo.

Entendendo ter superado as dificuldades iniciais e também compreendido melhor os conceitos referentes à modularização, a empresa, a partir do ano de 2011, decidiu expandir gradualmente a implementação da modularização a todos os produtos. Primeiramente, estendeu a modularização à linha de produtos Urbanos e, posteriormente, em 2012 e 2013, à linha de produtos Rodoviários. Atualmente, somente a linha Micro não é modularizada.

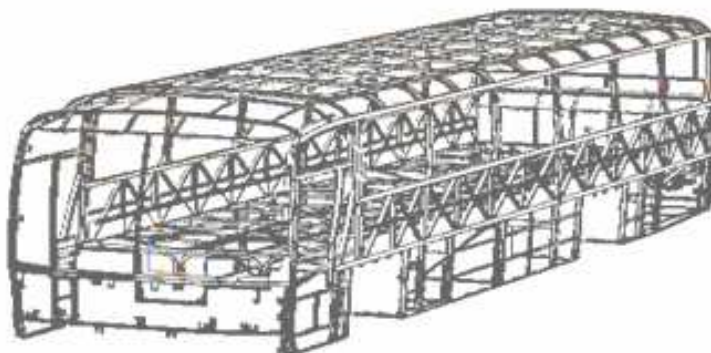
No ano de 2012 a empresa também desenvolveu uma plataforma de produtos padrão na linha Rodoviário, o que lhe permite efetuar o compartilhamento de componentes comuns nessa linha. No ano de 2013 a organização estendeu a modularização a todos os produtos da linha Rodoviário. Naquele mesmo ano (2013) foi modularizado o produto que está sendo analisado nesta dissertação. O projeto e a produção do veículo objeto de estudo foram introduzidos na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo entre os meses de setembro e outubro de 2013.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DA MODULARIZAÇÃO NA EMPRESA

Conforme Baldwin e Clark (1997), a essência da modularização é a construção de um produto segregado em subsistemas menores, que podem ser concebidos independentemente, mas que funcionam como um todo quando integrados. Nesse sentido, primeiramente a empresa construiu o arranjo estrutural

do ônibus (considerado sistema) dividido em módulos. A Figura 30 ilustra o projeto de um arranjo estrutural antes de seu acoplamento com o chassi.

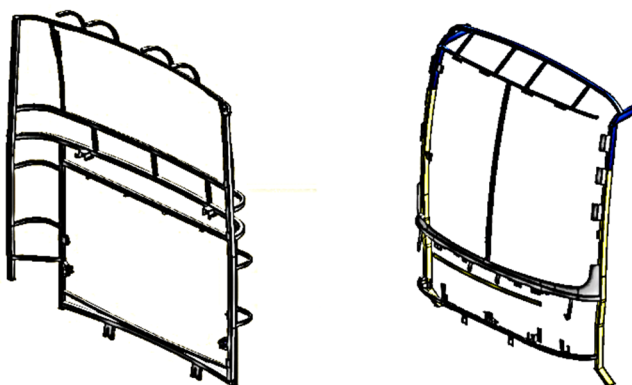
Figura 30: Arranjo estrutural de um projeto de ônibus



Fonte: Viero (2013, p. 19).

O arranjo estrutural de um ônibus é formado por sete componentes estruturais, que foram transformados em módulos. Essas estruturas são: parte frontal, parte traseira, lateral direita, lateral esquerda, base inferior, base superior e teto. (VIERO, 2013). No que se refere às estruturas das partes frontal e traseira, estas são formadas por tubos cortados e conformados, os quais são unidos por processo de soldagem. Na Figura 31 pode ser observado o projeto de uma estrutura traseira e de uma estrutura frontal de uma carroceria de ônibus.

Figura 31: Projeto da estrutura traseira e frontal de uma carroceria de ônibus

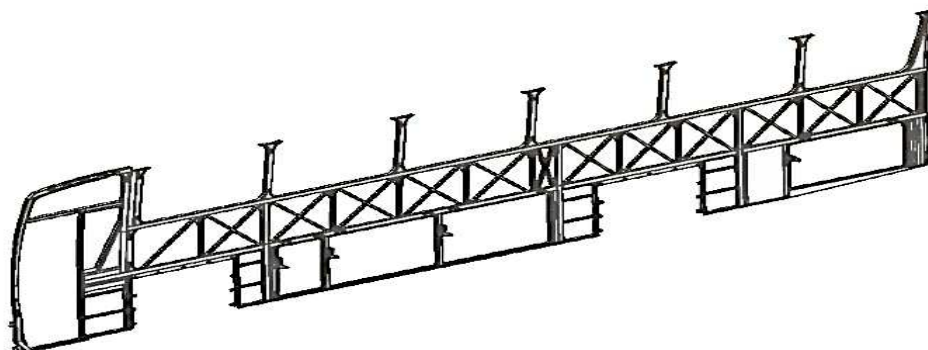


Fonte: Viero (2013, p. 19).

Quanto às estruturas laterais, estas são formadas por tubos retangulares e quadrados que são unidos por processo de soldagem. Nas laterais são fixadas as

chapas que compõem as paredes externas, janelas, portinholas dos bagageiros bem como toda a parte de acabamento interno do veículo. Além disso, elas servem para sustentar toda a estrutura do teto e da carroceria. Na Figura 32 é ilustrado um projeto de lateral de uma carroceria de ônibus.

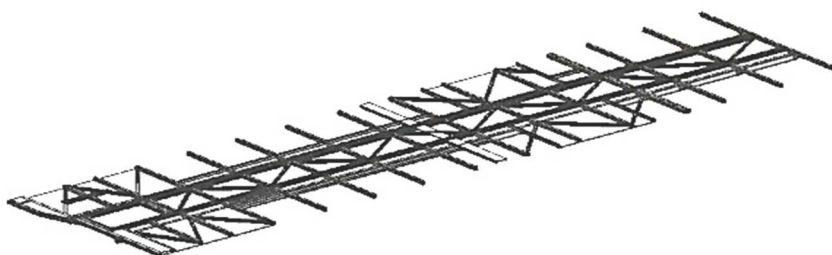
Figura 32: Projeto da estrutura lateral de uma carroceria de ônibus



Fonte: Viero (2013, p. 20).

A estrutura da base é formada por tubos retangulares e quadrados que são unidos através do processo de soldagem. Essa estrutura executa a interface entre o chassi e a carroceria do ônibus, sustenta o assoalho e efetua a ligação das laterais esquerda e direita do veículo. (VIERO, 2013). A Figura 33 ilustra um projeto de base para uma carroceria de ônibus.

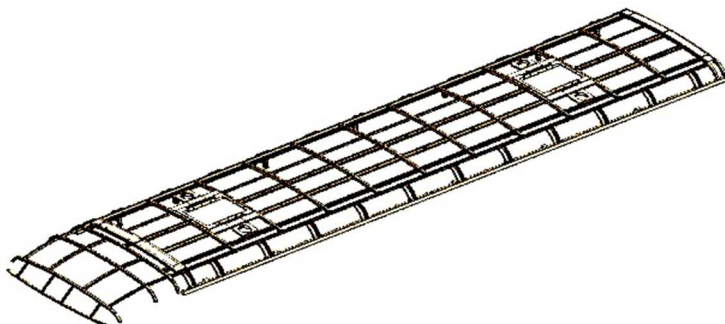
Figura 33: Projeto da estrutura de base de uma carroceria de ônibus



Fonte: Viero (2013, p. 21).

A estrutura do teto é composta por tubos, chapas e perfis de metal. Assim como a base, o teto serve como elemento de ligação entre as laterais, além de fazer a função de estruturação do arranjo e de servir para fixação de diversos componentes da carroceria. A Figura 34 mostra o projeto de um teto para uma carroceria de ônibus.

Figura 34: Projeto da estrutura de teto de uma carroceria de ônibus



Fonte: Viero (2013, p. 22).

No Processo Produtivo, os módulos referentes às estruturas frontal, traseira, laterais, base e teto são pré-montados fora da linha de montagem e posteriormente acoplados ao veículo na montagem final do produto.

Após a modularização do arranjo estrutural (parte externa), a empresa modularizou as partes internas dos veículos. Nesse sentido, os módulos construídos foram: cabine do motorista (painel, console lateral, capô, entre outros itens), divisória entre cabine do motorista e salão de passageiros e banheiros. A Figura 35 ilustra a cabine modular desenvolvida pela empresa.

Figura 35: Projeto da cabine modular do ônibus



Fonte: Empresa pesquisada.

A cabine modular facilita a manutenção e o acesso aos componentes. Os módulos ampliam a possibilidade de configurações da cabine diminuindo o número de itens. Essas características (facilidade de manutenção e acesso aos componentes e à ampliação da possibilidade de configuração) também podem ser associadas à divisória modular (Figura 36). A divisória é a estrutura entre a cabine do motorista e o salão de passageiros.

Figura 36: Projeto da divisória modular do ônibus



Fonte: Empresa pesquisada.

Após a apresentação detalhada da empresa e dos processos em análise, no próximo capítulo são apresentadas as análises dos dados da pesquisa.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da eficiência técnica referentes aos cálculos efetuados após a coleta e tratamento dos dados obtidos. Nesse sentido, são contempladas as eficiências do modelo CRS (*Constante Returns to Scales*) no que tange à eficiência padrão, fronteira invertida, eficiência composta e eficiência composta\* (normalizada). Os resultados relativos à eficiência composta serviram de base para as análises e contemplam o projeto e o produto modularizado bem como o projeto e o produto não modularizado na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo.

Os resultados consideram um período total de três anos e seis meses consecutivos, contemplando o intervalo de tempo entre janeiro de 2011 e junho de 2014. Esse período totaliza 42 meses, permitindo a consideração de 42 DMU's, tanto na unidade de análise da Engenharia de Produtos quanto na do Processo Produtivo. Além da eficiência, também é apresentada uma discussão referente às folgas e alvos de cada DMU.

Neste capítulo ainda é efetuada uma análise comparativa entre o comportamento das eficiências do projeto modularizado e do projeto não modularizado na Engenharia de Produtos e do produto modularizado e produto não modularizado no Processo Produtivo. Posteriormente, é efetuada uma caracterização dos efeitos da modularização sobre a eficiência de cada unidade de contexto de análise (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo) e as hipóteses de pesquisa são testadas e analisadas. Finalmente, efetua-se a quantificação dos efeitos da modularização sobre a eficiência.

### 5.1 ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS NA ENGENHARIA DE PRODUTOS

A análise relativa à Engenharia de Produtos foi segregada entre o projeto modularizado (seção 5.1.1) e o projeto não modularizado (seção 5.1.2). Posteriormente, na seção 5.1.3, efetua-se uma análise comparativa entre os projetos. Nesse sentido, na próxima seção são discutidos os resultados referentes ao comportamento da eficiência do produto modularizado.



### 5.1.1 Comportamento da eficiência do projeto modularizado na Engenharia de Produtos

Na Tabela 11 estão relacionados, em ordem cronológica, os 42 meses que representam 42 lotes de projetos do produto modularizado desenvolvidos ao longo de três anos e seis meses consecutivos (janeiro de 2011 a junho de 2014). Nesse sentido, apresentam-se os escores de eficiência referentes aos cálculos da eficiência padrão, fronteira invertida, eficiência composta e eficiência composta\* (normalizada). Os cálculos foram utilizados para verificar o desempenho com relação à eficiência de cada DMU, e os escores de eficiência composta (destacados em **negrito**) são utilizados para as análises. As DMU's estão segregadas em três períodos: anterior à modularização, de transição (meses em que foram finalizados os projetos não modularizados e introduzidos os projetos modularizados) e posterior à modularização.

Tabela 11: Eficiências do projeto modularizado

(Continua)

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Fronteira invertida	Eficiência Composta	Eficiência Composta*
DMU1	Jan/11	0,611	1,000	<b>0,305</b>	0,391
DMU2	Fev/11	0,570	1,000	<b>0,285</b>	0,365
DMU3	Mar/11	0,648	1,000	<b>0,324</b>	0,414
DMU4	Abr/11	1,000	0,964	<b>0,518</b>	0,663
DMU5	Mai/11	1,000	0,975	<b>0,512</b>	0,655
DMU6	Jun/11	1,000	0,997	<b>0,501</b>	0,642
DMU7	Jul/11	1,000	0,957	<b>0,522</b>	0,667
DMU8	Ago/11	0,795	0,974	<b>0,410</b>	0,525
DMU9	Set/11	0,911	1,000	<b>0,455</b>	0,583
DMU10	Out/11	1,000	0,990	<b>0,505</b>	0,646
DMU11	Nov/11	0,606	0,977	<b>0,314</b>	0,402
DMU12	Dez/11	0,710	0,937	<b>0,386</b>	0,494
DMU13	Jan/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,640
DMU14	Fev/12	1,000	0,988	<b>0,506</b>	0,648
DMU15	Mar/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,640
DMU16	Abr/12	0,851	0,987	<b>0,432</b>	0,552
DMU17	Mai/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,640
DMU18	Jun/12	0,965	0,991	<b>0,487</b>	0,623
DMU19	Jul/12	1,000	0,951	<b>0,524</b>	0,671
DMU20	Ago/12	0,678	0,975	<b>0,351</b>	0,449
DMU21	Set/12	0,706	1,000	<b>0,353</b>	0,452
DMU22	Out/12	0,653	1,000	<b>0,326</b>	0,418
DMU23	Nov/12	0,780	1,000	<b>0,390</b>	0,499
DMU24	Dez/12	0,528	0,952	<b>0,288</b>	0,368
DMU25	Jan/13	0,648	1,000	<b>0,324</b>	0,415
DMU26	Fev/13	0,558	1,000	<b>0,279</b>	0,357
DMU27	Mar/13	0,855	0,915	<b>0,470</b>	0,602
DMU28	Abr/13	0,819	0,984	<b>0,417</b>	0,534

						(Conclusão)
DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Fronteira invertida	Eficiência Composta	Eficiência Composta*	
DMU29	Mai/13	1,000	0,888	<b>0,556</b>	0,711	
DMU30	Jun/13	0,662	0,934	<b>0,364</b>	0,466	
DMU31	Jul/13	0,771	0,868	<b>0,451</b>	0,578	
DMU32	Ago/13	0,698	0,766	<b>0,466</b>	0,596	
DMU33	Set/13	1,000	0,932	<b>0,534</b>	0,683	
DMU34	Out/13	0,989	1,000	<b>0,494</b>	0,632	
DMU35	Nov/13	1,000	0,498	<b>0,751</b>	0,961	
DMU36	Dez/13	1,000	0,437	<b>0,782</b>	1,000	
DMU37	Jan/14	1,000	0,492	<b>0,754</b>	0,965	
DMU38	Fev/14	1,000	0,501	<b>0,750</b>	0,959	
DMU39	Mar/14	0,984	1,000	<b>0,492</b>	0,630	
DMU40	Abr/14	1,000	0,877	<b>0,561</b>	0,718	
DMU41	Mai/14	1,000	0,478	<b>0,761</b>	0,974	
DMU42	Jun/14	1,000	0,514	<b>0,743</b>	0,951	

## LEGENDA:

	Período anterior à modularização
	Período de transição
	Período posterior à modularização

Fonte: Dados da pesquisa.

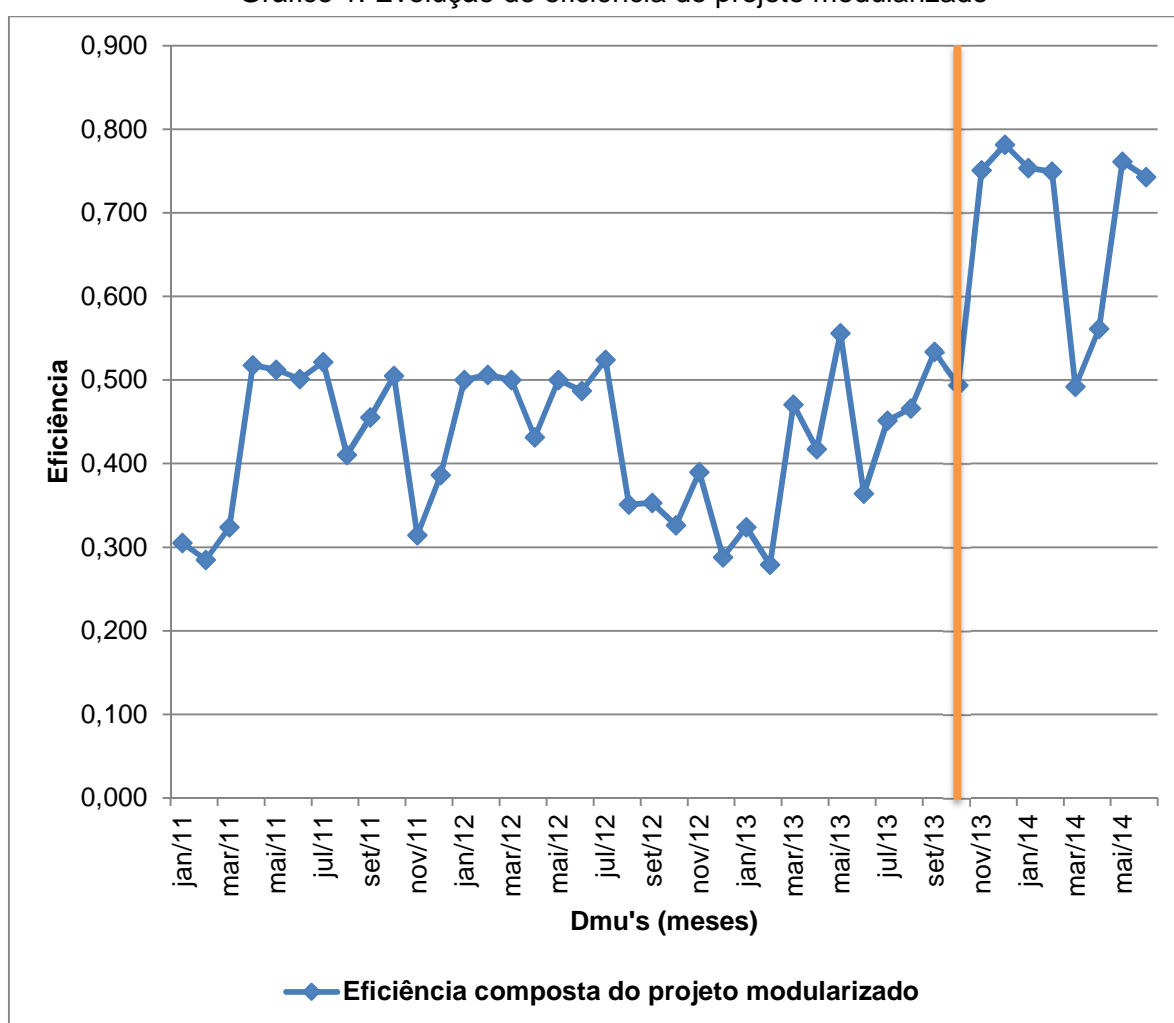
Ao analisar a Tabela 11, deve-se considerar que quanto melhor for o desempenho da DMU, maior será o escore da eficiência composta resultante do cálculo efetuado na análise envoltória de dados. Nesse sentido, observa-se que o melhor desempenho de eficiência pode ser atribuído às DMU's 35 (nov/2013), 36 (dez/ 2013), 37 (jan/2014), 38 (fev/2014), 40 (abr/2014), 41 (maio/2014) e 42 (jun/2014). Verifica-se que as DMU's com melhor desempenho em toda série temporal estão localizadas na área verde da Tabela 11, ou seja, no período posterior à modularização.

No que se refere à DMU 39 (mar/2014), esta apresentou o pior desempenho no período posterior à modularização, seguida da 40 (Abr/2014) (área verde da Tabela 11). Inclusive visualizam-se DMU's do período de transição (por exemplo, DMU 33) e do período anterior à modularização (por exemplo, DMU29) com desempenho superior à DMU 39. Ao analisar os dados coletados, percebe-se que nessas DMU's (39 e 40) houve elevações no índice de itens reclamados pelos clientes (*input10*). Conforme os especialistas do processo, isso ocorreu pois foram detectadas falhas de projeto no que se refere a portas e divisórias de produtos modularizados no período. Outro indicativo importante citado pelos especialistas é que a modularização aumenta a capacidade de desenvolvimento de projetos, no entanto a empresa precisa estar preparada para aumentar as vendas com o objetivo

de absorver esse aumento de capacidade, o que significa que a modularização deve ser vista como uma estratégia e considerada em todas as áreas da organização.

Procurou-se ilustrar de forma gráfica (Gráfico 1) os dados referente à eficiência composta do projeto modularizado (dados apresentados na Tabela 11). Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores de eficiência ao longo do tempo. Para uma melhor compreensão da evolução da eficiência, essa avaliação segrega o período de transição, que é ilustrado pelo traço laranja.

Gráfico 1: Evolução de eficiência do projeto modularizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 1, é possível visualizar uma elevação da eficiência do projeto após o período em que a modularização foi implementada, visto que a linha de tendência linear mostra a perspectiva de melhoria da eficiência ao longo do tempo. Também se pode perceber que após uma elevação nos escores de eficiência

no período posterior à modularização, ocorreu uma redução nos escores das DMU's 39 (Mar/2014) e 40 (Abr/2014), o que está atrelado ao problema de projeto nas portas e divisórias do produto, situação que ocasionou aumento de reclamações de clientes (*input10*).

As DMU's eficientes na análise envoltória de dados (DEA) servem de referência (*benchmark*) para as DMU's ineficientes. Entende-se que as DMU's eficientes executam as melhores práticas operacionais. Nesse sentido, o cálculo DEA possibilita a avaliação dos alvos, que podem ser considerados os valores que as DMU's ineficientes deveriam consumir de cada recurso (*inputs*) se obtivessem o mesmo desempenho que as DMU's eficientes.

A Tabela 12 apresenta os valores dos alvos com os respectivos cálculos das folgas dos recursos da Engenharia de Produtos. Mesmo que as folgas forneçam dados referentes a períodos passados, entende-se que por meio delas é possível a obtenção de parâmetros para estabelecer metas de melhoria para as DMU's ineficientes. Os dados apresentados na Tabela 12 são referentes às DMU's consideradas ineficientes nesta análise DEA, ou seja, as que poderiam ter consumidos menos recursos. Dessa forma, as DMU's eficientes, ou seja, as que executaram as melhores práticas e consumiram os recursos de forma adequada, foram omitidas da avaliação. O modelo DEA definido nesta pesquisa é orientado a *input*, assim o modelo fixa o *output* e mensura os recursos necessários para executar a produção. As DMU's estão segregadas em período anterior, de transição e posterior à modularização.

Tabela 12: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do projeto modularizado

DMU	Valores	(Continua)									
		Input1 <i>Lead time</i> comercial	Input2 <i>Lead time</i> engenharia (esp.do pedido)	Input3 <i>Lead time</i> engenharia (conf. do produto)	Input4 <i>Part</i> <i>numbers</i>	Input5 Itens comprados	Input6 Itens produzidos	Input7 Pessoas Engenharia Produtos	Input8 Problemas técnicos reportados	Input9 Produtos reclamados pelos clientes	Input10 Itens reclamados pelos clientes
1 (Jan/2011)	Atual	26	58	20	12.080	4.100	7.980	38	1	48	133
	Alvo	16	19	8	7.226	2.504	4.722	5	1	11	31
	<b>Folga</b>	<b>10</b>	<b>39</b>	<b>12</b>	<b>4.854</b>	<b>1.596</b>	<b>3.258</b>	<b>33</b>	-	<b>37</b>	<b>102</b>
2 (Fev/2011)	Atual	163	243	134	68.780	24.352	44.428	38	6	55	131
	Alvo	93	114	33	29.709	10.073	19.636	22	3	28	75
	<b>Folga</b>	<b>70</b>	<b>129</b>	<b>101</b>	<b>39.071</b>	<b>14.279</b>	<b>24.792</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>56</b>
3 (Mar/2011)	Atual	242	422	221	108.928	38.568	70.360	39	4	88	327
	Alvo	157	160	99	70.803	25.069	45.030	7	3	22	82
	<b>Folga</b>	<b>85</b>	<b>262</b>	<b>122</b>	<b>38.125</b>	<b>13.499</b>	<b>25.330</b>	<b>32</b>	<b>1</b>	<b>66</b>	<b>245</b>
8 (Ago/2011)	Atual	119	126	125	54.362	18.178	36.184	40	-	69	234
	Alvo	95	77	67	42.662	14.452	28.206	23	-	55	147
	<b>Folga</b>	<b>24</b>	<b>49</b>	<b>58</b>	<b>11.700</b>	<b>3.726</b>	<b>7.978</b>	<b>17</b>	-	<b>14</b>	<b>87</b>
9 (Set/2011)	Atual	78	123	110	42.644	14.364	28.280	41	-	54	148
	Alvo	71	79	58	37.669	13.085	24.580	23	-	49	135
	<b>Folga</b>	<b>7</b>	<b>44</b>	<b>52</b>	<b>4.975</b>	<b>1.279</b>	<b>3.700</b>	<b>18</b>	-	<b>5</b>	<b>13</b>
11 (Nov/2011)	Atual	276	267	130	78.232	26.096	52.136	43	2	60	203
	Alvo	123	117	65	46.033	15.711	30.322	25	1	36	87
	<b>Folga</b>	<b>153</b>	<b>150</b>	<b>65</b>	<b>32.199</b>	<b>10.385</b>	<b>21.814</b>	<b>18</b>	<b>1</b>	<b>24</b>	<b>116</b>
12 (Dez/2011)	Atual	319	270	226	106.338	36.452	69.886	42	3	65	195
	Alvo	176	140	136	82.011	28.100	53.911	32	2	42	107
	<b>Folga</b>	<b>143</b>	<b>130</b>	<b>90</b>	<b>24.327</b>	<b>8.352</b>	<b>15.975</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>88</b>
16 (Abr/2012)	Atual	170	60	191	57.684	19.748	37.936	39	2	49	165
	Alvo	130	51	137	49.018	16.738	32.280	30	2	42	114
	<b>Folga</b>	<b>40</b>	<b>9</b>	<b>54</b>	<b>8.666</b>	<b>3.010</b>	<b>5.656</b>	<b>9</b>	-	<b>7</b>	<b>51</b>
18 (Jun/2012)	Atual	161	74	180	75.536	25.760	49.776	37	6	27	54
	Alvo	142	71	156	70.348	24.157	46.191	26	-	26	52
	<b>Folga</b>	<b>19</b>	<b>3</b>	<b>24</b>	<b>5.188</b>	<b>1.603</b>	<b>3.585</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

(Continuação)

DMU	Valores	Input1 <i>Lead time</i> comercial	Input2 <i>Lead time</i> engenharia (esp. ped.)	Input3 <i>Lead time</i> engenharia (conf. Prod.)	Input4 <i>Part</i> <i>numbers</i>	Input5 Itens comprados	Input6 Itens produzidos	Input7 Pessoas Engenharia Produtos	Input8 Problemas técnicos reportados	Input9 Produtos reclamados pelos clientes	Input10 Itens reclamados pelos clientes
20 (Ago/2012)	Atual	312	267	170	104.742	36.470	68.272	36	13	52	165
	Alvo	203	101	77	68.082	23.706	43.694	6	8	13	41
	<b>Folga</b>	<b>109</b>	<b>166</b>	<b>94</b>	<b>36.660</b>	<b>12.765</b>	<b>24.578</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>39</b>	<b>124</b>
21 (Set/2012)	Atual	177	103	140	64.536	22.236	42.300	36	6	31	48
	Alvo	100	67	85	46.067	15.788	30.279	26	3	18	34
	<b>Folga</b>	<b>77</b>	<b>36</b>	<b>55</b>	<b>18.469</b>	<b>6.448</b>	<b>12.021</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
22 (Out/2012)	Atual	149	55	95	44.824	16.240	28.584	35	13	55	102
	Alvo	78	36	47	28.347	9.694	18.653	14	1	35	67
	<b>Folga</b>	<b>71</b>	<b>19</b>	<b>48</b>	<b>16.477</b>	<b>6.546</b>	<b>9.931</b>	<b>21</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>35</b>
23 (Nov/2012)	Atual	195	42	79	39.546	13.493	26.053	33	-	35	76
	Alvo	65	33	54	30.764	10.521	20.243	14	-	25	59
	<b>Folga</b>	<b>130</b>	<b>9</b>	<b>25</b>	<b>8.782</b>	<b>2.972</b>	<b>5.810</b>	<b>19</b>	-	<b>10</b>	<b>17</b>
24 (Dez/2012)	Atual	77	68	45	23.984	8.320	15.664	33	1	23	55
	Alvo	38	36	17	12.549	4.281	8.268	8	1	12	27
	<b>Folga</b>	<b>39</b>	<b>32</b>	<b>28</b>	<b>11.435</b>	<b>4.039</b>	<b>7.396</b>	<b>25</b>	-	<b>11</b>	<b>28</b>
25 (Jan/2013)	Atual	384	74	71	43.974	15.248	28.726	32	1	38	170
	Alvo	73	48	46	28.307	9.696	18.610	14	1	25	50
	<b>Folga</b>	<b>311</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>15.667</b>	<b>5.552</b>	<b>10.116</b>	<b>18</b>	-	<b>13</b>	<b>120</b>
26 (Fev/2013)	Atual	188	25	29	17.304	6.032	11.272	32	2	35	67
	Alvo	33	14	14	9.525	3.232	6.293	6	-	19	37
	<b>Folga</b>	<b>155</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>7.779</b>	<b>2.800</b>	<b>4.979</b>	<b>26</b>	<b>2</b>	<b>16</b>	<b>30</b>
27 (Mar/2013)	Atual	110	142	122	50.152	17.512	32.640	32	-	68	186
	Alvo	94	83	65	42.200	14.274	27.922	24	-	58	159
	<b>Folga</b>	<b>16</b>	<b>59</b>	<b>57</b>	<b>7.952</b>	<b>3.238</b>	<b>4.718</b>	<b>8</b>	-	<b>10</b>	<b>27</b>
28 (Abr/2013)	Atual	220	61	112	51.048	17.516	33.532	27	-	37	76
	Alvo	87	46	74	41.745	14.294	27.451	17	-	28	62
	<b>Folga</b>	<b>133</b>	<b>15</b>	<b>38</b>	<b>9.303</b>	<b>3.222</b>	<b>6.081</b>	<b>10</b>	-	<b>9</b>	<b>14</b>

(Conclusão)

DMU	Valores	Input1 <i>Lead time</i> comercial	Input2 <i>Lead time</i> engenharia (esp. ped.)	Input3 <i>Lead time</i> engenharia (conf. Prod.)	Input4 <i>Part</i> <i>numbers</i>	Input5 Itens comprados	Input6 Itens produzidos	Input7 Pessoas Engenharia Produtos	Input8 Problemas técnicos reportados	Input9 Produtos reclamados pelos clientes	Input10 Itens reclamados pelos clientes
30 (Jun/2013)	Atual	221	111	111	53.136	18.516	34.620	26	1	52	98
	Alvo	91	69	55	35.186	12.032	23.154	17	1	30	66
	<b>Folga</b>	<b>130</b>	<b>42</b>	<b>56</b>	<b>17.950</b>	<b>6.484</b>	<b>11.466</b>	<b>9</b>	-	<b>22</b>	<b>32</b>
31 (Jul/2013)	Atual	137	85	100	50.568	17.288	33.280	26	2	45	58
	Alvo	91	66	67	38.853	13.323	25.530	19	2	22	45
	<b>Folga</b>	<b>46</b>	<b>19</b>	<b>33</b>	<b>11.715</b>	<b>3.965</b>	<b>7.750</b>	<b>7</b>	-	<b>23</b>	<b>13</b>
32 (Ago/2013)	Atual	136	62	79	32.432	10.834	21.598	27	3	49	92
	Alvo	71	43	34	22.283	7.565	14.719	17	2	32	64
	<b>Folga</b>	<b>65</b>	<b>19</b>	<b>45</b>	<b>10.149</b>	<b>3.269</b>	<b>6.879</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>17</b>	<b>28</b>
34 (Out/2013)	Atual	170	361	54	26.484	8.786	17.698	27	26	51	87
	Alvo	133	183	17	26.175	8.785	17.390	25	26	16	29
	<b>Folga</b>	<b>37</b>	<b>178</b>	<b>37</b>	<b>309</b>	<b>1</b>	<b>308</b>	<b>2</b>	-	<b>35</b>	<b>58</b>
39 (Mar/2014)	Atual	104	48	28	19.304	6.400	12.904	22	6	120	671
	Alvo	81	24	9	19.079	6.399	12.679	21	6	38	222
	<b>Folga</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>19</b>	<b>225</b>	<b>1</b>	<b>225</b>	<b>1</b>	-	<b>82</b>	<b>449</b>
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	<b>1.892</b>	<b>1.472</b>	<b>1.151</b>	<b>341.977</b>	<b>119.030</b>	<b>224.346</b>	<b>360</b>	<b>36</b>	<b>524</b>	<b>1.749</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>1.606</b>	<b>559</b>	<b>1.053</b>	<b>2</b>	<b>0,17</b>	<b>2</b>	<b>8</b>

## LEGENDA:

	Período anterior à modularização
	Período de transição
	Período posterior à modularização

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar a Tabela 12, pode-se perceber que as DMU's consideradas ineficientes estão concentradas no período anterior à modularização. Esse período contempla da DMU 1 até a DMU 32. A DMU 34 não foi considerada eficiente e contempla o período de transição. No que se refere ao período posterior à modularização do projeto, somente a DMU 39 foi considerada ineficiente, sendo que as demais DMU's (35, 36, 37, 38, 40, 41, 42) foram consideradas eficientes. Entende-se que a concentração de DMU's ineficientes no período anterior à modularização e de DMU's eficientes no período posterior à modularização indica que a modularização melhorou a eficiência da Engenharia de Produtos. Nesse sentido, as DMU's referentes aos projetos modulares são as que representam as melhores práticas no período proposto para análise na Engenharia de Produtos.

Para discutir os alvos e folgas, utiliza-se como exemplo a DMU 32 (ilustrada na Tabela 12), que corresponde ao lote de projetos desenvolvidos no mês de agosto de 2013, e representa a última DMU com projetos desenvolvidos antes da modularização. O total de projetos desenvolvidos (*output*) pela DMU 32 são 7 projetos. No *input1*, que corresponde ao *lead time* comercial (negociação), foram utilizados 136 dias para a negociação dos 7 projetos de produtos. Se essa DMU fosse eficiente, poderia executar os mesmos 7 projetos com um *lead time* de negociação de 71 dias, ou seja, 65 dias a menos do que levou para realizá-los. Quanto ao *lead time* de Engenharia para especificação e refinamento do pedido (*input2*), foram utilizados 62 dias com um alvo de 43, ou seja, 19 dias de recurso poderiam ter sido economizados nessa DMU. No que se refere ao *lead time* de Engenharia para configuração do produto (*input3*), foram utilizados 79 dias para os 7 projetos. No entanto, se a DMU fosse eficiente, poderia se ter desenvolvido os mesmos 7 projetos em 34 dias (com economia de 45 dias). Quanto ao *input4*, *part numbers*, a economia nessa DMU poderia contemplar 10.149 partes. A economia no *input5* (itens comprados) e no *input6* (itens produzidos) seria de 3.269 e 6.879, respectivamente.

Quanto ao número de pessoas utilizadas na Engenharia (*input7*), no mês de agosto de 2013 eram 27, sendo que os mesmos projetos poderiam ser desenvolvidos no mês com 17 pessoas, ou seja, 10 pessoas a menos. As mesmas análises podem ser efetuadas para as demais variáveis e para as demais DMU's. Quanto aos *inputs* que contemplam a dimensão da qualidade, a análise das folgas segue os mesmos padrões referidos anteriormente.



Também se efetuou uma análise agregada do total das folgas apresentadas na Tabela 12. Essa análise contempla o somatório de todas as folgas de todas as DMU's (42) analisadas no período pesquisado. Além disso, realizou-se uma avaliação da média das folgas de cada DMU. Essa análise da média pode mostrar o quanto, em média, poderia ser economizado de cada variável em cada projeto. Por exemplo, no *input1*, pode-se considerar uma economia média mensal de 9 dias em cada projeto desenvolvido. No *input2*, evidencia-se uma economia média mensal de 7 dias em cada projeto e, assim, sucessivamente para todos os recursos. Entende-se que esse tipo de avaliação pode embasar a relevância de se analisar a eficiência nas empresas e sugere indícios de que foram obtidas melhorias com a implementação da modularização na organização objeto de estudo. Na próxima seção, são efetuadas as mesmas análises para o projeto não modularizado.

### **5.1.2 Comportamento da eficiência do projeto não modularizado na Engenharia de Produtos**

A análise do projeto não modularizado objetiva auxiliar a avaliação dos efeitos percebidos na Engenharia de Produtos, no sentido de comprovar que eles são oriundos da modularização e não de outras melhorias que podem ter sido implementadas na empresa ao longo do tempo. Dessa forma, para verificar os dados do projeto não modularizados, repete-se os mesmos procedimentos realizados para analisar o projeto modularizado. Na Tabela 13 estão relacionadas, em ordem cronológica, as 42 DMU's que representam os 42 lotes de projetos do produto não modularizado desenvolvidos no período proposto para análise. Nesse sentido, apresenta-se os escores referentes aos cálculos da eficiência padrão, fronteira invertida, eficiência composta e eficiência composta\* (normalizada). Os cálculos foram utilizados para verificar o desempenho com relação à eficiência de cada DMU, e os escores de eficiência composta (destacados em **negrito**) são utilizados para as análises. As unidades de tomada de decisão destacadas contemplam o mesmo período de transição do projeto modularizado (analisado anteriormente) para que possam ser estabelecidos parâmetros para as análises de grupos de eficiência.

Tabela 13: Eficiências do projeto não modularizado

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Fronteira invertida	Eficiência Composta	Eficiência Composta*
DMU1	Jan/11	0,922	1,000	<b>0,461</b>	0,780
DMU2	Fev/11	1,000	0,919	<b>0,541</b>	0,915
DMU3	Mar/11	0,950	1,000	<b>0,475</b>	0,804
DMU4	Abr/11	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU5	Mai/11	0,973	0,867	<b>0,553</b>	0,936
DMU6	Jun/11	1,000	0,857	<b>0,571</b>	0,967
DMU7	Jul/11	0,948	0,900	<b>0,524</b>	0,887
DMU8	Ago/11	1,000	0,901	<b>0,550</b>	0,930
DMU9	Set/11	0,962	0,892	<b>0,535</b>	0,906
DMU10	Out/11	1,000	0,931	<b>0,534</b>	0,905
DMU11	Nov/11	1,000	0,819	<b>0,591</b>	1,000
DMU12	Dez/11	0,987	0,864	<b>0,561</b>	0,951
DMU13	Jan/12	0,950	0,893	<b>0,529</b>	0,895
DMU14	Fev/12	0,867	1,000	<b>0,433</b>	0,734
DMU15	Mar/12	0,995	1,000	<b>0,497</b>	0,842
DMU16	Abr/12	1,000	0,954	<b>0,523</b>	0,886
DMU17	Mai/12	0,968	0,919	<b>0,524</b>	0,888
DMU18	Jun/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU19	Jul/12	0,963	0,901	<b>0,531</b>	0,899
DMU20	Ago/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU21	Set/12	0,992	1,000	<b>0,496</b>	0,839
DMU22	Out/12	0,972	1,000	<b>0,486</b>	0,823
DMU23	Nov/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU24	Dez/12	0,979	1,000	<b>0,489</b>	0,829
DMU25	Jan/13	1,000	0,904	<b>0,548</b>	0,928
DMU26	Fev/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU27	Mar/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU28	Abr/13	0,899	1,000	<b>0,449</b>	0,761
DMU29	Mai/13	0,880	1,000	<b>0,440</b>	0,745
DMU30	Jun/13	1,000	0,882	<b>0,559</b>	0,947
DMU31	Jul/13	0,913	0,952	<b>0,481</b>	0,814
DMU32	Ago/13	0,946	0,962	<b>0,492</b>	0,833
DMU33	Set/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU34	Out/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU35	Nov/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU36	Dez/13	1,000	0,957	<b>0,521</b>	0,882
DMU37	Jan/14	0,900	1,000	<b>0,450</b>	0,762
DMU38	Fev/14	1,000	0,894	<b>0,553</b>	0,936
DMU39	Mar/14	1,000	0,993	<b>0,504</b>	0,853
DMU40	Abr/14	1,000	0,918	<b>0,541</b>	0,916
DMU41	Mai/14	1,000	0,886	<b>0,557</b>	0,943
DMU42	Jun/14	0,966	1,000	<b>0,483</b>	0,817

LEGENDA:

 Período de transição

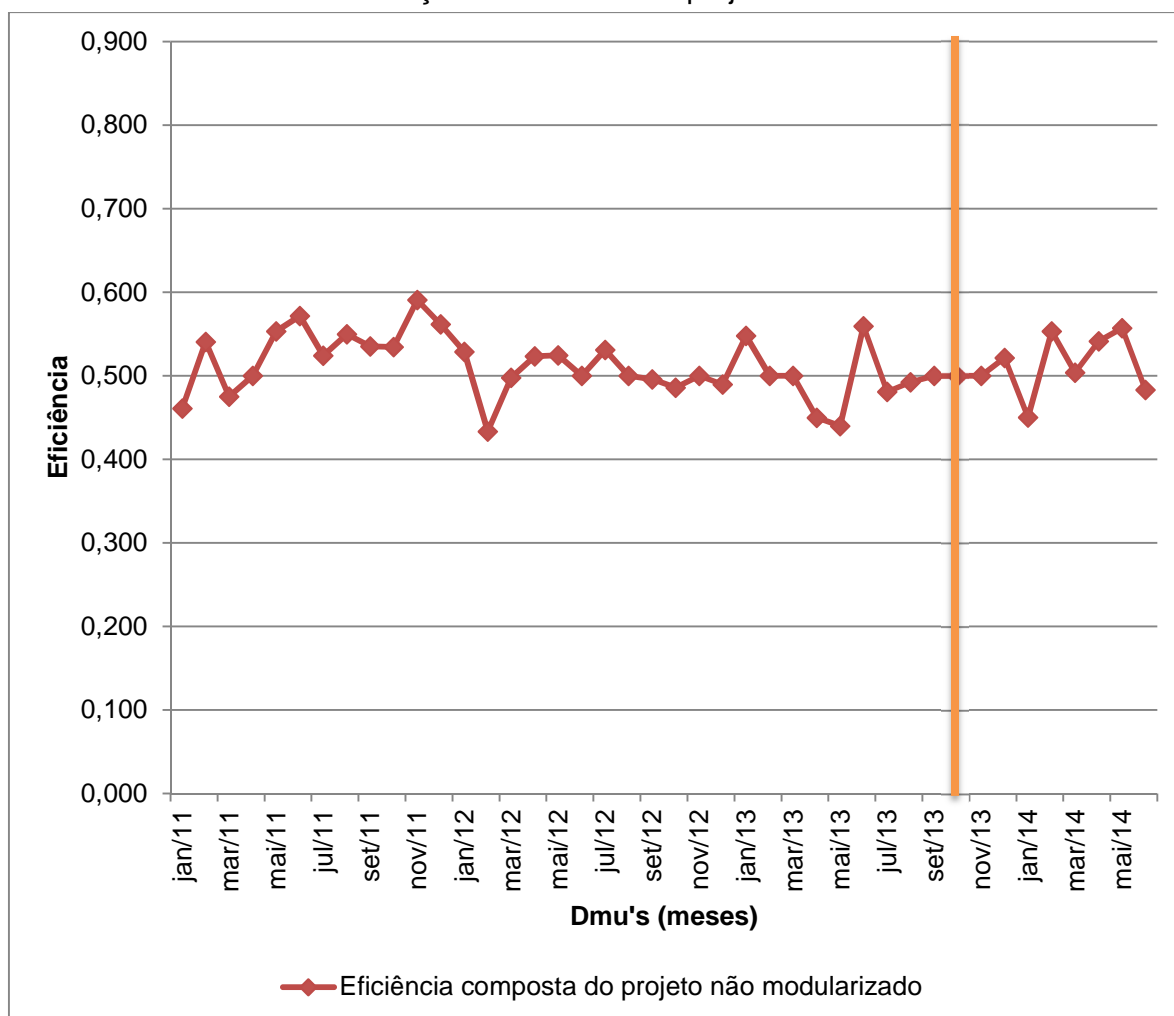
Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 13, deve-se considerar que quanto mais elevado for o desempenho da DMU, maior será o escore da eficiência composta resultante do cálculo efetuado na análise envoltória de dados. Nesse sentido, observa-se que o melhor desempenho de eficiência pode ser atribuído às DMU's 5 (Mai/2011), 6 (Jun/2011), 8 (Ago/2011), 11 (Nov/2011), 12 (Dez/2011), 30 (Jun/2013), 38

(Fev/2014) e 41 (Mai/2014). Percebe-se que as DMU's com melhor desempenho estão distribuídas ao longo da série temporal, não apresentando a mesma característica do projeto modularizado, que obteve agrupamento de DMU's eficientes no período posterior à modularização. Dentre as 8 DMU's com melhor desempenho, observa-se que 5 são correspondentes ao ano de 2011.

Procurou-se ilustrar de forma gráfica (Gráfico 2) os dados referentes à eficiência composta do produto não modularizado (dados apresentados na Tabela 13). Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores de eficiência ao longo do tempo. Para uma melhor compreensão da evolução da eficiência, essa avaliação segrega o período de transição do produto modularizado, que é ilustrado pelo traço laranja.

Gráfico 2: Evolução de eficiência do projeto não modularizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 2, é possível visualizar efeitos diferentes do produto modularizado (Gráfico 1), cujas DMU's com melhor desempenho na sequência temporal estão concentradas no período anterior à modularização. De acordo com a análise, as eficiências compostas das DMU's dispostas em séries temporais no projeto não modularizado não apresentam o mesmo comportamento do projeto modularizado, visto que ao observar a linha de tendência linear é possível verificar uma tendência de queda na eficiência do projeto não modularizado. Entende-se que isso é um indicativo de que foi a modularização que melhorou a eficiência da Engenharia de Produtos. No entanto, apesar dos indícios identificados, destaca-se que são efetuados testes estatísticos para melhor compreender os efeitos percebidos.

Mesmo que a análise do produto não modularizado seja para confirmar os efeitos do produto modularizado na Engenharia de Produtos, também se efetuou, para esse produto, as análises das folgas. Nesse sentido, a Tabela 14 apresenta os valores dos alvos com os respectivos cálculos das folgas dos recursos de Engenharia. Os dados apresentados na Tabela 14 são referentes às DMU's consideradas ineficientes nesta análise DEA, pois, como o modelo é orientado a *input*, os alvos mostram os recursos que poderiam ser economizados nas DMU's. Dessa forma, as DMU's eficientes, ou seja, as que executaram as melhores práticas e consumiram os recursos de forma adequada, foram omitidas da avaliação.

Tabela 14: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do projeto não modularizado

(Continua)

DMU	Valores	Input1 <i>Lead time</i> comercial	Input2 <i>Lead time</i> engenharia (esp.do pedido)	Input3 <i>Lead time</i> engenharia (conf. do produto)	Input4 <i>Part</i> <i>numbers</i>	Input5 Itens comprados	Input6 Itens produzidos	Input7 Pessoas Engenharia Produtos	Input8 Problemas técnicos reportados	Input9 Produtos reclamados pelos clientes	Input10 Itens reclamados pelos clientes
1 (Jan/2011)	Atual	104	89	67	25.152	12.928	12.224	38	0	157	366
	Alvo	87	49	50	22.884	11.617	11.267	3	0	5	13
	<b>Folga</b>	<b>17</b>	<b>40</b>	<b>17</b>	<b>2.268</b>	<b>1.311</b>	<b>957</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>152</b>	<b>353</b>
3 (Mar/2011)	Atual	79	75	58	28.168	12.800	15.368	39	7	43	98
	Alvo	58	59	55	26.766	12.163	14.603	25	1	36	93
	<b>Folga</b>	<b>21</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>1.402</b>	<b>637</b>	<b>765</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>5</b>
5 (Mai/2011)	Atual	101	99	87	35.528	16.824	18.704	39	3	58	128
	Alvo	90	96	85	34.562	16.367	18.195	27	2	50	125
	<b>Folga</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>966</b>	<b>457</b>	<b>509</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>3</b>
7 (Jun/2011)	Atual	233	206	187	79.128	36.720	42.408	39	4	74	225
	Alvo	221	195	177	75.052	34.828	40.223	35	3	70	159
	<b>Folga</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>4.076</b>	<b>1.892</b>	<b>2.185</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>66</b>
9 (Set/2011)	Atual	142	139	122	38.976	17.808	21.168	41	4	100	251
	Alvo	137	124	114	37.502	17.135	20.368	39	1	67	174
	<b>Folga</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>1.474</b>	<b>673</b>	<b>800</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>33</b>	<b>77</b>
12 (Dez/2011)	Atual	171	136	124	53.488	24.008	29.480	42	7	54	131
	Alvo	165	132	122	52.791	23.695	29.096	24	2	53	117
	<b>Folga</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>697</b>	<b>313</b>	<b>384</b>	<b>18</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>14</b>
13 (Jan/2012)	Atual	161	167	178	59.696	27.520	32.176	42	7	84	184
	Alvo	153	159	143	56.684	26.131	30.552	40	4	70	175
	<b>Folga</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>35</b>	<b>3.012</b>	<b>1.389</b>	<b>1.624</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>14</b>	<b>9</b>
14 (Fev/2012)	Atual	80	104	113	36.304	15.736	20.568	40	5	67	159
	Alvo	69	71	65	31.381	13.637	17.744	25	4	39	104
	<b>Folga</b>	<b>11</b>	<b>33</b>	<b>48</b>	<b>4.923</b>	<b>2.099</b>	<b>2.824</b>	<b>15</b>	<b>1</b>	<b>28</b>	<b>55</b>

(Continuação)

DMU	Valores	Input1 <i>Lead time</i> comercial	Input2 <i>Lead time</i> engenharia (esp.do pedido)	Input3 <i>Lead time</i> engenharia (conf. do produto)	Input4 <i>Part</i> <i>numbers</i>	Input5 Itens comprados	Input6 Itens produzidos	Input7 Pessoas Engenharia Produtos	Input8 Problemas técnicos reportados	Input9 Produtos reclamados pelos clientes	Input10 Itens reclamados pelos clientes
15 (Mar/2012)	Atual	256	185	155	38.312	16.600	21.712	40	4	59	118
	Alvo	211	166	128	38.115	16.515	21.601	35	4	42	117
	<b>Folga</b>	<b>45</b>	<b>19</b>	<b>27</b>	<b>197</b>	<b>85</b>	<b>111</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>17</b>	<b>1</b>
17 (Mai/2012)	Atual	224	184	227	74.728	31.824	42.904	38	5	90	155
	Alvo	217	150	152	71.417	30.790	40.627	32	5	69	150
	<b>Folga</b>	<b>7</b>	<b>34</b>	<b>75</b>	<b>3.311</b>	<b>1.034</b>	<b>2.277</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>21</b>	<b>5</b>
19 (Jul/2012)	Atual	213	162	149	54.624	23.328	31.296	36	5	64	198
	Alvo	205	156	143	52.596	22.462	30.134	35	4	53	128
	<b>Folga</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>2.028</b>	<b>866</b>	<b>1.162</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>70</b>
21 (Set/2012)	Atual	314	255	108	50.368	21.072	29.296	36	3	60	167
	Alvo	152	101	107	48.545	20.893	27.651	26	3	56	125
	<b>Folga</b>	<b>162</b>	<b>154</b>	<b>1</b>	<b>1.823</b>	<b>179</b>	<b>1.645</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>42</b>
22 (Out/2012)	Atual	73	71	75	21.952	9.480	12.472	35	5	63	117
	Alvo	71	52	53	21.289	9.212	12.077	26	2	43	114
	<b>Folga</b>	<b>2</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>663</b>	<b>268</b>	<b>395</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>3</b>
24 (Dez/2012)	Atual	165	29	32	9.312	4.200	5.112	33	0	30	57
	Alvo	36	25	25	9.115	4.111	5.004	24	0	22	44
	<b>Folga</b>	<b>129</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>197</b>	<b>89</b>	<b>108</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>13</b>
28 (Abr/2013)	Atual	433	141	179	60.936	31.128	29.808	27	6	54	112
	Alvo	192	127	121	54.453	27.656	26.797	24	1	34	95
	<b>Folga</b>	<b>241</b>	<b>14</b>	<b>58</b>	<b>6.483</b>	<b>3.472</b>	<b>3.011</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>17</b>
29 (Mai/2013)	Atual	185	116	131	51.720	25.264	26.456	27	4	21	35
	Alvo	163	102	100	45.503	22.227	23.276	6	1	15	31
	<b>Folga</b>	<b>22</b>	<b>14</b>	<b>31</b>	<b>6.217</b>	<b>3.037</b>	<b>3.180</b>	<b>21</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>4</b>

(Conclusão)

DMU	Valores	Input1 <i>Lead time</i> comercial	Input2 <i>Lead time</i> engenharia (esp.do pedido)	Input3 <i>Lead time</i> engenharia (conf. do produto)	Input4 <i>Part</i> <i>numbers</i>	Input5 Itens comprados	Input6 Itens produzidos	Input7 Pessoas Engenharia Produtos	Input8 Problemas técnicos reportados	Input9 Produtos reclamados pelos clientes	Input10 Itens reclamados pelos clientes
31 (Jul/2013)	Atual	220	128	126	58.560	25.488	33.072	26	4	50	142
	Alvo	174	114	115	53.468	23.272	30.196	18	2	46	89
	<b>Folga</b>	<b>46</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>5.092</b>	<b>2.216</b>	<b>2.876</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>53</b>
32 (Ago/2013)	Atual	372	91	145	47.824	20.968	26.856	27	2	43	86
	Alvo	196	86	116	45.257	19.842	25.414	20	2	38	81
	<b>Folga</b>	<b>176</b>	<b>5</b>	<b>29</b>	<b>2.567</b>	<b>1.126</b>	<b>1.442</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
37 (Jan/2014)	Atual	350	115	113	35.392	17.200	18.192	23	0	55	144
	Alvo	130	103	74	31.845	15.476	16.369	21	0	29	64
	<b>Folga</b>	<b>220</b>	<b>12</b>	<b>39</b>	<b>3.547</b>	<b>1.724</b>	<b>1.823</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>26</b>	<b>80</b>
42 (Jun/2014)	Atual	70	70	78	23.104	9.648	13.456	21	6	31	65
	Alvo	68	63	55	22.312	9.317	12.995	16	4	23	63
	<b>Folga</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>23</b>	<b>792</b>	<b>331</b>	<b>461</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>2</b>
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	<b>1.153</b>	<b>432</b>	<b>453</b>	<b>51.736</b>	<b>23.197</b>	<b>28.539</b>	<b>189</b>	<b>35</b>	<b>398</b>	<b>878</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>275</b>	<b>123</b>	<b>152</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>5</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar a Tabela 14, pode-se perceber que mesmo no projeto não modularizado as análises DEA apontam possibilidade de otimização quanto ao melhor aproveitamento dos recursos. Entende-se que essa é uma contribuição da DEA para o ambiente empresarial, visto que a análise envoltória de dados pode auxiliar a empresa em que o estudo é desenvolvido a estabelecer metas de melhoria na Engenharia de Produtos no tocante ao desenvolvimento de projetos ainda não modularizados.

Para discutir os alvos e folgas do projeto não modularizado utiliza-se como exemplo a DMU 42, que corresponde ao lote de projetos não modularizados desenvolvido no mês de junho de 2014. O total de projetos desenvolvidos (*output*) da DMU 42 são 5 projetos. No *input1*, que corresponde ao *lead time* comercial (negociação), foram utilizados 70 dias para negociar os 5 projetos de produtos. Se essa DMU fosse eficiente, poderia executar os mesmo 5 projetos com um *lead time* de negociação de 68 dias, ou seja, 2 dias a menos do que levou para realizá-los. Quanto ao *lead time* de Engenharia para especificação do produto (*input2*), foram utilizados 62 dias com um alvo de 43, ou seja, 19 dias desse recurso poderiam ter sido economizados nessa DMU. O *lead time* de Engenharia para configuração do produto (*input3*) foi executado em 70 dias para os 5 projetos. No entanto, se a DMU 42 fosse eficiente, poderia se ter desenvolvido os mesmos 5 projetos em 63 dias (com economia de 7 dias). Quanto ao *input4*, *part numbers*, a economia nessa DMU poderia contemplar 792 partes. A economia no *input5* (itens comprados) e no *input6* (itens produzidos) seria de 331 e de 461, respectivamente.

Já o número de pessoas utilizadas na Engenharia (*input7*) no mês de junho de 2014 era 21, sendo que os mesmos projetos poderiam ter sido desenvolvidos no mês com 16 pessoas, ou seja, 05 pessoas a menos. As mesmas análises podem ser efetuadas para as demais variáveis e para as demais DMU's. Quanto aos *inputs* que contemplam a dimensão da qualidade, a análise das folgas segue os mesmos padrões referidos anteriormente.

Também se efetuou uma análise agregada do total das folgas apresentadas na Tabela 14. Essa análise contempla o somatório de todas as folgas de todas as DMU's (42) analisadas no período pesquisado. Além disso, realizou-se uma avaliação da média das folgas de cada DMU. Essa análise da média pode mostrar o quanto, em média, poderia ser economizado de cada variável em cada projeto. Por exemplo, no *input1*, pode-se considerar uma economia média mensal de 6 dias por



cada projeto desenvolvido. No *input2*, a economia média mensal seria de 2 dias por projeto e, assim, sucessivamente, para todos os recursos.

Para finalizar, segundo a opinião dos especialistas, antes da implementação da modularização na Engenharia de Produtos, tal departamento era considerado o gargalo da empresa. Após a modularização, a Engenharia de Produtos elevou a sua capacidade de elaboração de projetos, não sendo mais considerada a restrição da empresa. Essa percepção, aliada à redução dos recursos utilizados na Engenharia, está alinhada aos resultados encontrados neste trabalho.

### 5.1.3 Análise comparativa do projeto modularizado com o projeto não modularizado na Engenharia de Produtos

Para possibilitar uma melhor compreensão das avaliações efetuadas na Engenharia de Produtos, realiza-se uma análise comparativa entre os resultados de eficiência obtidos em relação aos projetos modularizado e não modularizado. Nessa comparação apresenta-se somente a eficiência compostas, que é base para a investigação deste trabalho. As demais eficiências (padrão, fronteira invertida e composta\*) são omitidas da análise. Nesse sentido, na Tabela 15 pode-se observar os escores de eficiência de cada DMU, bem como os cálculos da média e do desvio padrão e os escores mínimo e máximo de eficiência obtidos na análise longitudinal do produto modularizado e do produto não modularizado. As DMU's estão segregadas pelos períodos anterior, de transição e posterior à modularização.

Tabela 15: Eficiências do projeto modularizado e não modularizado

(Continua)

DMU	Mês/Ano	Eficiência composta do projeto modularizado	Eficiência composta do projeto não modularizado
DMU1	Jan/11	0,305	0,461
DMU2	Fev/11	0,285	0,541
DMU3	Mar/11	0,324	0,475
DMU4	Abr/11	0,518	0,500
DMU5	Mai/11	0,512	0,553
DMU6	Jun/11	0,501	0,571
DMU7	Jul/11	0,522	0,524
DMU8	Ago/11	0,410	0,550
DMU9	Set/11	0,455	0,535
DMU10	Out/11	0,505	0,534
DMU11	Nov/11	0,314	0,591
DMU12	Dez/11	0,386	0,561

				Conclusão)
DMU	Mês/Ano	Eficiência composta do projeto modularizado	Eficiência composta do projeto não modularizado	
DMU13	Jan/12	0,500	0,529	
DMU14	Fev/12	0,506	0,433	
DMU15	Mar/12	0,500	0,497	
DMU16	Abr/12	0,432	0,523	
DMU17	Mai/12	0,500	0,524	
DMU18	Jun/12	0,487	0,500	
DMU19	Jul/12	0,524	0,531	
DMU20	Ago/12	0,351	0,500	
DMU21	Set/12	0,353	0,496	
DMU22	Out/12	0,326	0,486	
DMU23	Nov/12	0,390	0,500	
DMU24	Dez/12	0,288	0,489	
DMU25	Jan/13	0,324	0,548	
DMU26	Fev/13	0,279	0,500	
DMU27	Mar/13	0,470	0,500	
DMU28	Abr/13	0,417	0,449	
DMU29	Mai/13	0,556	0,440	
DMU30	Jun/13	0,364	0,559	
DMU31	Jul/13	0,451	0,481	
DMU32	Ago/13	0,466	0,492	
DMU33	Set/13	0,534	0,500	
DMU34	Out/13	0,494	0,500	
<b>Eficiência média (a/t)</b>		<b>0,428</b>	<b>0,511</b>	
<b>Desvio padrão (a/t)</b>		<b>0,087</b>	<b>0,037</b>	
<b>Eficiência mínima (a/t)</b>		<b>0,279</b>	<b>0,433</b>	
<b>Eficiência máxima (a/t)</b>		<b>0,556</b>	<b>0,591</b>	
DMU35	Nov/13	0,751	0,500	
DMU36	Dez/13	0,782	0,521	
DMU37	Jan/14	0,754	0,450	
DMU38	Fev/14	0,750	0,553	
DMU39	Mar/14	0,492	0,504	
DMU40	Abr/14	0,561	0,541	
DMU41	Mai/14	0,761	0,557	
DMU42	Jun/14	0,743	0,483	
<b>Eficiência média (d)</b>		<b>0,700</b>	<b>0,513</b>	
<b>Desvio padrão (d)</b>		<b>0,109</b>	<b>0,037</b>	
<b>Eficiência mínima (d)</b>		<b>0,492</b>	<b>0,450</b>	
<b>Eficiência máxima (d)</b>		<b>0,782</b>	<b>0,514</b>	
<b>Eficiência média geral</b>		<b>0,480</b>	<b>0,512</b>	
<b>Desvio padrão geral</b>		<b>0,140</b>	<b>0,037</b>	
<b>Eficiência mínima geral</b>		<b>0,279</b>	<b>0,433</b>	
<b>Eficiência máxima geral</b>		<b>0,782</b>	<b>0,591</b>	

## LEGENDA:

	Período anterior à modularização
	Período de transição
	Período posterior à modularização

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 15, pode-se observar que antes da modularização a eficiência média do projeto modularizado tem um desempenho inferior ao do projeto não modularizado. Entretanto, ao se avaliar o período posterior à modularização,

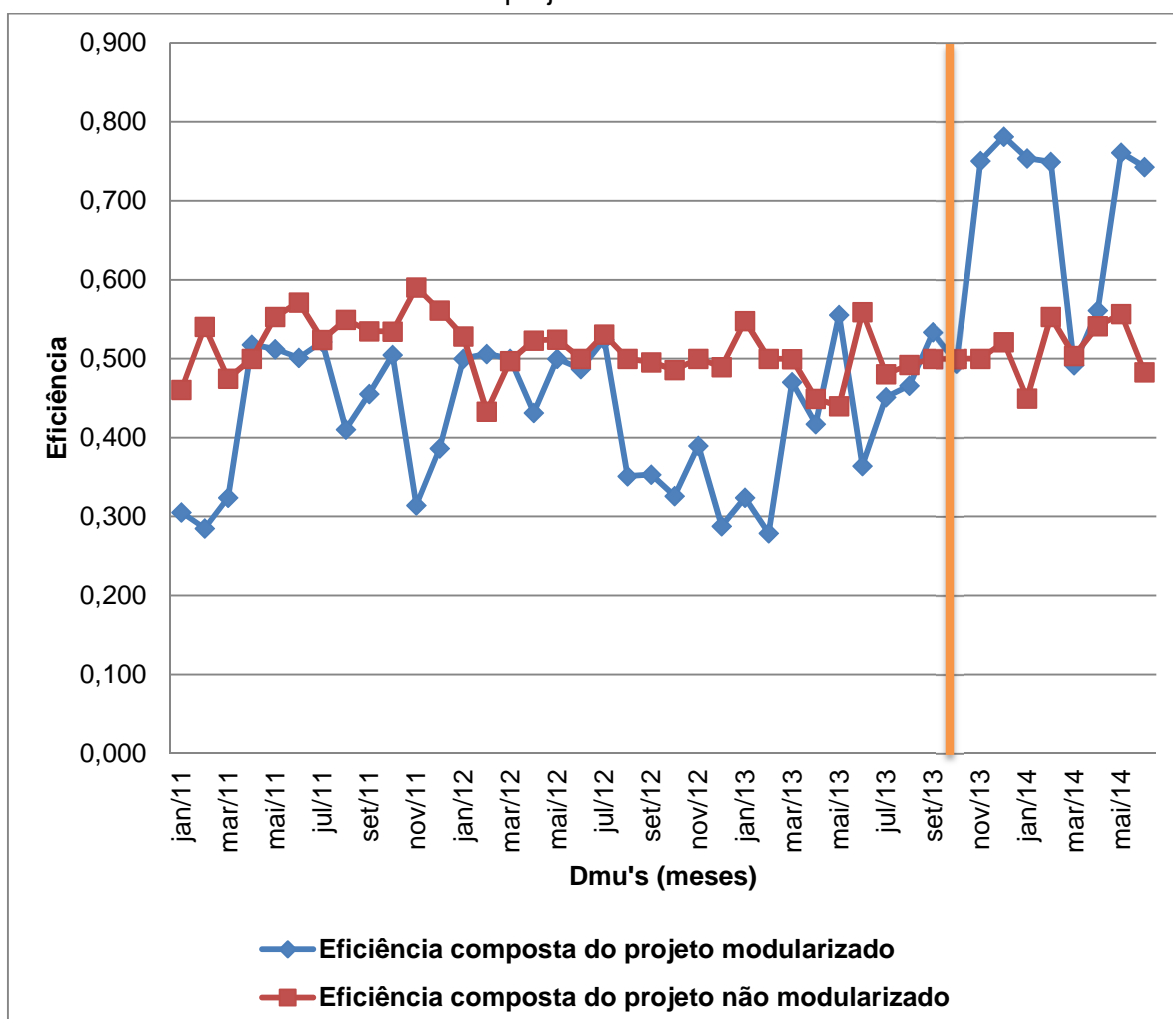
percebe-se que o projeto modularizado adquire eficiência maior do que a do produto não modularizado, ou seja, houve uma inversão no desempenho dos projetos. Quanto ao desempenho geral dos projetos considerando os 42 meses consecutivos, observa-se que o projeto modularizado apresenta uma eficiência média de 0,480 com desvio padrão de 0,140. No que se refere ao produto não modularizado, a eficiência média é de 0,512 com desvio padrão de 0,037.

No entanto, entende-se que na eficiência máxima e eficiência mínima de cada análise temporal há indicativos de que a modularização auxiliou a empresa a melhorar o desempenho das DMU' no projeto modularizado. No projeto modularizado observa-se uma eficiência mínima de 0,279, referente à DMU 26 (Fev/2013), que se situa no período anterior à modularização. A eficiência máxima do projeto modularizado foi de 0,782, referente à DMU 36 (Dez/2013), que está contemplada no período posterior à modularização. Percebe-se que todas as eficiências com escores superiores a 0,70 também estão localizadas no período posterior à modularização. Essas diferenças nos escores de eficiência podem ajudar a explicar a amplitude do auxílio que a modularização proporcionou na melhora da eficiência do produto modularizado.

Quanto às eficiências máximas e mínimas do projeto não modularizado, pode-se perceber os seguintes resultados: i) eficiência mínima 0,433 na DMU14 (Fev/2012); e ii) eficiência máxima 0,591 na DMU11 (Nov/2011). Nesse caso, observa-se que houve uma variação menor entre as eficiências e que não foram apontadas diferenças de amplitudes relevantes ao longo do tempo. Outro aspecto a ser considerado é que ambas as eficiências (mínima e máxima) estão concentradas no período anterior à modularização do projeto utilizado como base para esta análise.

Procurou-se ilustrar de forma gráfica (Gráfico 3) o comparativo entre as eficiências compostas do projeto modularizado e do projeto não modularizado (apresentado na Tabela 15). Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores de eficiência de cada análise ao longo do tempo. Nessa avaliação é segregado o período de transição do projeto modularizado, ilustrado pelo traço laranja, para melhorar a compreensão da evolução de cada série temporal de eficiência e facilitar a comparação.

Gráfico 3: Eficiências do projeto modularizado e não modularizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados observados no Gráfico 3, é possível perceber a diferença entre o projeto modularizado e o projeto não modularizado. O crescimento da eficiência do projeto modularizado permite que a linha de tendência linear da eficiência apresente elevação ao longo do tempo. No entanto, é possível visualizar efeitos diferentes em relação à eficiência do projeto não modularizado, considerando que as DMU's com melhor desempenho na sequência temporal estão concentradas no período anterior à modularização (ano de 2011). Ao contrário do projeto modularizado, a linha de tendência do projeto não modularizado apresenta tendência de queda ao longo do tempo.

Os recursos da área de Engenharia de Produtos são compartilhados, ou seja, qualquer ação de melhoria efetuada pela Engenharia afeta ambos os projetos (modularizado e não modularizado) uniformemente (automação, por exemplo).

Conforme discussão com os especialistas do processo, detectou-se que não houve nenhuma ação que priorizasse o projeto modularizado em detrimento do projeto não modularizado (priorização, por exemplo).

O aumento da eficiência percebida no projeto modularizado e o não aumento da eficiência do projeto não modularizado sugerem que existem evidências de efeitos positivos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos. Nas próximas seções, são efetuados testes estatísticos para validar ou refutar a hipótese de que a melhoria de eficiência percebida pode ser atribuída à implementação da modularização.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO DA MODULARIZAÇÃO NA EFICIÊNCIA DA ENGENHARIA DE PRODUTOS

Nesta seção, são caracterizados os efeitos da modularização na unidade de contexto de análise Engenharia de Produtos. Para efetuar tal caracterização, desenvolveu-se o teste de hipóteses para confirmar se existem ou não evidências dos efeitos da modularização na eficiência técnica da Engenharia de Produtos. Inicialmente, os escores de eficiência foram divididos em grupos, contemplando dois períodos: i) anterior à modularização; e ii) posterior à modularização. O período anterior à modularização contempla as DMU's de 1 a 34, correspondentes aos meses de janeiro de 2011 a outubro de 2013 (incluído o período de transição). O período posterior à modularização contempla as DMU's de 35 a 42, correspondentes ao mês de novembro de 2013 a junho de 2014. Posteriormente, buscou-se validar os pressupostos para aplicação da ANOVA com os testes de Shapiro Wilk e Levene. Finalmente, o teste ANOVA foi aplicado para verificar se existem diferenças significativas entre as médias das eficiência dos grupos definidos.

### 5.2.1 Hipóteses testadas na Engenharia de Produtos

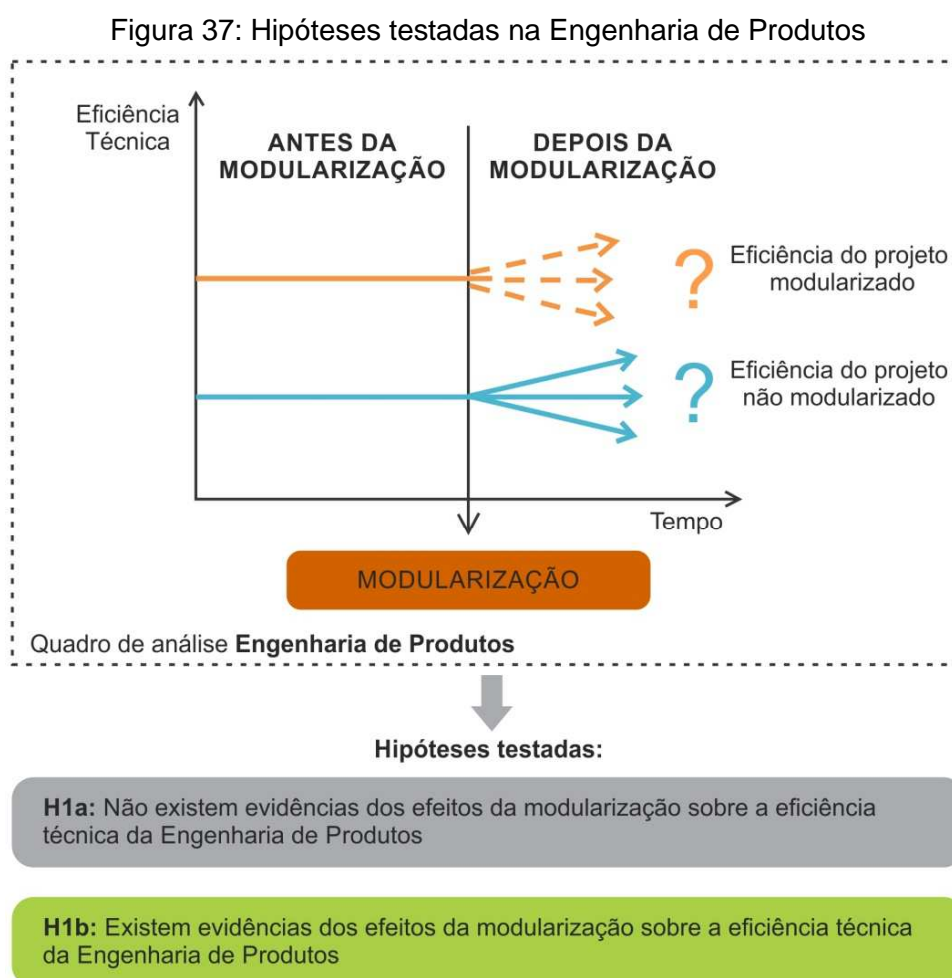
A partir dos escores de eficiência dos projetos modularizado e não modularizado, buscou-se desenvolver as hipóteses a serem testadas para rejeitar ou

aceitar estatisticamente as evidências dos efeitos da modularização sobre a Engenharia de Produtos. Nesse sentido, as seguintes hipóteses foram testadas:

**H1a (hipótese nula):** Não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos.

**H1b (hipótese alternativa):** Existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos.

A Figura 37 ilustra o esquema das hipóteses testadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme análises apresentadas anteriormente, existem indícios de que a eficiência das DMU's do projeto modularizado melhorou depois da modularização. Também existem indícios de que as DMU's do projeto não modularizado não

apresentaram os mesmos efeitos (melhoria na eficiência). Entende-se que esse fato corrobora atribuir a melhoria da eficiência à modularização. No entanto, os escores de eficiência foram divididos em grupos contemplando os períodos anterior e posterior à modularização para testar se existem diferenças significativas nas médias das eficiências do projeto modularizado e para verificar se não existem diferenças significativas nas médias das eficiências do projeto não modularizado. Os testes estatísticos realizados são apresentados na próxima seção.

### 5.2.2 Análises estatísticas dos efeitos da modularização na Engenharia de Produtos

Sugere-se que os dados utilizados para a avaliação da ANOVA obedeam a uma distribuição normal (teste de normalidade) e que sejam homogêneos (homogeneidade). Os dados utilizados para avaliação da ANOVA foram os escores longitudinais de eficiência composta obtidos a partir do projeto modularizado e do projeto não modularizado. Para verificar a normalidade dos dados utilizou-se o teste Shapiro Wilk, e para verificar a homogeneidade, o teste de Levene. Os testes para validação dos pressupostos da ANOVA são sintetizados na Tabela 16:

Tabela 16: Teste dos pressupostos para uso da ANOVA na Engenharia de Produtos

Período	Teste Shapiro Wilk (Sign.)	Teste Levene (Sign.)
Dados do projeto modularizado (Anterior)	0,639	-
Dados do projeto modularizado (Posterior)	0,220	-
Amostra total dos dados do projeto modularizado	-	0,566
Dados do projeto não modularizado (Anterior)	0,596	-
Dados do projeto não modularizado (Posterior)	0,703	-
Amostra total dos dados do projeto não modularizado	-	0,958

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 16, percebe-se que, quanto ao projeto modularizado, o teste Shapiro Wilk, no que se refere aos dados da eficiência composta tanto do período anterior quanto do período posterior à modularização apresenta um nível de significância maior que 0,05 (anterior *Sign.* = 0,639 e posterior *Sign.* = 0,220). Dessa forma, pode-se aceitar a hipótese de que os dados constituem uma distribuição

normal. Quanto ao teste de Levene, o resultado obtido ( $Sig.= 0,566$ ) também permite aceitar a hipótese de que os dados são homogêneos.

Quanto ao projeto não modularizado, o teste Shapiro Wilk (anterior  $Sign. = 0,596$  e posterior  $Sign.= 0,703$ ) permite aceitar a hipótese de que os dados seguem uma distribuição normal. Quanto ao teste de Levene, o resultados obtido ( $Sign.= 0,958$ ) permite aceitar a hipótese de que a população é homogênea. Dessa forma, os pressupostos para utilização da ANOVA para comparar as médias das eficiências compostas no projeto modularizado e não modularizado foram cumpridos, e o teste estatístico ANOVA foi realizado. O teste ANOVA para avaliar se existem diferenças entre distintos grupos de eficiência também foi empregado na pesquisa de Swink, Talluri e Pandejpong (2006), em estudo utilizando a técnica da análise envoltória de dados (DEA) para avaliação da eficiência do desenvolvimento de produtos. Os cálculos referentes ao teste ANOVA são mostrados na Tabela 17:

Tabela 17: Teste ANOVA na Engenharia de Produtos

Período	Média da eficiência composta do projeto modularizado	Média da eficiência composta do projeto não modularizado
Anterior à modularização	0,428	0,511
Posterior à modularização	0,700	0,513
Diferença das eficiências (amplitude)	0,272	0,002
<i>F</i>	57,6881	0,032214
<i>p-value</i>	0,0000000028	0,8584656

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados obtidos na Tabela 17 quanto ao cálculo da ANOVA mostram que no projeto modularizado a média da eficiência composta da Engenharia de Produto no período anterior à modularização foi de 0,428. No período posterior à modularização a eficiência composta aumentou para 0,70. Nesse sentido, percebe-se um aumento de 0,272 na eficiência da Engenharia na comparação dos períodos. O cálculo da ANOVA também retorna o valor de *F*. Quanto maior é o escore do *F*, pode-se afirmar que mais significativo é o *p-value* do teste ANOVA efetuado. O escore de *F* das médias dos períodos consideradas no projeto modularizado, que é de 57,6881, e o *p-value* de 0,0000000028, permitem afirmar que a diferença detectada é significativa. Dessa forma, é possível rejeitar a hipótese **H1a** (não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a



eficiência técnica da Engenharia de Produtos) e aceitar a hipótese **H1b** (existem evidências do efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos).

Quanto ao projeto não modularizado, foram efetuados os mesmo cálculos. Percebe-se que a eficiência no período anterior à modularização foi de 0,511 e no período posterior foi de 0,513, ou seja, houve uma variação de 0,002. No entanto, o  $F$  de 0,032214 e o  $p$ -value de 0,8584656 não permitem afirmar que houve diferença significativa entre as médias dos períodos. Nesse sentido, entende-se que a eficiência do projeto não modularizado não apresentou variação significativa ao longo dos períodos pré e pós-modularização. Essa constatação evidencia que a melhora na eficiência ao longo do tempo observada na Engenharia de Produtos pode ser atribuída à implementação da modularização. Na próxima seção, apresenta-se os cálculos do dimensionamento dos efeitos da modularização na Engenharia de produtos.

### 5.3 DIMENSIONAMENTO DOS EFEITOS DA MODULARIZAÇÃO NA ENGENHARIA DE PRODUTOS

Com a técnica da análise envoltória de dados (DEA) e com a ANOVA verificou-se o efeito da modularização na Engenharia de Produtos da empresa estudada. No entanto, não foi possível dimensionar com precisão a amplitude do efeito observado, visto que não é possível visualizar como se comportaria a eficiência no período de novembro de 2013 a julho de 2014 (período posterior à modularização) se a empresa não tivesse implementado a modularização na unidade de análise estudada (Engenharia de Produtos). Para efetuar tal dimensionamento, analisa-se o impacto causal provocado por um tratamento com a utilização da técnica *CausalImpact*.

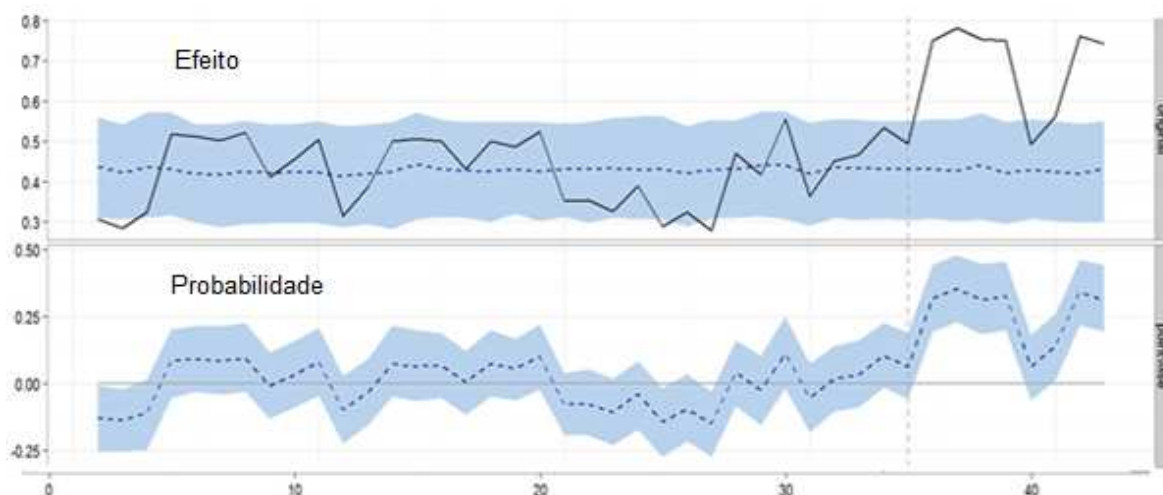
O impacto causal de um tratamento em uma série temporal pode ser entendido como a diferença entre o valor de resposta observado e o valor que seria obtido sem a utilização do tratamento. (BRODERSEN et al., 2014). Neste trabalho, o tratamento pode ser entendido como a modularização. Dessa forma, o impacto causal é o resultado dos escores de eficiência obtidos após a implementação da modularização subtraídos (-) os escores de eficiência que seriam obtidos se a

modularização não tivesse sido implementada na Engenharia de Produtos. Tem-se que os escores de eficiência obtidos após a implementação da modularização são conhecidos, pois foram calculados com a utilização da DEA. No entanto, os escores de eficiência que seriam obtidos caso a modularização não tivesse sido implementada não são conhecidos, podendo ser calculados pela técnica *CausallImpact*.

Para utilizar o *CausallImpact* é necessário um conjunto de dados relativos a uma série temporal de controle. A série temporal de controle é um conjunto de dados que não sofreu nenhum tratamento. Nesta pesquisa, a série de controle é representada pela eficiência ao longo do tempo do projeto não modularizado. Além da série temporal de controle, a técnica requer uma série temporal de resposta, ou seja, um conjunto de dados que sofreu um tratamento. Nesta pesquisa, a série temporal de resposta é representada pela eficiência do projeto modularizado ao longo do tempo. Destaca-se que o tratamento pode ser compreendido como a modularização.

Assim, as séries temporais relativas à eficiência do projeto modularizado e não modularizado ao longo do tempo foram organizadas e inseridas no *software R*. Os cálculos foram retornados com a previsão do *confractual*, ou seja, considerando como a métrica de resposta (eficiência do projeto modularizado) teria evoluído ao longo do tempo sem a modularização. Com a variável de controle (série não afetada pelo tratamento) e a variável de resposta (série afetada pelo tratamento) e também com o histórico da variável de resposta no período anterior ao tratamento, a técnica *CausallImpact* efetua cálculos estatísticos que incluem o efeito médio absoluto e o efeito relativo provocado pela intervenção. (BRODERSEN et al., 2014). Esse procedimento pode auxiliar os pesquisadores e gestores a deixar de concluir equivocadamente que houve algum efeito ocasionado por uma intervenção quando na verdade não houve efeito algum. (BRODERSEN et al., 2014). A Figura 38 evidencia o efeito provocado pela modularização na eficiência técnica da Engenharia de Produtos, considerando as 42 DMU's analisadas.

Figura 38: Efeito da modularização na Engenharia de Produtos



Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Figura 38, deve-se considerar que o comportamento “original” contempla o comportamento atual da eficiência técnica do projeto modularizado e a projeção do comportamento em um cenário de não implantação da modularização. O comportamento atual é considerado pela linha **preta**, e se trata do mesmo comportamento da eficiência apresentado em gráficos anteriores. A linha pontilhada entre as DMU's 30 e 40 (mais precisamente na DMU 34) representa o ponto em que a série sofreu o tratamento, ou seja, em que foi modularizada. A linha sombreada em azul representa as variações da eficiência ao longo do tempo considerando o período anterior à modularização. A linha azul pontilhada representa o comportamento médio da série de eficiência anterior à modularização e estima o comportamento posterior.

Dessa forma, ao analisar o comportamento “original” da série temporal considerando a estimativa do período posterior à modularização, deve-se considerar que o comportamento da eficiência atual (linha preta), que está acima da parte sombreada em azul, é o ganho de eficiência obtido com a implementação da modularização na Engenharia de Produtos. Caso a modularização não tivesse sido implementada, a variação da eficiência do período posterior à modularização ficaria com as variações dentro da linha sombreada em azul, e não acima como observado.

Quanto ao comportamento da série de eficiência da Figura 38, como “*pointwise*” a técnica estima o comportamento do efeito em um intervalo de

confiança de 95%. Dessa forma, a linha sombreada em azul mostra como seria a variação da eficiência dentro desse intervalo. Na Tabela 18, está sintetizada a quantificação dos efeitos da implementação da modularização na Engenharia de Produtos.

Tabela 18: Quantificação do efeito da modularização na Engenharia de Produtos

<b>Comportamento da eficiência</b>	<b>Eficiência média</b>
Cenário atual (modularizado)	0,700
Cenário contractual (caso não modularizasse)	0,430
Efeito absoluto	0,270
Efeito relativo	62,79%
Probabilidade do efeito causal	99,88901

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar os resultados dispostos na Tabela 18, pode-se observar o cenário atual, ou seja, a média da eficiência do projeto modularizado no período posterior à modularização. A média da eficiência composta no período posterior é de 0,70. Também é possível observar o cenário contractual do período posterior à modularização, ou seja, como seria o comportamento da eficiência composta da Engenharia de Produtos se a modularização não tivesse sido implementada.

Nesse sentido, se a modularização não tivesse sido implementada, a média de eficiência composta do período considerado posterior à modularização seria de 0,43. Dessa forma, conclui-se que com a implementação da modularização na Engenharia de Produtos houve um incremento de 0,27 na eficiência composta da unidade de contexto de análise. Também é possível observar o efeito relativo, que contempla um aumento de 62,79%. Destaca-se que a probabilidade do efeito causal foi de 99,88901%, ou seja, acima dos 95% estipulados como premissa para o modelo. Após realizadas as análises da Engenharia de Produto, a próxima seção introduz as análises relativas ao Processo Produtivo.

#### 5.4 ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS NO PROCESSO PRODUTIVO

A análise relativa ao Processo Produtivo foi segregada entre o produto modularizado (seção 5.4.1) e o não modularizado (seção 5.4.2). Posteriormente, na seção 5.4.3, efetua-se uma análise comparativa entre os produtos.

#### 5.4.1 Comportamento da eficiência do produto modularizado no Processo Produtivo

Na Tabela 19 estão, em ordem cronológica, os 42 meses que representam os 42 lotes do produto modularizado produzidos ao longo de três anos e seis meses consecutivos (janeiro de 2011 a junho de 2014). Nesse sentido, apresentam-se os escores referentes aos cálculos da eficiência padrão, fronteira invertida, eficiência composta e eficiência composta\* (normalizada). Os cálculos verificam o desempenho da eficiência de cada DMU, e os escores de eficiência composta (destacados em **negrito**) são usados nas análises. As DMU's estão segregadas nos períodos anterior à modularização, de transição, e posterior à modularização.

Tabela 19: Eficiências do produto modularizado

(Continua)

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Fronteira invertida	Eficiência Composta	Eficiência Composta*
DMU1	Jan/11	0,919	1,000	<b>0,459</b>	0,777
DMU2	Fev/11	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU3	Mar/11	1,000	0,969	<b>0,516</b>	0,872
DMU4	Abr/11	1,000	0,996	<b>0,502</b>	0,850
DMU5	Mai/11	1,000	0,951	<b>0,525</b>	0,888
DMU6	Jun/11	0,943	1,000	<b>0,472</b>	0,798
DMU7	Jul/11	1,000	0,964	<b>0,518</b>	0,877
DMU8	Ago/11	1,000	0,940	<b>0,530</b>	0,897
DMU9	Set/11	1,000	0,971	<b>0,514</b>	0,870
DMU10	Out/11	1,000	0,945	<b>0,528</b>	0,893
DMU11	Nov/11	1,000	0,961	<b>0,519</b>	0,879
DMU12	Dez/11	0,990	0,940	<b>0,525</b>	0,889
DMU13	Jan/12	1,000	0,999	<b>0,501</b>	0,847
DMU14	Fev/12	0,976	1,000	<b>0,488</b>	0,826
DMU15	Mar/12	0,995	0,966	<b>0,515</b>	0,871
DMU16	Abr/12	0,928	0,962	<b>0,483</b>	0,817
DMU17	Mai/12	1,000	0,959	<b>0,521</b>	0,881
DMU18	Jun/12	1,000	0,964	<b>0,518</b>	0,876
DMU19	Jul/12	1,000	0,990	<b>0,505</b>	0,854
DMU20	Ago/12	1,000	0,968	<b>0,516</b>	0,873
DMU21	Set/12	1,000	0,980	<b>0,510</b>	0,863
DMU22	Out/12	0,926	1,000	<b>0,463</b>	0,784
DMU23	Nov/12	0,946	1,000	<b>0,473</b>	0,801
DMU24	Dez/12	0,900	1,000	<b>0,450</b>	0,761
DMU25	Jan/13	0,867	1,000	<b>0,433</b>	0,733
DMU26	Fev/13	0,936	0,995	<b>0,470</b>	0,796
DMU27	Mar/13	1,000	0,999	<b>0,501</b>	0,847
DMU28	Abr/13	1,000	0,946	<b>0,527</b>	0,892
DMU29	Mai/13	1,000	0,909	<b>0,546</b>	0,923
DMU30	Jun/13	1,000	0,899	<b>0,551</b>	0,932
DMU31	Jul/13	0,876	1,000	<b>0,438</b>	0,741
DMU32	Ago/13	1,000	0,959	<b>0,521</b>	0,881

(Conclusão)					
DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Fronteira invertida	Eficiência Composta	Eficiência Composta*
DMU33	Set/13	1,000	0,958	<b>0,521</b>	0,882
DMU34	Out/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU35	Nov/13	1,000	0,818	<b>0,591</b>	1,000
DMU36	Dez/13	1,000	0,872	<b>0,564</b>	0,955
DMU37	Jan/14	1,000	0,981	<b>0,509</b>	0,862
DMU38	Fev/14	1,000	0,822	<b>0,589</b>	0,997
DMU39	Mar/14	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU40	Abr/14	1,000	0,976	<b>0,512</b>	0,866
DMU41	Mai/14	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846
DMU42	Jun/14	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,846

## LEGENDA:

	Período anterior à modularização
	Período de transição
	Período posterior à modularização

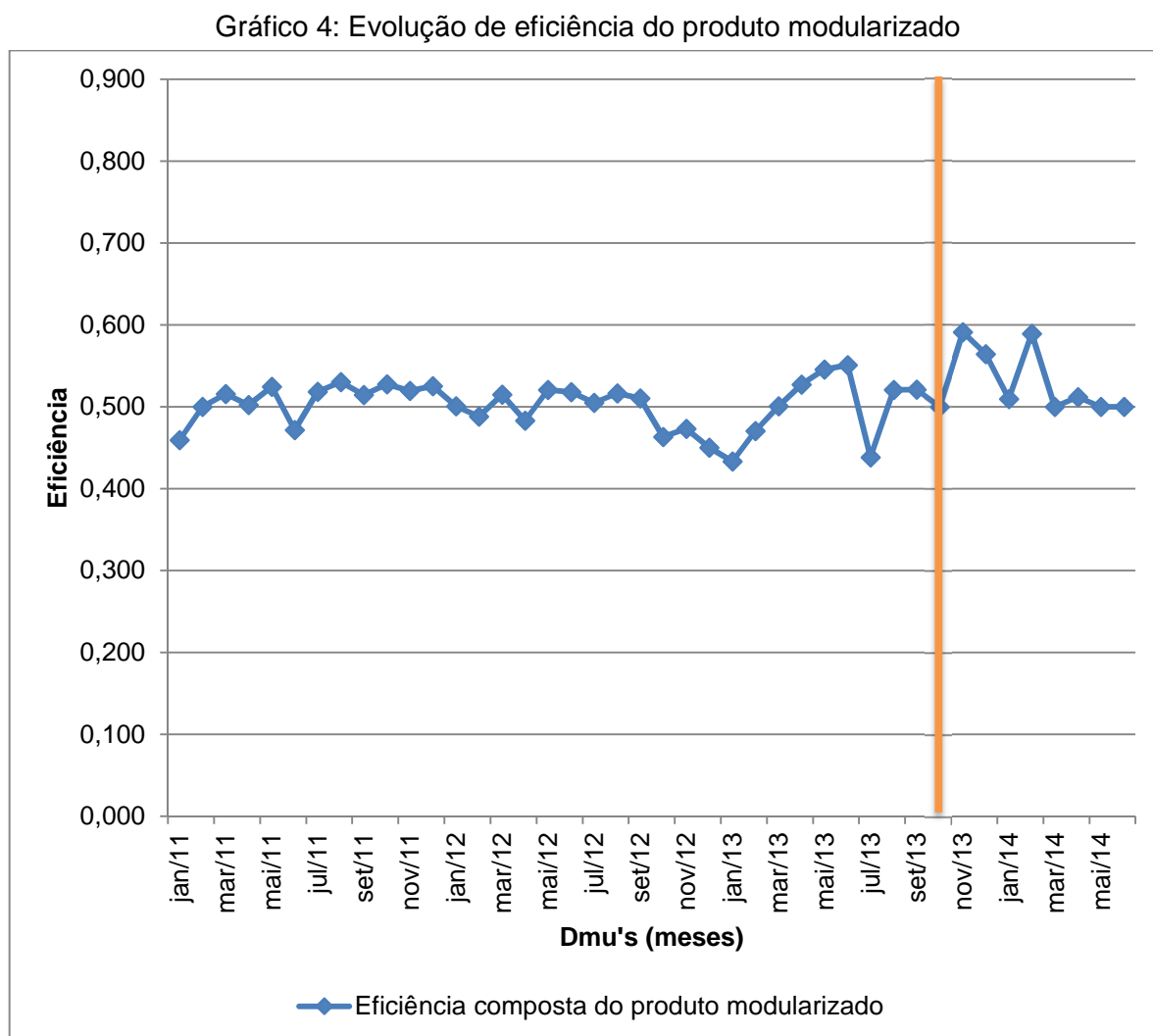
Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 19, deve-se considerar que quanto melhor for o desempenho da DMU, melhor será o escore da eficiência composta resultante do cálculo efetuado na análise envoltória de dados. Nesse sentido, observa-se que o melhor desempenho de eficiência pode ser atribuído às DMU's 35 (nov/2013), 38 (fev/2014) e 36 (dez/ 2013). Observa-se que as 3 DMU's com melhor desempenho em toda série temporal estão localizadas na área verde da Tabela 19, ou seja, no período em que o produto foi produzido de forma modular.

No entanto, observa-se DMU's com desempenho superior também no período anterior à modularização (área em cor cinza), como por exemplo as DMU's 28 (Abr/2013), 29 (Mai/2013) e 30 (Jun/2013). Esses desempenhos de DMU's com escores de eficiência superiores em período anterior à modularização sugerem que os efeitos da modularização sobre o Processo Produtivo apresentam-se em menor escala do que os efeitos observados anteriormente na Engenharia de Produtos. Conforme os especialistas do processo, o potencial de melhorias proporcionadas pela modularização ainda não foi explorado na sua totalidade no que se refere ao Processo Produtivo. Outro aspecto discutido foi que o foco da modularização não se concentra em reduzir o consumo dos principais materiais utilizados no processo e colocados como variáveis no modelo. Dessa forma, não houve redução de consumo ao longo do tempo, o que pode ter contribuído para mitigar os efeitos percebidos no modelo do Processo Produtivo.

Procurou-se ilustrar de forma gráfica (Gráfico 4) os dados referente à eficiência composta do produto modularizado (dados apresentados da Tabela 19).

Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores de eficiência ao longo do tempo. Para uma melhor compreensão da evolução da eficiência, essa avaliação segrega o período de transição, que é ilustrado pelo traço laranja.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 4, é possível visualizar uma tendência linear de evolução da eficiência no período posterior à modularização. Se contemplado o período anterior à modularização, são percebidas variações menores de janeiro de 2011 a julho de 2012. Houve redução no desempenho das DMU's relativas ao segundo semestre de 2012 e crescimento em 2013. No entanto, após a modularização existem indicativos de melhora nos escores de eficiência, o que, entretanto, não é constante. Segundo os especialistas, estão sendo empregados esforços no Processo Produtivo para alcançar potenciais melhorias proporcionadas

pela modularização que ainda não são exploradas na totalidade pela Produção. Um exemplo citado é a busca pelo compartilhamento de módulos entre os produtos. Outro aspecto citado é que a modularização facilita a terceirização de módulos completos, possibilitando que a organização divida as dificuldades impostas pela sazonalidade com os fornecedores. Essa constatação remete ao arranjo produtivo conhecido como consórcio modular. O consórcio modular não é utilizado atualmente na unidade analisada.

A Tabela 20 apresenta os valores dos alvos com os respectivos cálculos das folgas dos recursos do Processo Produtivo. Entende-se como folga o consumo atual de cada recurso subtraído o alvo. (FERREIRA; GOMES, 2009). Os dados apresentados na Tabela 20 são referentes às DMU's consideradas ineficientes nesta análise DEA, ou seja as que poderiam ter consumido menos recursos, considerando que o modelo DEA definido é orientado a *input*. Dessa forma, as DMU's eficientes, ou seja, as que executaram as melhores práticas e consumiram os recursos de forma adequada, foram omitidas da avaliação. As DMU's consideradas ineficientes estão localizadas no período anterior à modularização.



Tabela 20: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do produto modularizado

(Continua)

DMU	Valores	Input1 Alumínio	Input2 Fibra	Input3 Passadeira	Input4 Tecido	Input5 Vidros	Input6 <i>Lead time</i> Fabricação	Input7 <i>Lead time</i> Montagem	Input8 Itens comprados	Input9 Itens produzidos	Input10 Pessoas Produção	Input11 Problemas técnicos reportados	Input12 Produtos Reclamados pelos clientes
1 (Jan/2011)	Atual	6.723	665	656	3.014	626	61	371	31.464	59.556	807	1	48
	Alvo	6.178	572	623	2.664	610	56	69	28.849	54.730	154	1	6
	<b>Folga</b>	<b>545</b>	<b>93</b>	<b>33</b>	<b>350</b>	<b>16</b>	<b>5</b>	<b>302</b>	<b>2.615</b>	<b>4.826</b>	<b>653</b>	<b>0</b>	<b>42</b>
6 (Jun/2011)	Atual	8.090	768	754	3.449	697	79	400	41.632	78.240	840	0	86
	Alvo	7.132	647	670	3.253	677	75	271	39.128	73.802	342	0	20
	<b>Folga</b>	<b>958</b>	<b>121</b>	<b>84</b>	<b>196</b>	<b>20</b>	<b>4</b>	<b>129</b>	<b>2.504</b>	<b>4.438</b>	<b>498</b>	<b>0</b>	<b>66</b>
12 (Dez/2011)	Atual	23.089	2.260	2.233	10.506	2.136	221	1.273	115.260	226.816	900	3	65
	Alvo	22.868	2.146	2.212	9.571	2.107	209	1.261	103.460	224.641	569	2	36
	<b>Folga</b>	<b>221</b>	<b>114</b>	<b>21</b>	<b>935</b>	<b>29</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>11.800</b>	<b>2.175</b>	<b>331</b>	<b>1</b>	<b>29</b>
14 (Fev/2012)	Atual	12.717	1.176	1.197	5.200	1.149	132	649	67.324	126.428	700	0	39
	Alvo	12.264	1.148	1.169	5.077	1.064	114	266	61.980	121.792	528	0	35
	<b>Folga</b>	<b>453</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>123</b>	<b>85</b>	<b>18</b>	<b>383</b>	<b>5.344</b>	<b>4.636</b>	<b>172</b>	<b>0</b>	<b>4</b>
15 (Mar/2012)	Atual	20.161	2.069	1.975	9.572	1.865	214	1.147	107.108	207.552	698	2	37
	Alvo	20.068	1.899	1.966	8.265	1.848	189	1.142	88.429	202.253	541	2	37
	<b>Folga</b>	<b>93</b>	<b>170</b>	<b>9</b>	<b>1.307</b>	<b>17</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>18.679</b>	<b>5.299</b>	<b>157</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
16 (Abr/2012)	Atual	13.261	1.444	1.498	6.139	1.440	144	764	73.944	146.524	689	2	49
	Alvo	12.977	1.341	1.391	5.700	1.337	134	623	59.088	136.037	406	2	25
	<b>Folga</b>	<b>284</b>	<b>103</b>	<b>107</b>	<b>439</b>	<b>103</b>	<b>10</b>	<b>141</b>	<b>14.856</b>	<b>10.487</b>	<b>283</b>	<b>0</b>	<b>24</b>
22 (Out/2012)	Atual	15.292	1.330	1.429	6.223	1.364	151	793	74.904	144.632	622	13	55
	Alvo	13.138	1.232	1.323	4.795	1.263	137	647	45.971	133.954	427	3	32
	<b>Folga</b>	<b>2.154</b>	<b>98</b>	<b>106</b>	<b>1.428</b>	<b>101</b>	<b>14</b>	<b>146</b>	<b>28.933</b>	<b>10.678</b>	<b>195</b>	<b>10</b>	<b>23</b>

(Conclusão)

DMU	Valores	Input1 Alumínio	Input2 Fibra	Input3 Passadeira	Input4 Tecido	Input5 Vidros	Input6 Lead time Fabricação	Input7 Lead time Montagem	Input8 Itens comprados	Input9 Itens produzidos	Input10 Pessoas Produção	Input11 Problemas técnicos reportados	Input12 Produtos Reclamados pelos clientes
23 (Nov/2012)	Atual	7.409	768	713	3.016	691	79	403	40.324	75.752	610	0	35
	Alvo	6.498	568	634	2.855	616	73	381	37.484	71.290	421	0	25
	<b>Folga</b>	<b>911</b>	<b>200</b>	<b>79</b>	<b>161</b>	<b>75</b>	<b>6</b>	<b>22</b>	<b>2.840</b>	<b>4.462</b>	<b>189</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
24 (Dez/2012)	Atual	1.942	189	190	821	172	20	110	11.660	21.220	601	1	23
	Alvo	1.748	130	184	637	164	18	65	6.065	11.849	59	1	2
	<b>Folga</b>	<b>194</b>	<b>59</b>	<b>6</b>	<b>184</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>5.595</b>	<b>9.371</b>	<b>542</b>	<b>0</b>	<b>21</b>
25 (Jan/2013)	Atual	7.098	717	695	2.947	703	71	419	36.456	68.108	562	1	38
	Alvo	6.152	679	646	2.516	652	62	330	25.691	49.202	177	1	7
	<b>Folga</b>	<b>946</b>	<b>38</b>	<b>49</b>	<b>431</b>	<b>51</b>	<b>9</b>	<b>89</b>	<b>10.765</b>	<b>18.906</b>	<b>385</b>	<b>0</b>	<b>31</b>
26 (Fev/2013)	Atual	12.523	1.105	1.230	5.246	1.238	132	671	63.524	119.580	532	2	35
	Alvo	11.721	1.034	1.151	4.410	1.123	121	553	42.730	111.917	388	2	29
	<b>Folga</b>	<b>802</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>836</b>	<b>115</b>	<b>11</b>	<b>118</b>	<b>20.794</b>	<b>7.663</b>	<b>144</b>	<b>0</b>	<b>6</b>
31 (Jul/2013)	Atual	10.984	921	1.196	5.341	972	132	626	60.624	113.284	583	2	45
	Alvo	9.146	859	1.048	3.024	928	114	433	45.445	91.054	362	2	19
	<b>Folga</b>	<b>1.838</b>	<b>62</b>	<b>148</b>	<b>2.317</b>	<b>44</b>	<b>18</b>	<b>193</b>	<b>15.179</b>	<b>22.230</b>	<b>221</b>	<b>0</b>	<b>26</b>
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	<b>9.399</b>	<b>1.157</b>	<b>749</b>	<b>8.707</b>	<b>664</b>	<b>135</b>	<b>1.585</b>	<b>139.904</b>	<b>105.171</b>	<b>3.768</b>	<b>13</b>	<b>283</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	<b>27</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>25</b>	<b>2</b>	<b>0,39</b>	<b>5</b>	<b>408</b>	<b>307</b>	<b>11</b>	<b>0,04</b>	<b>1</b>

LEGENDA:

Período anterior à modularização

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 20, pode-se perceber que as DMU's consideradas ineficientes estão concentradas no período que contempla a fabricação do produto antes da modularização. Esse período contempla da DMU 1 até a DMU 32. No que tange ao período de transição e ao período posterior à modularização, todas as DMU's foram consideradas eficientes. Entende-se que a concentração de DMU's ineficientes no período anterior à modularização e a concentração de DMU's eficientes no período posterior à modularização indicam que a modularização melhorou a eficiência do Processo Produtivo. Nesse sentido, as DMU's referentes aos produtos modulares são as que representam as melhores práticas no período proposto para análise no Processo Produtivo.

Para discutir os alvos e as folgas, utiliza-se como exemplo a DMU 31, que corresponde ao lote de produtos produzidos no mês de julho de 2013. Como o total de produtos produzidos (*output*) pela DMU 31 pode-se considerar 29 ônibus. No *input1*, que corresponde ao alumínio consumido, foram utilizados 10.984 Kg, enquanto poderiam ter sido usados 9.146 Kg. Isso significa que se a DMU 31 fosse eficiente, teria sido possível economizar 1.838 Kg de alumínio para produzir os 29 ônibus no período. Quanto à fibra (*input2*), foram consumidos 921 Kg e poderiam ter sido utilizados 859 (uma economia de 62 Kg). No *input3* (passadeira) foram consumidos 1.196 m<sup>2</sup> e poderiam ter sido consumidos 1.048, ou seja, teria sido possível economizar 148 m<sup>2</sup> de material. No *input4* (tecidos) foram utilizados 5.341 m<sup>2</sup> e se a DMU fosse eficiente poderia se ter consumido 3.024 m<sup>2</sup>, ou seja, 2.317 m<sup>2</sup> de tecido a menos. Quanto ao número de vidros (*input5*) alocados ao veículo, a economia teria sido de 44 unidades. No que se refere ao *lead time* de Fabricação (*input6*) e Montagem (*input7*), a economia teria sido de 18 e 193 dias, respectivamente. Nos recursos itens comprados (*input8*), a economia teria sido de 15.179 itens, em itens produzidos (*input9*) a economia seria de 22.230 itens e no número de pessoas alocadas na Produção (*input10*) seria possível uma redução de 221 pessoas. Também seriam diminuídos os problemas de qualidade, com redução de 2 problemas técnicos reportados (*input11*) e de 45 produtos reclamados pelos clientes (*input12*).

Também se efetuou uma análise agregada do total das folgas apresentadas na Tabela 20. Essa análise contempla o somatório de todas as folgas de todas as DMU's (42) analisadas no período pesquisado. Além disso, realizou-se uma avaliação da média das folgas de cada DMU. Essa análise da média pode mostrar o

quanto, em média, poderia ser economizado de cada variável em cada produto. No *input1*, por exemplo, pode-se considerar uma economia média por produto de 27 Kg de alumínio. No *input2*, verifica-se uma economia média por produto de 3 Kg de fibra e, assim sucessivamente, para todos os recursos. Entende-se que esse tipo de avaliação embasa a relevância de se analisar a eficiência nas empresas e sugere indícios de que foram obtidas melhorias com a implementação da modularização na organização objeto de estudo.

Segundo os especialistas do processo, essas análises de folgas podem ser consideradas relevantes para estabelecer parâmetros para busca de otimização de recursos e melhoria de processos na fabricação dos produtos. Como se pode observar, foram percebidos indicativos de efeitos de melhoria da eficiência após realizadas as análises considerando o produto modularizado (mesmo que sejam em menor escala do que os efeitos observados na Engenharia de Produtos). Na próxima seção, são efetuadas as mesmas análises para o produto não modularizado.

#### **5.4.2 Comportamento da eficiência do produto não modularizado no Processo Produtivo**

A análise do produto não modularizado objetiva auxiliar a avaliação dos efeitos percebidos no Processo Produtivo, no sentido de comprovar que eles são oriundos da modularização e não de outras melhorias que podem ter sido implementadas na empresa ao longo do tempo. Assim, para análise dos dados do produto não modularizados, são utilizados os mesmos procedimentos das análises do produto modularizado. Na Tabela 21 estão relacionadas, em ordem cronológica, as 42 DMU's que representam os 42 lotes do produto não modularizado produzidos no período proposto para análise. Conforme efetuado em procedimentos anteriores, os escores de eficiência composta (destacados em **negrito**) são utilizados nas análises. As unidades de tomada de decisão contemplam o mesmo período de transição do produto modularizado (analisado anteriormente) para que possam ser estabelecidos parâmetros para as análises de grupos de eficiência.

Tabela 21: Eficiências do produto não modularizado

DMU	Mês/Ano	Eficiência Padrão	Fronteira invertida	Eficiência Composta	Eficiência Composta*
DMU1	Jan/11	1,000	0,963	<b>0,519</b>	0,967
DMU2	Fev/11	1,000	0,953	<b>0,523</b>	0,975
DMU3	Mar/11	1,000	0,976	<b>0,512</b>	0,954
DMU4	Abr/11	0,942	1,000	<b>0,471</b>	0,878
DMU5	Mai/11	0,960	0,973	<b>0,494</b>	0,920
DMU6	Jun/11	0,934	1,000	<b>0,467</b>	0,871
DMU7	Jul/11	1,000	0,974	<b>0,513</b>	0,956
DMU8	Ago/11	1,000	0,927	<b>0,537</b>	1,000
DMU9	Set/11	0,995	0,974	<b>0,510</b>	0,951
DMU10	Out/11	1,000	0,963	<b>0,518</b>	0,966
DMU11	Nov/11	1,000	0,978	<b>0,511</b>	0,953
DMU12	Dez/11	1,000	0,963	<b>0,519</b>	0,966
DMU13	Jan/12	0,984	0,999	<b>0,493</b>	0,918
DMU14	Fev/12	0,973	1,000	<b>0,486</b>	0,907
DMU15	Mar/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU16	Abr/12	0,981	1,000	<b>0,490</b>	0,914
DMU17	Mai/12	1,000	0,964	<b>0,518</b>	0,965
DMU18	Jun/12	1,000	0,980	<b>0,510</b>	0,950
DMU19	Jul/12	0,976	0,984	<b>0,496</b>	0,925
DMU20	Ago/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU21	Set/12	1,000	0,983	<b>0,508</b>	0,948
DMU22	Out/12	0,986	1,000	<b>0,493</b>	0,919
DMU23	Nov/12	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU24	Dez/12	1,000	0,995	<b>0,503</b>	0,937
DMU25	Jan/13	0,957	1,000	<b>0,479</b>	0,892
DMU26	Fev/13	1,000	0,992	<b>0,504</b>	0,939
DMU27	Mar/13	1,000	0,990	<b>0,505</b>	0,941
DMU28	Abr/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU29	Mai/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU30	Jun/13	0,908	1,000	<b>0,454</b>	0,846
DMU31	Jul/13	1,000	0,985	<b>0,508</b>	0,946
DMU32	Ago/13	0,941	0,987	<b>0,477</b>	0,889
DMU33	Set/13	0,933	1,000	<b>0,467</b>	0,870
DMU34	Out/13	0,949	0,996	<b>0,477</b>	0,889
DMU35	Nov/13	0,948	1,000	<b>0,474</b>	0,883
DMU36	Dez/13	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU37	Jan/14	0,964	1,000	<b>0,482</b>	0,899
DMU38	Fev/14	0,984	1,000	<b>0,492</b>	0,917
DMU39	Mar/14	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU40	Abr/14	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932
DMU41	Mai/14	1,000	0,944	<b>0,528</b>	0,984
DMU42	Jun/14	1,000	1,000	<b>0,500</b>	0,932

LEGENDA:

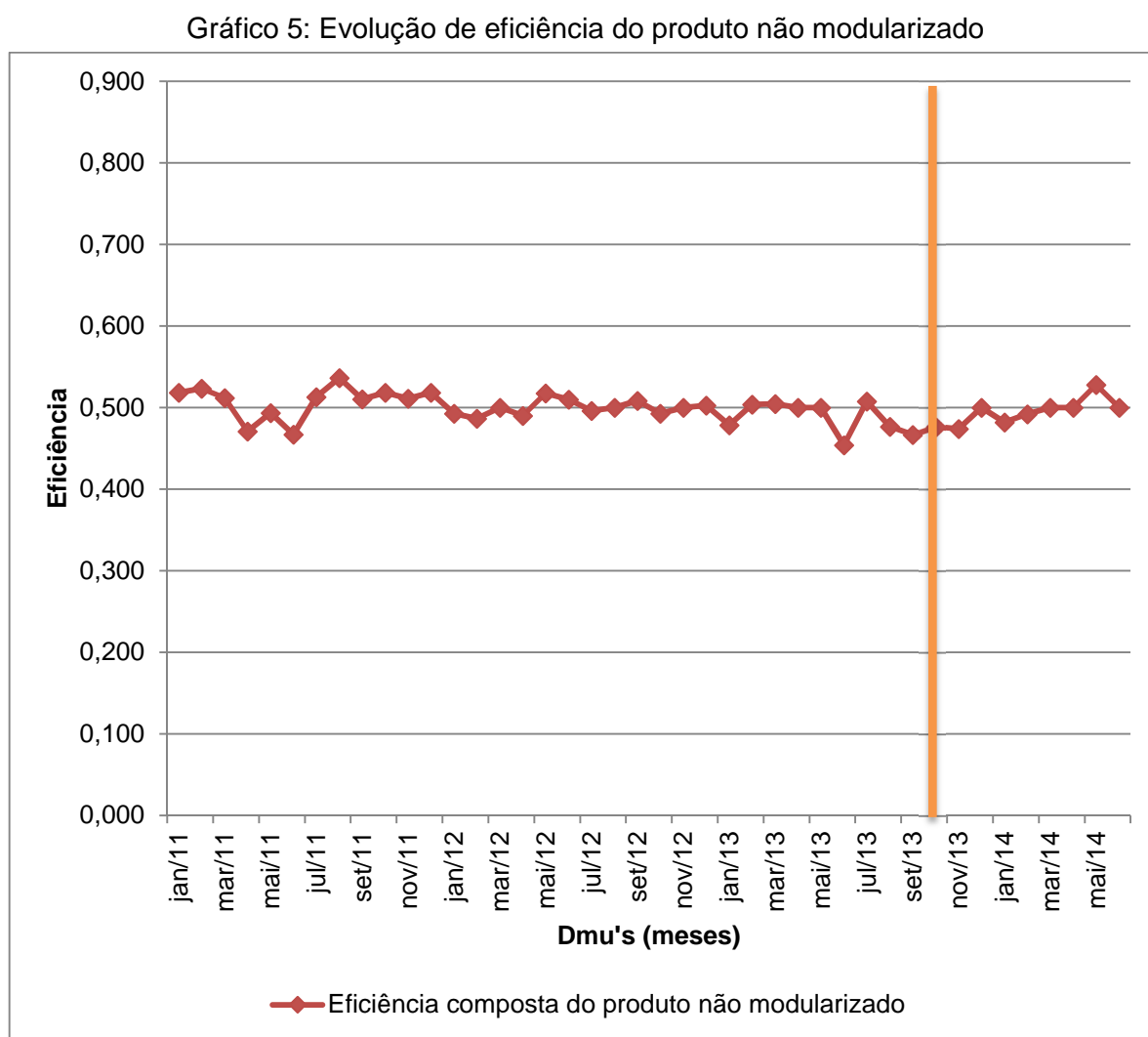
 Período de transição

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 21, deve-se considerar que quanto melhor for o desempenho da DMU, melhor é o escore da eficiência composta resultante do cálculo efetuado na análise envoltória de dados. Nesse sentido, observa-se que o melhor desempenho de eficiência pode ser atribuído às DMU's 8 (Ago/2011), 2 (Fev/2011), 1 (Jan/2011), 12 (Dez, 2011), 10 (Out/2011) e 41(Mai/2014). Percebe-se que as DMU's

com melhor desempenho concentram-se no ano de 2011, não apresentando a mesma característica do produto modularizado, que obteve agrupamento de DMU's eficientes no período pós-modularização. Dentre as 6 DMU's com melhor desempenho, observa-se que 5 são correspondentes ao ano de 2011.

Procurou-se ilustrar de forma gráfica (Gráfico 5) os dados referentes à eficiência composta do produto não modularizado (dados apresentados da Tabela 22). Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores de eficiência ao longo do tempo. Para uma melhor compreensão da evolução da eficiência, essa avaliação segrega o período de transição do produto modularizado, que é ilustrado pelo traço laranja.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 5, é possível visualizar efeitos diferentes do produto modularizado (Gráfico 4), visto que as DMU's com melhor desempenho na sequência temporal estão concentradas no período anterior à modularização. As eficiências compostas das DMU's dispostas em séries temporais do produto não modularizado não apresentam o mesmo comportamento do produto modularizado, pois se observa uma tendência de redução na eficiência do produto não modularizado. Entende-se que isso é um indicativo de que foi a modularização que melhorou a eficiência do Processo Produtivo. No entanto, apesar dos indícios identificados, destaca-se que são efetuados testes estatísticos para melhor compreender os efeitos percebidos.

Mesmo que a análise do produto não modularizado seja para confirmar os efeitos do produto modularizado na Engenharia de Produtos, também se efetuou, para esse produto, as análises das folgas. Os dados apresentados na Tabela 22 são referentes às DMU's consideradas ineficientes nesta análise DEA, ou seja as que poderiam ter consumido menos recursos, considerando que o modelo DEA definido é orientado a *input*. Dessa forma, as DMU's eficientes, ou seja, as que executaram as melhores práticas e consumiram os recursos de forma adequada, foram omitidas da avaliação. As DMU's estão segregadas pelos períodos anterior, de transição e posterior à modularização.

Tabela 22: Relação dos alvos e folgas das DMU's ineficientes do produto não modularizado

(Continua)

DMU	Valores	Input1 Alumínio	Input2 Fibra	Input3 Passadeira	Input4 Tecido	Input5 Vidros	Input6 <i>Lead time</i> Fabricação	Input7 <i>Lead time</i> Montagem	Input8 Itens comprados	Input9 Itens produzidos	Input10 Pessoas Produção	Input11 Problemas técnicos reportados	Input12 Produtos Reclamados pelos clientes
4 (Abr/2011)	Atual	3.682	816	529	433	229	65	351	34	44	636	1	47
	Alvo	3.469	793	149	153	216	61	266	30	38	269	1	33
	<b>Folga</b>	<b>213</b>	<b>23</b>	<b>380</b>	<b>280</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>85</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>367</b>	<b>0</b>	<b>14</b>
5 (Mai/2011)	Atual	3.681	847	519	498	279	67	371	34	46	661	3	58
	Alvo	3.534	756	456	469	268	64	329	31	41	377	2	37
	<b>Folga</b>	<b>147</b>	<b>91</b>	<b>63</b>	<b>29</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>42</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>284</b>	<b>1</b>	<b>21</b>
6 (Jun/2011)	Atual	624	148	100	111	56	12	67	6	9	658	1	59
	Alvo	564	44	87	96	50	11	63	6	7	100	0	8
	<b>Folga</b>	<b>60</b>	<b>104</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>558</b>	<b>1</b>	<b>51</b>
9 (Set/2011)	Atual	5.155	984	730	752	420	85	508	47	56	704	4	100
	Alvo	5.127	933	242	143	418	85	486	47	56	424	2	41
	<b>Folga</b>	<b>28</b>	<b>51</b>	<b>488</b>	<b>609</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>280</b>	<b>2</b>	<b>59</b>
13 (Jan/2012)	Atual	6.521	1.368	956	949	522	130	670	57	70	707	7	84
	Alvo	6.418	1.346	457	470	514	116	656	56	69	600	2	63
	<b>Folga</b>	<b>103</b>	<b>22</b>	<b>499</b>	<b>479</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>107</b>	<b>5</b>	<b>21</b>
14 (Fev/2012)	Atual	6.521	1.408	936	993	655	136	628	70	64	660	5	67
	Alvo	6.344	1.369	91	104	572	124	605	67	63	447	2	34
	<b>Folga</b>	<b>177</b>	<b>39</b>	<b>845</b>	<b>889</b>	<b>83</b>	<b>12</b>	<b>23</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>213</b>	<b>3</b>	<b>33</b>
16 (Abr/2012)	Atual	5.607	992	788	745	425	108	538	62	52	666	3	68
	Alvo	4.963	823	404	695	417	95	383	58	51	375	1	39
	<b>Folga</b>	<b>644</b>	<b>169</b>	<b>384</b>	<b>50</b>	<b>8</b>	<b>13</b>	<b>155</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>291</b>	<b>2</b>	<b>29</b>
19 (Jul/2012)	Atual	5.002	932	704	789	384	83	492	42	56	563	5	64
	Alvo	4.822	710	453	482	375	81	466	41	55	550	3	47
	<b>Folga</b>	<b>180</b>	<b>222</b>	<b>251</b>	<b>307</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>26</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>17</b>



(Continuação)

DMU	Valores	Input1 Alumínio	Input2 Fibra	Input3 Passadeira	Input4 Tecido	Input5 Vidros	Input6 Lead time Fabricação	Input7 Lead time Montagem	Input8 Itens comprados	Input9 Itens produzidos	Input10 Pessoas Produção	Input11 Problemas técnicos reportados	Input12 Produtos Reclamados pelos clientes
22 (Out/2012)	Atual	3.383	783	552	599	345	67	388	33	42	593	5	63
	Alvo	3.334	623	503	590	337	66	375	32	41	441	4	40
	<b>Folga</b>	<b>49</b>	<b>160</b>	<b>49</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>152</b>	<b>1</b>	<b>23</b>
25 (Jan/2013)	Atual	2.708	444	312	461	160	38	227	20	27	562	2	24
	Alvo	2.330	185	184	217	153	36	195	19	25	336	1	23
	<b>Folga</b>	<b>378</b>	<b>259</b>	<b>128</b>	<b>244</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>32</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>226</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
30 (Jun/2013)	Atual	3.907	796	517	512	310	71	328	38	38	568	6	46
	Alvo	3.447	698	148	464	269	63	298	35	34	259	1	27
	<b>Folga</b>	<b>460</b>	<b>98</b>	<b>369</b>	<b>48</b>	<b>41</b>	<b>8</b>	<b>30</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>309</b>	<b>5</b>	<b>19</b>
32 (Ago/2013)	Atual	5.501	1.217	751	782	438	95	480	46	61	586	2	43
	Alvo	4.964	1.144	467	481	346	88	451	44	56	446	2	40
	<b>Folga</b>	<b>537</b>	<b>73</b>	<b>284</b>	<b>301</b>	<b>92</b>	<b>7</b>	<b>29</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>140</b>	<b>0</b>	<b>3</b>
33 (Set/2013)	Atual	3.232	979	392	478	208	52	249	25	33	590	3	16
	Alvo	2.548	958	165	171	104	48	143	23	31	174	1	15
	<b>Folga</b>	<b>684</b>	<b>21</b>	<b>227</b>	<b>307</b>	<b>104</b>	<b>4</b>	<b>106</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>416</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
34 (Out/2013)	Atual	6.127	1.154	823	675	466	105	545	51	67	576	1	64
	Alvo	5.709	1.095	183	189	420	94	517	48	58	440	1	55
	<b>Folga</b>	<b>418</b>	<b>59</b>	<b>640</b>	<b>486</b>	<b>46</b>	<b>11</b>	<b>28</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>136</b>	<b>0</b>	<b>9</b>
35 (Nov/2013)	Atual	3.105	722	419	510	248	54	274	27	35	570	2	15
	Alvo	2.943	760	186	192	130	50	179	26	33	207	1	14
	<b>Folga</b>	<b>162</b>	<b>-38</b>	<b>233</b>	<b>318</b>	<b>118</b>	<b>4</b>	<b>95</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>363</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
37 (Jan/2014)	Atual	2.634	836	332	368	180	41	224	21	29	566	0	55
	Alvo	2.279	214	217	137	174	40	216	20	25	260	0	52
	<b>Folga</b>	<b>355</b>	<b>622</b>	<b>115</b>	<b>231</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>306</b>	<b>0</b>	<b>3</b>

(Conclusão)

DMU	Valores	Input1 Alumínio	Input2 Fibra	Input3 Passadeira	Input4 Tecido	Input5 Vidros	Input6 <i>Lead time</i> Fabricação	Input7 <i>Lead time</i> Montagem	Input8 Itens comprados	Input9 Itens produzidos	Input10 Pessoas Produção	Input11 Problemas técnicos reportados	Input12 Produtos Reclamados pelos clientes
38 (Fev/2014)	Atual	5.233	1.888	710	830	514	98	502	53	56	549	0	40
	Alvo	5.150	1.037	552	776	363	96	483	51	55	364	0	26
	<b>Folga</b>	<b>83</b>	<b>851</b>	<b>158</b>	<b>54</b>	<b>151</b>	<b>2</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>185</b>	<b>0</b>	<b>14</b>
<b>TOTAL</b>	<b>Folga</b>	<b>4.629</b>	<b>2.666</b>	<b>5.078</b>	<b>4.648</b>	<b>705</b>	<b>89</b>	<b>717</b>	<b>32</b>	<b>45</b>	<b>4.195</b>	<b>25</b>	<b>295</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>Folga</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>0,28</b>	<b>2</b>	<b>0,10</b>	<b>0,14</b>	<b>13</b>	<b>0,08</b>	<b>1</b>

## LEGENDA:

	Período anterior à modularização
	Período de transição
	Período posterior à modularização

Fonte: Dados da pesquisa

Ao visualizar a Tabela 22, pode-se perceber que mesmo na fabricação do produto não modularizado as análises DEA apontam possibilidade de melhoria de aproveitamento dos recursos. Para discutir os alvos e folgas do projeto não modularizado utiliza-se como exemplo a DMU 38, que corresponde ao lote de produtos não modularizados produzido no mês de fevereiro de 2014.

O total de produtos produzidos (*output*) pela DMU 38 são 23 ônibus. No *input1*, que corresponde ao alumínio consumido, foram utilizados 5.233 Kg do material e poderiam ter sido utilizados 5.150 Kg, ou seja, se a DMU 38 fosse eficiente seria possível economizar 83 Kg de alumínio para produzir os 23 ônibus no período. Quanto ao consumo de Fibra (*input2*), foram utilizados 1.888 Kg e poderiam ter sido utilizados 1.037 (uma economia de 851 Kg). No *input3* (passadeira), foram consumidos 710 m<sup>2</sup> e poderiam ter sido consumidos 552, ou seja, teria sido possível economizar 158 m<sup>2</sup> de material. No *input4* (tecidos) foram utilizados 830 m<sup>2</sup> e, se a DMU fosse eficiente, poderiam ter sido consumidos 776 m<sup>2</sup>, representando uma economia de 54 m<sup>2</sup> de tecido. Quanto ao número de vidros (*input5*) alocados no veículo, a economia seria de 151 unidades. No que se refere ao *lead time* de Fabricação (*input6*) e Montagem (*input7*) a economia seria de 2 e 19 dias, respectivamente. No recurso itens comprados (*input8*), a economia seria de 2 itens, em itens produzidos (*input9*) a economia seria de 1 item e no número de pessoas alocadas na Produção (*input10*) seria possível uma redução de 185 pessoas. Também seriam possíveis menos problemas de qualidade, com a redução de 14 produtos reclamados pelos clientes (*input12*).

Efetuuou-se, ainda, uma análise agregada do total de folgas apresentadas na Tabela 22. Essa análise contempla o somatório de folgas de todas as DMU's (42) analisadas no período pesquisado. Além dessa análise, realizou-se uma avaliação da média das folgas de cada DMU. Essa análise da média pode mostrar o quanto, em média, poderia ser economizado de cada variável em cada produto. No *input1*, por exemplo, pode-se considerar uma economia média por produto de 15 Kg de alumínio. No *input2* verifica-se uma economia média por produto de 9 Kg de fibra e, assim sucessivamente, para todos os recursos. Entende-se que esse tipo de avaliação embasa a relevância de se analisar a eficiência nas empresas e sugere que foram obtidas melhorias relevantes com a implementação da modularização na organização objeto de estudo.

A avaliação do produto não modularizado mostrou um comportamento diferente da eficiência ao longo do tempo, apresentando os melhores escores de eficiência no período anterior à modularização. Nesse sentido, entende-se que as análises efetuadas no Processo Produtivo do produto não modularizado auxiliam a vincular os indícios de efeitos de elevação da eficiência do produto modularizado à implementação da modularização.

#### 5.4.3 Análise comparativa do produto modularizado com produto não modularizado no Processo Produtivo

Para melhorar a compreensão das avaliações efetuadas no Processo Produtivo, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos quanto às eficiências dos produtos modularizado e não modularizado. Nessa comparação, apresenta-se somente a eficiência composta, que é base para a investigação deste trabalho. As demais eficiências (padrão, fronteira invertida e composta\*) são omitidas. Nesse sentido, na Tabela 23 pode-se observar os escores de eficiência de cada DMU, bem como os cálculos de média e desvio padrão e os escores mínimo e máximo de eficiência obtidos na análise longitudinal do produto modularizado e do produto não modularizado. As DMU's estão segregadas pelos períodos anterior, de transição e posterior à modularização.

Tabela 23: Eficiências do produto modularizado e não modularizado

(Continua)

DMU	Mês/Ano	Eficiência composta do produto modularizado	Eficiência composta do produto não modularizado
DMU1	Jan/11	0,459	0,519
DMU2	Fev/11	0,500	0,523
DMU3	Mar/11	0,516	0,512
DMU4	Abr/11	0,502	0,471
DMU5	Mai/11	0,525	0,494
DMU6	Jun/11	0,472	0,467
DMU7	Jul/11	0,518	0,513
DMU8	Ago/11	0,530	0,537
DMU9	Set/11	0,514	0,510
DMU10	Out/11	0,528	0,518
DMU11	Nov/11	0,519	0,511
DMU12	Dez/11	0,525	0,519
DMU13	Jan/12	0,501	0,493
DMU14	Fev/12	0,488	0,486
DMU15	Mar/12	0,515	0,500
DMU16	Abr/12	0,483	0,490
DMU17	Mai/12	0,521	0,518

DMU	Mês/Ano	(Conclusão)	
		Eficiência composta do produto modularizado	Eficiência composta do produto não modularizado
DMU18	Jun/12	0,518	0,510
DMU19	Jul/12	0,505	0,496
DMU20	Ago/12	0,516	0,500
DMU21	Set/12	0,510	0,508
DMU22	Out/12	0,463	0,493
DMU23	Nov/12	0,473	0,500
DMU24	Dez/12	0,450	0,503
DMU25	Jan/13	0,433	0,479
DMU26	Fev/13	0,470	0,504
DMU27	Mar/13	0,501	0,505
DMU28	Abr/13	0,527	0,500
DMU29	Mai/13	0,546	0,500
DMU30	Jun/13	0,551	0,454
DMU31	Jul/13	0,438	0,508
DMU32	Ago/13	0,521	0,477
DMU33	Set/13	0,521	0,467
DMU34	Out/13	0,500	0,477
<b>Eficiência média (a/t)</b>		<b>0,501</b>	<b>0,499</b>
<b>Desvio padrão (a/t)</b>		<b>0,029</b>	<b>0,018</b>
<b>Eficiência mínima (a/t)</b>		<b>0,433</b>	<b>0,454</b>
<b>Eficiência máxima (a/t)</b>		<b>0,551</b>	<b>0,537</b>
DMU35	Nov/13	0,591	0,474
DMU36	Dez/13	0,564	0,500
DMU37	Jan/14	0,509	0,482
DMU38	Fev/14	0,589	0,492
DMU39	Mar/14	0,500	0,500
DMU40	Abr/14	0,512	0,500
DMU41	Mai/14	0,500	0,528
DMU42	Jun/14	0,500	0,500
<b>Eficiência média (p)</b>		<b>0,533</b>	<b>0,497</b>
<b>Desvio padrão (p)</b>		<b>0,041</b>	<b>0,016</b>
<b>Eficiência mínima (p)</b>		<b>0,500</b>	<b>0,474</b>
<b>Eficiência máxima (p)</b>		<b>0,591</b>	<b>0,528</b>
<b>Eficiência média (geral)</b>		<b>0,508</b>	<b>0,498</b>
<b>Desvio padrão (geral)</b>		<b>0,034</b>	<b>0,018</b>
<b>Eficiência mínima (geral)</b>		<b>0,433</b>	<b>0,454</b>
<b>Eficiência máxima (geral)</b>		<b>0,591</b>	<b>0,537</b>

## LEGENDA:

	Período anterior à modularização
	Período de transição
	Período posterior à modularização

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 23, pode-se observar que a média de eficiência do produto modularizado aumentou de 0,501 no período anterior à modularização para 0,533 no período posterior à modularização. O produto não modularizado reduziu de 0,499 no período anterior à modularização para 0,497 no período posterior à modularização. Portanto, percebe-se comportamentos diferentes em relação aos produtos. Ao observar o período de 42 meses consecutivos, o produto modularizado

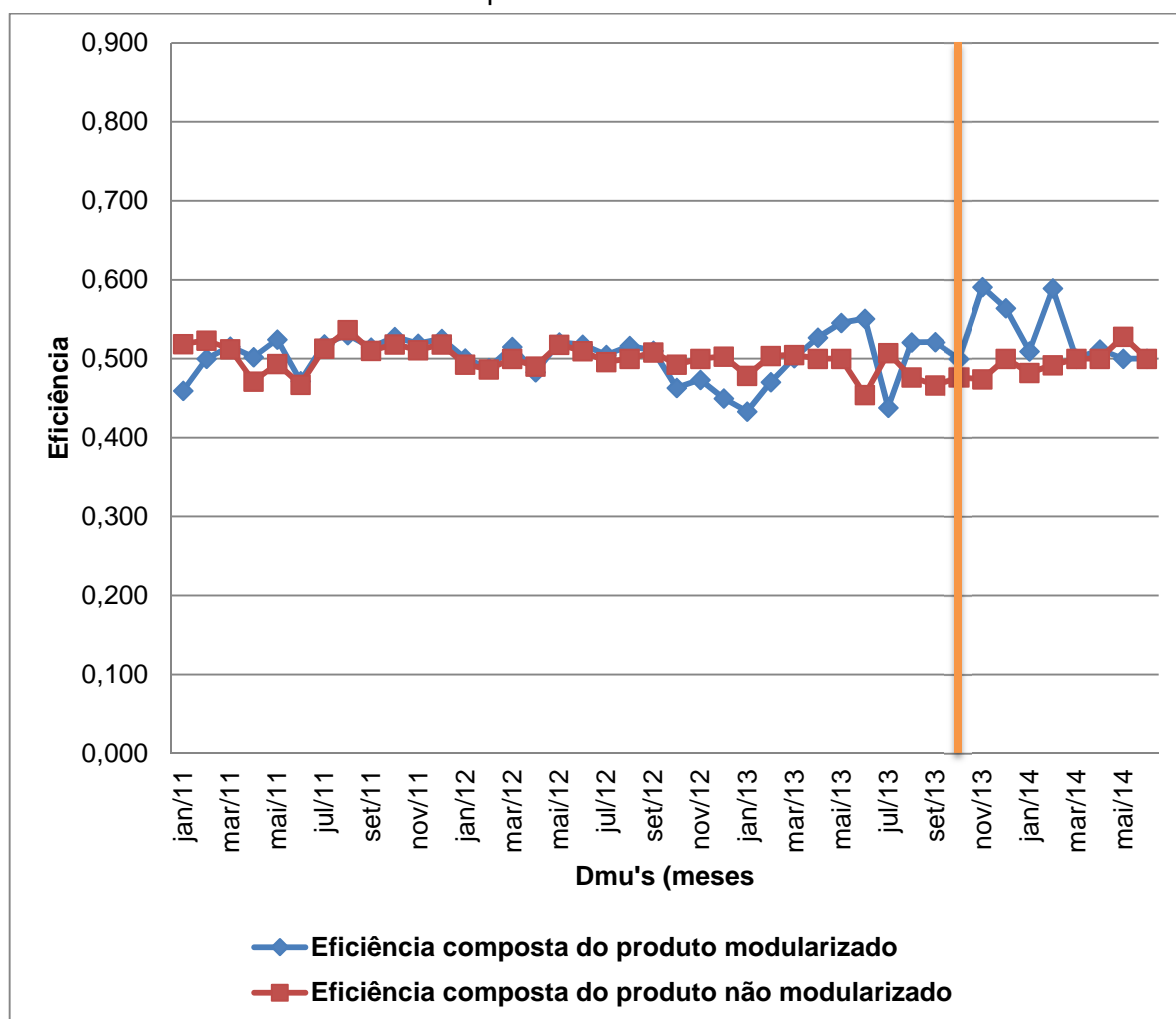
apresenta uma eficiência média de 0,508 com desvio padrão de 0,034. No que se refere ao produto não modularizado, a eficiência média é de 0,498 com desvio padrão de 0,018. Pode-se perceber que o produto modularizado obteve um melhor desempenho médio ao longo da série temporal.

Entende-se que na eficiência máxima e eficiência mínima de cada análise temporal pode-se observar indicativos de que a modularização auxiliou a empresa a melhorar o desempenho das DMU's no produto modularizado. No produto modularizado observa-se uma eficiência mínima de 0,433 referente à DMU 25 (Jan/2013), que está situada no período anterior à modularização. A eficiência máxima do projeto modularizado foi de 0,591, referente à DMU 35 (Nov/2013), que está contemplada no período posterior à modularização. Percebe-se que todas as DMU's consideradas no período posterior à modularização possuem eficiência igual ou maior que 0,50.

Quanto às eficiências máximas e mínimas do produto não modularizado, pode-se perceber os seguintes resultados: i) eficiência mínima de 0,454 na DMU 30 (Jun/2013); ii) eficiência máxima de 0,537 na DMU 8 (Ago/2011). Nesse sentido, observa-se que houve uma variação menor entre as eficiências. Outro aspecto a ser considerado é que ambas as eficiências (mínima e máxima) estão concentradas no período anterior à modularização do produto.

Procura-se ilustrar, de forma gráfica, (Gráfico 6) o comparativo efetuado entre as eficiências compostas do produto modularizado e do produto não modularizado (dados apresentados da Tabela 23). Esse formato possibilita visualizar a tendência da evolução dos escores de eficiência de cada análise ao longo do tempo. Para uma melhor compreensão da evolução da eficiência, essa avaliação segrega o período de transição do produto modularizado, que é ilustrado pelo traço laranja.

Gráfico 6: Eficiências do produto modularizado e não modularizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados observados no Gráfico 6, é possível perceber a diferença entre o produto modularizado e o produto não modularizado. A análise da série temporal relativa ao produto modularizado mostra que os melhores escores de eficiência foram obtidos nas DMU's relativas ao período posterior à modularização. No que se refere ao produto não modularizado, os melhores escores de eficiência foram obtidos no período anterior, referentes ao ano de 2011. O aumento da eficiência percebida no produto modularizado e a redução da eficiência do produto não modularizado sugerem evidências de que há efeitos positivos da modularização sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo. Dessa forma, nas próximas seções, são efetuados testes estatísticos para validar ou refutar a hipótese de que a melhoria de eficiência pode ser atribuída à implementação da modularização.

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO DA MODULARIZAÇÃO NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO PRODUTIVO

Nesta seção, são caracterizados os efeitos da modularização na unidade de análise Processo Produtivo. Para tanto, desenvolveu-se o teste de hipóteses para confirmar se existem ou não evidências dos efeitos da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo. Inicialmente, os escores de eficiência foram divididos em grupos contemplando dois períodos: i) anterior à modularização; e ii) posterior à modularização. O período anterior à modularização contempla as DMU's de 1 a 34, correspondentes ao período de janeiro de 2011 a outubro de 2013 (incluindo o período de transição). O período posterior à modularização contempla as DMU's de 35 a 42, correspondentes ao intervalo de novembro de 2013 a junho de 2014. Posteriormente, busca-se validar os pressupostos para aplicação da ANOVA com os testes de Shapiro Wilk e Levene. Finalmente, o teste ANOVA é aplicado para verificar se existem diferenças significativas entre as médias das eficiências dos grupos definidos.

### 5.5.1 Hipóteses testadas no Processo Produtivo

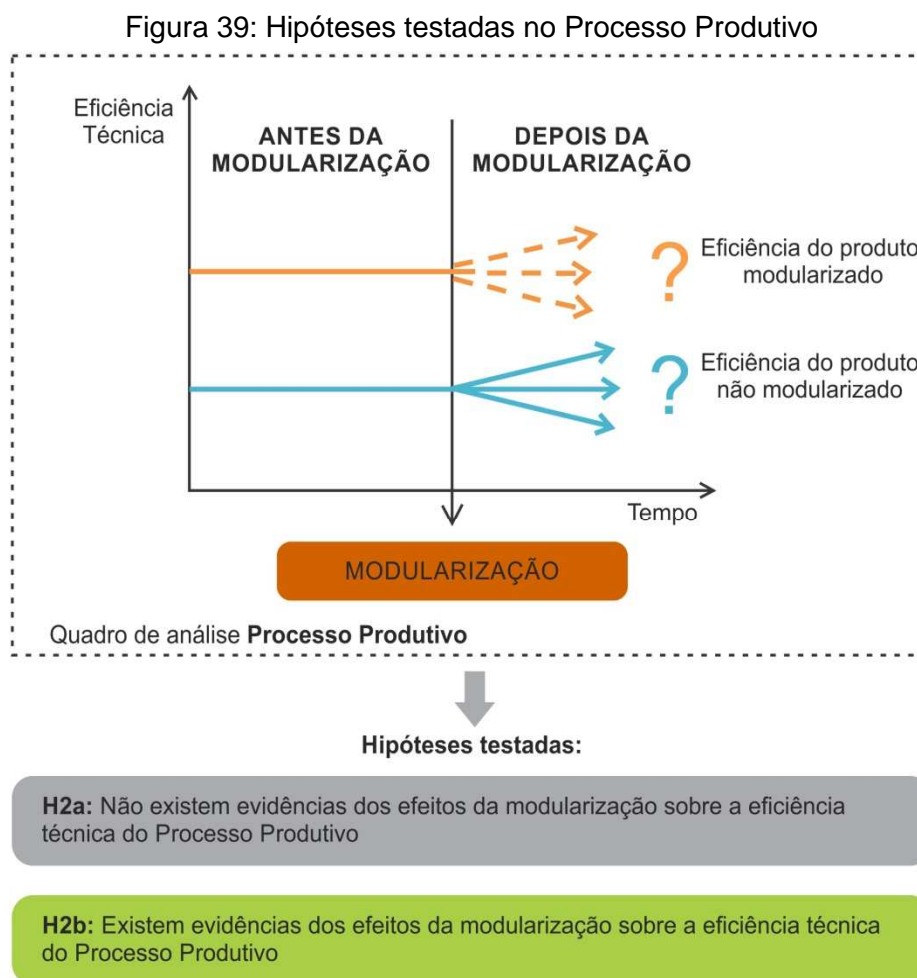
A partir dos escores de eficiência dos produtos modularizado e não modularizado, buscou-se desenvolver as hipóteses a serem testadas para rejeitar ou aceitar estatisticamente as evidências dos efeitos da modularização sobre o Processo Produtivo. Nesse sentido, as seguintes hipóteses foram testadas:

**H2a (hipótese nula):** Não existem evidências dos efeitos da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo.

**H2b (hipótese alternativa):** Existem evidências dos efeitos da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo.

A Figura 39 ilustra o esquema das hipóteses testadas.





Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 39, são testadas as hipóteses relativas à evolução das eficiências dos produtos modularizado e não modularizado na Produção ao longo do tempo. Conforme análises apresentadas anteriormente, existem indícios de que a eficiência do produto modularizado apresentou melhorias depois da modularização. Também existem indícios de que o produto não modularizado não apresentou os mesmos efeitos (melhora na eficiência). Entende-se que esse fato pode auxiliar a atribuir a melhoria da eficiência à modularização. No entanto, os escores de eficiência foram divididos em grupos contemplando os períodos anterior e posterior à modularização para testar se existem diferenças significativas nas médias de eficiência do produto modularizado e para verificar se não existem diferenças significativas nas médias das eficiências do produto não modularizado. Os testes estatísticos realizados são apresentados na próxima seção.

## 5.5.2 Análises estatísticas dos efeitos da modularização no Processo

### Produtivo

Os testes de normalidade (Shapiro Wilk) e de homogeneidade (Levene) foram aplicados para avaliar se os escores longitudinais de eficiência composta obtidos nos produtos modularizado e não modularizado cumpriam os pressupostos de utilização da ANOVA. Os testes para validação dos pressupostos da ANOVA são sintetizados na Tabela 24:

Tabela 24: Teste dos pressupostos para uso da ANOVA no Processo Produtivo

Período	Teste Shapiro Wilk ( <i>Sign.</i> )	Teste Levene ( <i>Sign.</i> )
Dados do produto modularizado (Anterior)	0,212	-
Dados do produto modularizado (Posterior)	0,110	-
Amostra total dos dados do produto modularizado	-	0,055
Dados do produto não modularizado (Anterior)	0,375	-
Dados do produto não modularizado (Posterior)	0,236	-
Amostra total dos dados do produto não modularizado	-	0,434

Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto ao produto modularizado, o teste Shapiro Wilk, no que se refere aos dados da eficiência composta tanto do período anterior quanto do período posterior à modularização apresenta um nível de significância maior do que 0,05 (anterior *Sign.* = 0,212 e posterior *Sign.* = 0,110). Dessa forma, pode-se aceitar a hipótese de que os dados constituem uma distribuição normal. Quanto ao teste de Levene, o resultado obtido (*Sign.* = 0,055) também permite aceitar a hipótese de que os dados são homogêneos.

Quanto ao produto não modularizado, o teste Shapiro Wilk (anterior *Sign.* = 0,375 e posterior *Sign.* = 0,236) permite aceitar a hipótese de que os dados seguem uma distribuição normal. Quanto ao teste de Levene, o resultado obtido (*Sign.* = 0,434) permite aceitar a hipótese de que a população é homogênea. Dessa forma, os pressupostos para utilização da ANOVA para comparar as médias das eficiências compostas no produto modularizado e no não modularizado foram cumpridos, e o teste ANOVA foi realizado (Tabela 25):

Tabela 25: Teste ANOVA do Processo Produtivo

Período	Média da eficiência composta do produto modularizado	Média da eficiência composta do produto não modularizado
Antes da modularização	0,501	0,499
Depois da modularização	0,533	0,497
Diferença das eficiências (amplitude)	0,032	-0,002
F	6,425552	0,063992
<i>p-value</i>	0,015264	0,80159

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados expostos na Tabela 25 quanto ao cálculo da ANOVA mostram que no produto modularizado a média da eficiência composta do Processo Produtivo no período anterior à modularização foi de 0,501. No período posterior à modularização a eficiência composta aumentou para 0,533. Nesse sentido, percebe-se um aumento de 0,032 na eficiência do Processo Produtivo na comparação dos períodos. O cálculo da ANOVA também retorna o valor de F. Quanto maior o escore de F, pode-se afirmar que mais significativo é o *p-value* do teste ANOVA efetuado. O escore de F das médias dos períodos considerados no produto modularizado, que é de 6,425552, e o *p-value* de 0,015264, permitem afirmar que a diferença detectada é significativa. Dessa forma, é possível rejeitar a hipótese **H2a** (não existem evidências do efeito da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo) e aceitar a hipótese **H2b** (existem evidências do efeito da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo).

Quanto ao produto não modularizado, efetuaram-se os mesmos cálculos para fins confirmatórios. Percebe-se que a eficiência no período anterior à modularização foi de 0,499, e no período posterior foi de 0,497, ou seja, houve uma variação de - 0,002. No entanto, o F de 0,063992 e o *p-value* de 0,80159 não permitem afirmar que houve diferença significativa entre as médias dos períodos. Nesse sentido, entende-se que a eficiência do produto não modularizado não apresentou variação significativa ao longo dos períodos pré e pós-modularização. Entende-se que essa constatação evidencia que a melhoria na eficiência ao longo do tempo observada no Processo Produtivo pode ser atribuída à implementação da modularização. Na próxima seção, são apresentados os cálculos relativos ao dimensionamento dos efeitos da modularização no Processo Produtivo.

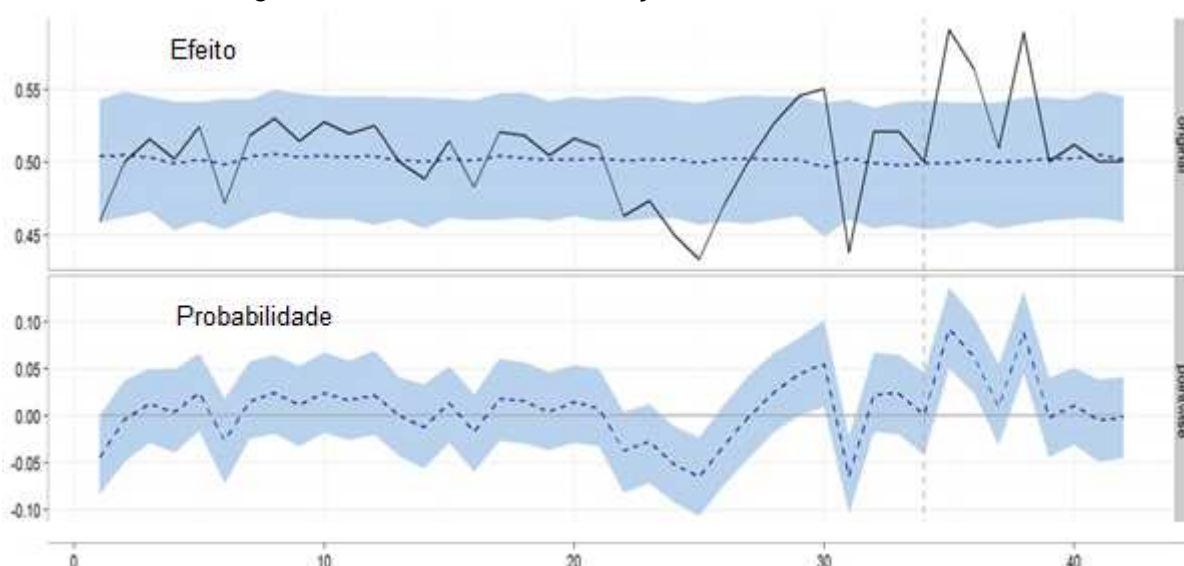
## 5.6 DIMENSIONAMENTO DOS EFEITOS DA MODULARIZAÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO

Nesta seção, apresenta-se a análise do dimensionamento do efeito causal provocado pela modularização na série temporal da eficiência do Processo Produtivo. Esse dimensionamento é efetuado com a utilização da técnica *Causallmpact*. Dessa forma, o impacto causal é o resultado dos escores de eficiência obtidos após a implementação da modularização subtraídos (-) os escores de eficiência que seriam obtidos se a modularização não tivesse sido implementada no Processo Produtivo. Entende-se que os escores de eficiência obtidos após a implementação da modularização são conhecidos, pois foram calculados com a utilização da DEA. No entanto, os escores de eficiência que seriam obtidos caso a modularização não tivesse sido implementada não são conhecidos e, dessa forma, são calculados pela técnica *Causallmpact*.

Para análise no Processo Produtivo, a série temporal de controle é representada pela eficiência do produto não modularizado ao longo do tempo. No que se refere à série temporal de resposta, esta é representada pela eficiência do produto modularizado ao longo do tempo. O tratamento pode ser compreendido como a modularização.

Dessa forma, as séries temporais relativas às eficiências dos produtos modularizado e não modularizado ao longo do tempo foram organizadas e inseridas no *software R*. Os cálculos foram retornados com a previsão do contractual e de cálculos estatísticos, que incluem o efeito médio absoluto e o efeito relativo provocado pelo tratamento (modularização). A Figura 40 ilustra o efeito da modularização na eficiência técnica do Processo Produtivo, considerando as 42 DMU's analisadas.

Figura 40: Efeito da modularização no Processo Produtivo



Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a Figura 40, deve-se considerar que o comportamento “original” contempla o comportamento atual da eficiência técnica do produto modularizado e a projeção do comportamento caso o produto não tivesse sido modularizado. O comportamento atual é representado pela linha **preta**, conforme já apresentado em gráficos anteriores. A linha pontilhada entre as DMU's 30 e 40 (mais precisamente na DMU 34) representa o ponto em que a série sofreu o tratamento, ou seja, o momento em que foi modularizada. A linha sombreada em azul representa as variações da eficiência ao longo do tempo considerando o período anterior à modularização. A linha azul pontilhada representa o comportamento médio da série de eficiência antes da modularização e estima o comportamento depois da modularização.

Dessa forma, ao analisar o comportamento “original” da série temporal considerando a estimativa do período posterior à modularização, deve-se considerar que o comportamento da eficiência atual (linha preta), que está acima da parte sombreada em azul, é o ganho de eficiência obtido com a implementação da modularização no Processo Produtivo. Caso a modularização não tivesse sido implementada, a variação da eficiência do período posterior à modularização teria ficado com as variações dentro da linha sombreada em azul, e não acima como observado.

Quanto ao comportamento da série de eficiência na Figura 40, como “pointwise” a técnica estima o comportamento do efeito em um intervalo de confiança

de 95%. Dessa forma, a linha sombreada em azul mostra como seria a variação da eficiência dentro desse intervalo. Na Tabela 26 está sintetizada a quantificação dos efeitos da implementação da modularização do produto no Processo Produtivo.

Tabela 26: Quantificação do efeito da modularização no Processo Produtivo

<b>Comportamento da eficiência</b>	<b>Eficiência média</b>
Cenário atual (modularizado)	0,533
Cenário contractual (caso não modularizasse)	0,501
Efeito absoluto	0,032
Efeito relativo	6,38%
Probabilidade do efeito causal	99,88901

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar os resultados dispostos na Tabela 26, pode-se observar o cenário atual, ou seja, a média da eficiência do produto modularizado no período posterior à modularização. A média da eficiência composta no período posterior à modularização no Processo Produtivo é de 0,533. Também é possível observar o cenário contractual do período posterior à modularização, ou seja, como seria o comportamento da eficiência composta do Processo Produtivo se a modularização não tivesse sido implementada.

Nesse sentido, se a modularização não tivesse sido implementada, a média de eficiência composta do período considerado posterior à modularização seria de 0,501. Dessa forma, pode-se concluir que com a implementação da modularização no Processo Produtivo houve um incremento de 0,032 na eficiência composta da Produção. Também é possível observar o efeito relativo, que contempla um aumento de 6,38%. Destaca-se que a probabilidade do efeito causal foi de 99,88901%, ou seja, acima dos 95% estipulados como premissa para o modelo. Após as análises do Processo Produtivo, a próxima seção apresenta uma síntese das análises efetuadas.

## 5.7 SÍNTESE DAS ANÁLISES

Após a apresentação dos resultados obtidos com as análises DEA na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo, as hipóteses de pesquisa foram testadas para avaliar o efeito da modularização sobre a eficiência técnica de cada unidade de contexto de análise. O Quadro 22 sintetiza as hipóteses testadas e os resultados obtidos.

Quadro 22: Hipóteses de pesquisa testadas

Unidade de contexto de análise	Hipóteses testadas	Resultado
Engenharia de Produtos	<b>H1a (hipótese nula):</b> Não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos	Rejeita H1a
	<b>H1b (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos	Aceita H1b
Processo Produtivo	<b>H2a (hipótese nula):</b> Não existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo	Rejeita H2a
	<b>H2b (hipótese alternativa):</b> Existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo	Aceita H2b

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto às análises efetuadas na Engenharia de Produtos, foi aceita a hipótese alternativa **H1b**, pois se identificou que existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos. Os efeitos percebidos podem ser considerados positivos, ou seja, a modularização elevou a eficiência da Engenharia de Produtos.

No que se refere às análises efetuadas no Processo Produtivo, foi aceita a hipótese alternativa **H2b**, pois se identificou que existem evidências dos efeitos da modularização sobre a eficiência técnica do Processo Produtivo. Os efeitos percebidos podem ser considerados positivos, ou seja, a modularização aumentou a eficiência do Processo Produtivo.

Após o teste de hipóteses, efetuou-se o dimensionamento dos efeitos percebidos, com o objetivo de quantificar as melhorias observadas nas eficiências compostas das unidades de análise investigadas. A quantificação dos efeitos da modularização está sintetizada na Tabela 27:

Tabela 27: Quantificação do efeito da modularização

Unidade de contexto de análise	Efeito absoluto	Efeito relativo
Engenharia de Produtos	0,270	62,79%
Processo Produtivo	0,032	6,38%

Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se um efeito de maior amplitude na Engenharia de Produtos em detrimento do Processo Produtivo. No entanto, de acordo com as análises estatísticas efetuadas, ambas as melhorias são significativas. No próximo capítulo, apresenta-se a discussão acerca dos resultados obtidos.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após as análises dos resultados, entende-se como relevante efetuar uma discussão acerca das contribuições do trabalho. Na seção 6.1 são discutidas as contribuições da pesquisa para a teoria e na seção 6.2 são elencadas as contribuições da pesquisa para a empresa.

### 6.1 CONTRIBUIÇÕES DOS RESULTADOS PARA A TEORIA

A pesquisa efetuada contribui para o conhecimento sobre modularização. Apesar de muitos benefícios serem atribuídos à utilização da modularização, pesquisas empíricas que comprovam tais melhorias são escassas. Nesse sentido, entende-se que o estudo é relevante para a teoria, pois apresenta evidências empíricas dos benefícios proporcionados pela utilização da modularização na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo de uma empresa fabricante de ônibus. Esses benefícios podem ser entendidos como melhoria na produtividade e eficiência, e sua comprovação está alinhada à proposição de Boer e Hansen (2014), que identificam a necessidade de estudos conclusivos sobre os benefícios proporcionados pela modularização na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo das empresas.

Sushandoyo e Magnusson (2012) estudaram a modularização nas empresas fabricantes de ônibus Scania e Volvo. Dentre os objetivos das organizações com a implementação da modularização destacam a busca pelo aumento da produtividade, com a economia de escala. No entanto, na pesquisa de Sushandoyo e Magnusson (2012) não houve medição desses benefícios esperados. A presente pesquisa efetua tal medição e afirma, mediante evidências, que a modularização proporciona aumento de produtividade e eficiência.

Patel e Jayaram (2014) afirmam que a modularização aumenta a produtividade nas empresas que a utilizam. No entanto, os autores não sustentam tal afirmação com evidências empíricas. Entende-se que pela presente pesquisa é possível afirmar que a modularização proporcionou aumento na produtividade e na eficiência da empresa estudada, sustentando tal afirmação com as evidências empíricas mostradas no trabalho.



Starr (2010) destaca que é importante utilizar o rigor acadêmico para planejar, modelar e medir a utilização da modularização nas empresas. A possibilidade de empregar métodos de modelagem para avaliar benefícios com o uso da modularização nas empresas também é apontada por Matsubara e Pourmahammadi (2010). Nesse sentido, no presente trabalho foi desenvolvido um modelo DEA para análise do comportamento da eficiência ao longo do tempo em uma fabricante de ônibus. Entende-se que esta pesquisa contempla aspectos considerados importantes por outros pesquisadores (efetua modelagem e medição) e apresenta contribuições para os estudos de Starr (2010) e Matsubara e Pourmahammadi (2010).

No trabalho seminal de Starr (1965), o autor sugeriu a utilização da modularização de produtos e processos como alternativa para melhoria da produtividade e da eficiência. A importância da produtividade e da eficiência, bem como o uso da modularização também foram abordados pelo autor em trabalhos posteriores. (STARR, 1973, 1975, 2010). Verifica-se que desde o trabalho de Starr (1965) até os dias atuais passaram-se quase 5 décadas, de modo que se compreende que análises como a efetuada na presente pesquisa contribuem com o trabalho seminal do autor em questão. Assim, diante do contexto apresentado, entende-se que a presente pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre modularização. A comprovação dos benefícios esperados preenche lacunas apontadas na literatura e estabelece diálogo com a comunidade acadêmica que pesquisa o tema.

Outra contribuição desta pesquisa é a evidência de que a modularização de produto apresentou efeitos de maior amplitude na Engenharia de Produtos em detrimento do Processo Produtivo. Não foi identificada na teoria tal medição e tampouco trabalhos que apontem esse resultado. Este estudo pode abrir caminho para medições referentes a efeitos no que tange a diversos tipos de modularidade (projeto, produção, uso, organizacional, serviços e ambiental).

Outro aspecto considerado é que apesar de a teoria defender que existe necessidade de medir os efeitos proporcionados pela utilização da modularização, não explica como efetuar tal medição. Nesse sentido, entende-se como uma contribuição para a teoria a apresentação da análise envoltória de dados (DEA), aliada ao *Causallmpact* como técnicas para medir efeitos longitudinais da modularização. Os modelos desenvolvidos para as análises na Engenharia de

Produtos e no Processo Produtivo podem servir de apoio para outros estudos que proponham efetuar medições de efeitos da modularização utilizando a DEA, pois organizam uma lista de variáveis a ser consideradas.

Por fim, a pesquisa estabelece causalidade entre modularização e melhoria na eficiência, mostrando que as eficiências da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo apresentaram melhoria por causa da modularização. A causalidade entre melhoria na eficiência e modularização foi estabelecida pela técnica *CausallImpact*. Destaca-se que na literatura pesquisada sobre DEA não foram identificados trabalhos que proporcionassem tal análise.

## 6.2 CONTRIBUIÇÃO DOS RESULTADOS PARA A EMPRESA

O trabalho contribuiu para a empresa na qual se desenvolveu o estudo, pois a medição efetuada comprova os benefícios esperados com a implementação da modularização. Ressalta-se que esses benefícios ainda não haviam sido medidos nessa amplitude e com a utilização de técnicas como a análise envoltória de dados e *CausallImpact*.

Quando confrontados com os resultados, os especialistas da empresa indicaram que as orientações sugeridas por esta análise podem ser úteis como parâmetros para elaborar estratégias adicionais em busca de melhorias na produtividade e eficiência no desenvolvimento de projetos e na fabricação de ônibus com uso da modularização. Os especialistas do processo também apontaram que os resultados obtidos são concisos, e que os fatos e dados apresentados estendem o conhecimento atual sobre modularização nas unidades de análise investigadas (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo). As análises de folgas e alvos podem servir para a empresa estabelecer metas de otimização de recursos na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo. Nesse sentido, os especialistas do processo destacaram o potencial das técnicas DEA e *CausallImpact* nas análises efetuadas, que fornece parâmetros para proposição e busca de melhorias.

Outro aspecto relevante para a empresa é o uso da análise envoltória de dados como técnica para efetuar medições comparativas entre produtos modularizados ao longo tempo. Tal técnica também pode ser utilizada para comparar plataformas de produtos e até mesmo para verificar o desempenho das

unidades produtivas matriz e filial. A partir dos resultados obtidos com a DEA, podem ser estabelecidas metas para melhoria da produtividade e da eficiência da organização.

Os especialistas dos processos indicaram que os escores de eficiência obtidos com a utilização da análise envoltória de dados (DEA) podem auxiliar o entendimento do desempenho das unidade de contexto de análise em função da simplificação das informações. Atualmente, a empresa possui um alto volume de indicadores, que podem ser substituídos pelo cálculo de produtividade e eficiência em DEA. Outro aspecto apontado é que o acompanhamento do desempenho ao longo do tempo fornece uma base concreta para avaliar o impacto de programas de melhoria nos processos e promover a objetividade na tomada de decisões.

Por fim, a pesquisa contribui para as empresas fabricantes de ônibus, pois pode servir como base para a implementação da modularização em outras organizações do mesmo segmento, visto que demonstra, de forma empírica, que existem benefícios significativos com o uso da modularização.

## 7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou avaliar os efeitos da modularização de produtos sobre a eficiência técnica da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo de uma empresa fabricante de ônibus. Para cumprir o objetivo proposto, realizou-se um estudo de caso em uma empresa brasileira fabricante de ônibus utilizando a técnica da análise envoltória de dados (DEA). O emprego da análise envoltória de dados (DEA) proporcionou um meio efetivo para avaliar o comportamento da eficiência ao longo do tempo na organização objeto de estudo.

Ao avaliar o comportamento da eficiência da Engenharia de Produtos ao longo do tempo, verificou-se que existem indícios de que a modularização auxiliou a melhorar, ou seja, a elevar os escores de eficiência da Engenharia de Produtos. No Processo Produtivo também foram percebidas melhorias nos escores de eficiência após a implementação da modularização. No entanto, os efeitos percebidos na Engenharia de Produtos são mais amplos do que os verificados no Processo Produtivo.

Entende-se que as melhorias observadas nas duas unidades de análise (Engenharia de Produtos e Processo Produtivo) podem ser atribuídas à implementação da modularização, levando em consideração que, para fins confirmatórios, um projeto e um produto não modularizado (considerados nesta pesquisa como variáveis de controle) também foram avaliados. A evolução da eficiência do projeto e do produto não modularizado ao longo do tempo não apresentou as mesmas melhorias observadas no projeto e no produto modular. Entendendo que ambos os projetos foram confeccionados e ambos os produtos foram produzidos nas mesmas condições, reforça-se a possibilidade de vincular os efeitos positivos observados à implementação da modularização.

A avaliação estatística com a utilização da ANOVA, que segregou os escores de eficiência nos períodos anterior e posterior à modularização, permite afirmar que existem diferenças significativas entre os grupos de eficiência. A diferença observada é que o grupo de eficiência que contempla o período posterior à modularização apresenta uma média de eficiência melhor do que o grupo de eficiência do período anterior à modularização. Esses resultados foram observados na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo.

Por fim, efetuou-se a quantificação dos efeitos observados através da técnica *Causallmpact*. Os resultados obtidos permitem afirmar que a eficiência composta da Engenharia de Produtos aumentou, em média, 0,27 após a modularização de projetos. No que tange ao Processo Produtivo, a eficiência aumentou em média 0,032. A técnica *Causallmpact* permite estabelecer causalidade entre modularização e melhoria na eficiência técnica, já que a eficiência técnica das unidades de contexto de análise investigadas apresentou melhorias por causa da utilização da modularização.

Sob o ponto de vista teórico, entende-se que a presente pesquisa apresenta contribuições para a teoria existente sobre modularização. A contribuição consiste na apresentação de evidências empíricas de que a modularização proporciona benefícios para as empresas. Nesta dissertação, esses benefícios podem ser entendidos como melhoria na eficiência da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo. Tais evidências são escassas na literatura. (NATARAJA; JOHNSON, 2011; BOER; HANSEN, 2014).

Sob o ponto de vista prático, entende-se que por meio da presente avaliação é possível demonstrar aos gestores os efeitos da modularização e alertá-los sobre pontos relevantes da Engenharia de Produtos e do Processo Produtivo que podem ser trabalhados para alavancar o desempenho da empresa. Outro aspecto a ser considerado é a comprovação de benefícios esperados com a utilização da modularização por parte da empresa investigada. As evidências apresentadas podem servir de suporte para o uso da modularização na indústria de fabricação de ônibus.

Apesar das contribuições citadas, este estudo apresenta limitações. No que se refere ao modelo DEA, não foi possível obter informações referentes às variáveis propostas no modelo inicial. Nesse sentido, foram necessários ajustes nos modelos, como a troca das variáveis horas de trabalho despendidas na elaboração dos projetos e confecção dos produtos por *lead time* de Engenharia e de Produção, dentre outras.

Outra limitação a ser considerada é que o modelo DEA definido na Engenharia de Produtos e no Processo Produtivo, apesar de ser considerado robusto e de ter sido validado pelos especialistas do processo, pode ser passível de questionamento. Nesse sentido, Cook, Tone e Zhu (2014) afirmam que em estudos utilizando a análise envoltória de dados não é possível ter certeza de que todas as

variáveis relevantes foram consideradas no modelo, mas deve-se fazer esforços para incluir todas aquelas variáveis que fazem sentido prático para a investigação.

Outro aspecto considerado como limitador foi o período de análise, visto que o período considerado anterior à modularização foi maior do que o período posterior. No entanto, essa definição ocorreu em virtude da disponibilidade de dados por parte da empresa. Quanto à variável de controle definida (projeto e produto não modularizado), este foi um veículo da linha Micro ônibus. Os produtos da Linha Micro apresentam menor complexidade do que o produto modularizado da Linha Rodoviário. No entanto, tal produto é o único não modular atualmente fabricado na empresa.

O presente estudo oferece oportunidade para discutir novas pesquisas referentes ao comportamento da eficiência ao longo do tempo em empresas de manufatura e para avaliar se projetos implementados e melhorias efetuadas nos processos realmente surtiram efeito. Pesquisas futuras podem realizar análises sobre os efeitos da modularização em outras organizações. Também se pode efetuar um *benchmark* externo entre empresas que implementaram a modularização para verificar quais estabelecem as melhores práticas e, através disso, desenvolver a utilização da modularização como estratégia nas organizações. Entende-se que análises sobre os efeitos da modularização sob o ponto de vista econômico devem ser efetuadas em estudos com maior profundidade. Nesse sentido, a avaliação da eficiência alocativa, considerada como eficiência em custos, pode ser desenvolvida em organizações que utilizam a modularização.

## REFERÊNCIAS

- ABADIE, Alberto. Semiparametric difference-in-differences estimators. **The Review of Economic Studies**, v. 72, n. 1, p. 1-19, 2005.
- ABERNATHY, William J.; UTTERBACK, James M. Patterns of industrial innovation. **Technology review**, v. 64, n. 8, p. 254-280, 1978.
- ADLER, Nicole; GOLANY, Boaz. Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe. **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 2, p. 260-273, 2001.
- ADLER, Nicole; YAZHEMSKY, Ekaterina. Improving discrimination in data envelopment analysis: PCA–DEA or variable reduction. **European Journal of Operational Research**, v. 202, n. 1, p. 273-284, 2010.
- AGRAWAL, Tarang et al. A hybrid model of component sharing and platform modularity for optimal product family design. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 2, p. 614-625, 2013.
- AGRAWAL, Vishal V.; ULKU, Sezer. The role of modular upgradability as a green design strategy. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 15, n. 4, p. 640-648, 2013.
- ANDERSEN, Per; PETERSEN, Niels Christian. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 39, n. 10, p. 1261-1264, 1993.
- ANTONAKIS, John et al. On making causal claims: A review and recommendations. **The Leadership Quarterly**, v. 21, n. 6, p. 1086-1120, 2010.
- ASAN, Umut; POLAT, Seçkin; SERDAR, Seyda. An integrated method for designing modular products. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 15, n. 1, p. 29-49, 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE ÔNIBUS (FABUS). Disponível em: <<http://www.fabus.com.br/producao.htm>>. Acesso em 15 de janeiro de 2014.
- ATHANASSOPOULOS, Andreas D. Performance improvement decision aid systems (PIDAS) in retailing organizations using data envelopment analysis. **Journal of Productivity Analysis**, v. 6, n. 2, p. 153-170, 1995.
- ATHANASSOPOULOS, Andreas D.; BALLANTINE, Joan A. Ratio and frontier analysis for assessing corporate performance: evidence from the grocery industry in the UK. **Journal of the Operational Research Society**, p. 427-440, 1995.

AUSÍN, M. Concepción; GALEANO, Pedro; GHOSH, Pulak. A semiparametric Bayesian approach to the analysis of financial time series with applications to value at risk estimation. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 2, p. 350-358, 2014.

BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. Managing in an age of modularity. **Harvard Business Review**, v. 75, p. 84-93, 1997.

BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. **Design Rules: The Power of Modularity**. Cambridge, MA: MIT Press, 2000.

BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. The value, costs and organizational consequences of modularity. **Detroit: General Motors Research and Development Center**, 2003.

BALDWIN, Carliss Young; HENKEL, Joachim. The impact of modularity on intellectual property and value appropriation. **Harvard Business School**, 2011.

BANKER, Rajiv D. et al. An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. **Research in governmental and nonprofit accounting**, v. 5, p. 125-163, 1989.

BANKER, Rajiv D.; CHARNES, Abraham; COOPER, William Wager. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BANKER, Rajiv D.; NATARAJAN, Ram. Evaluating contextual variables affecting productivity using data envelopment analysis. **Operations Research**, v. 56, n. 1, p. 48-58, 2008.

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

BARRATT, Mark; CHOI, Thomas Y.; LI, Mei. 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.

BARRETO, A.; MELLO, J.; Benchmarks de eficiência no processamento de petróleo com produtos químicos. **Relatórios de pesquisa em engenharia de produção**, v. 12, n. 4, p. 41-52, 2012.

BARTELSMAN, Eric; HALTIWANGER, John; SCARPETTA, Stefano. Cross-country differences in productivity: The role of allocation and selection. **The American Economic Review**, v. 103, n. 1, p. 305-334, 2013.



BASK, A.; LIPPONEN, M.; RAJAHONKA, M.; TINNILÄ, M. The concept of modularity: diffusion from manufacturing to service production. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 3, p. 355-375, 2010.

BASK, Anu et al. Framework for modularity and customization: service perspective. **Journal of Business & Industrial Marketing**, v. 26, n. 5, p. 306-319, 2011.

BOER, H. E. E.; HANSEN, P. H. K. Product, Organizational, and Performance Effects of Product Modularity. In: **Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2014), Aalborg, Denmark**, Springer International Publishing, p. 449-460, 2014.

BORJESSON, Fredrik. **Approaches to Modularity in Product Architecture**. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.

BRODERSEN, Kay H. et al. Inferring causal impact using Bayesian structural time-series models. **Annals of Applied Statistics**, p. 1-33, 2014.

CABIGIOSU, Anna; ZIRPOLI, Francesco; CAMUFFO, Arnaldo. Modularity, interfaces definition and the integration of external sources of innovation in the automotive industry. **Research Policy**, v. 42, n. 3, p. 662-675, 2013.

CAMP, Robert C. **Benchmarking: O caminho da Qualidade**. São Paulo: Pioneira, 1993. 250p.

CAMPAGNOLO, Diego; CAMUFFO, Arnaldo. The concept of modularity in management studies: a literature review. **International Journal of Management Reviews**, v. 12, n. 3, p. 259-283, 2010.

CAMPAGNOLO, Diego; CAMUFFO, Arnaldo. What really drives the adoption of modular organizational forms? an institutional perspective from Italian industry-level data. **Industry and Innovation**, v. 16, n. 3, p. 291-314, 2009.

CARNEVALLI, J.A.; VARANDAS JÚNIOR, A.; CAUCHICK MIGUEL, P. A. Uma investigação sobre os benefícios e dificuldades na adoção da modularidade em uma montadora de automóveis. **Produto & Produção**, v. 12, n. 1, p. 60-90, 2011.

CAUCHICK MIGUEL, P.A. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Campus: São Paulo, 2010.

ÇELEN, Aydın. The effect of merger and consolidation activities on the efficiency of electricity distribution regions in Turkey. **Energy Policy**, v. 59, p. 674-682, 2013.

CHAKRAVARTY, Amiya K.; BALAKRISHNAN, Nagraj. Achieving product variety through optimal choice of module variations. **IIE Transactions**, v. 33, n. 7, p. 587-598, 2007.

CHANDRA, Pankaj 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. L. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, p. 429-444, 1978.

CHARNES, Abraham; COOPER, William Wager; RHODES, Edwardo. Measuring the efficiency of decision-making units. **European Journal of Operational Research**, v. 3, n. 4, p. 339, 1979.

CHARNES, Abraham; COOPER, William W.; RHODES, Edward. Evaluating program and managerial efficiency: an application of data envelopment analysis to program follow through. **Management Science**, v. 27, n. 6, p. 668-697, 1981.

CHARNES, Abraham et al. Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. **Journal of Econometrics**, v. 30, n. 1, p. 91-107, 1985.

CHARNES, Abraham; COOPER, William W.; THRALL, Robert M. Classifying and characterizing efficiencies and inefficiencies in data development analysis. **Operations Research Letters**, v. 5, n. 3, p. 105-110, 1986.

CHEN, Chialin et al. A new methodology for evaluating sustainable product design performance with two-stage network data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 221, n. 2, p. 348-359, 2012.

CHEN, Kuo-Min; LIU, Ren-Jye. Interface strategies in modular product innovation. **Technovation**, v. 25, n. 7, p. 771-782, 2005.

CHEN, Liang-Hsuan; LIAW, Shu-Yi. Investigating resource utilization and product competence to improve production management: An empirical study. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 21, n. 9, p. 1180-1194, 2001.

CHENG, L.C. Assessing performance of utilizing organizational modularity to manage supply chains: Evidence in the US manufacturing sector. **International Journal of Production Economics**, v. 131, n. 2, p. 736-746, 2011.

CHUNG, M.K. **The Way of Modularization Strategy by Hyundai**. Artigo 2002. Disponível em: <<http://www.gerpisa.org/rencontre/10recontre/papers.pdf/chung>> Acesso em 24 de dezembro de 2013.

CIRAVEGNA, Luciano; ROMANO, Pietro; PILKINGTON, Alan. Outsourcing practices in automotive supply networks: an exploratory study of full service vehicle suppliers. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 8, p. 2478-2490, 2013.

COELLI, T. J. et al. **An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2005. 349p.

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

COOK, Wade D.; TONE, Kaoru; ZHU, Joe. Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. **Omega**, v. 44, n.1, p. 1- 4, 2014.

COOPER, W. W. et al. Some models and measures for evaluating performances with DEA: past accomplishments and future prospects. **Journal of Productivity Analysis**, v. 28, n. 3, p. 151-163, 2007.

CUMMINS, J. David; WEISS, Mary A. Analyzing firm performance in the insurance industry using frontier efficiency and productivity methods. In: **Handbook of Insurance**. Springer New York, p. 795-861, 2013.

DAFT, Richard L.; LEWIN, Arie Y. Perspective-Rigor and Relevance in Organization Studies: Idea Migration and Academic Journal Evolution. **Organization Science**, v. 19, n. 1, p. 177-183, 2008.

DANESE, Pamela; FILIPPINI, Roberto. Direct and mediated effects of product modularity on development time and product performance. **Engineering Management, IEEE Transactions**, v. 60, n. 2, p. 260-271, 2013.

DANESE, Pamela; FILIPPINI, Roberto. Modularity and the impact on new product development time performance: Investigating the moderating effects of supplier involvement and interfunctional integration. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 30, n. 11, p. 1191-1209, 2010.

DANILIDIS, C.; ENBLIN, V.; EBEN, K.; LINDEMANN, U. A classification framework for product modularization methods. In: **Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED**, Dinamarca, 2011.

DAVIS, Stanley M. From “future perfect”: Mass customizing. **Strategy & Leadership**, v. 17, n. 2, p. 16-21, 1989.

DAVIS, Stanley M. **Future Perfect**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1987.

DEBREU, G. The Coefficient of Resource Utilization. **Econometrica**, v. 19, p. 273-292, 1951.

DORAN, D. Rethinking the supply chain: an automotive perspective, **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 9, n. 1, p. 102-109, 2004.

DU, Gang; JIAO, Roger J.; CHEN, Mo. Joint optimization of product family configuration and scaling design by Stackelberg game. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 2, p. 330-341, 2013.

DUBÉ, Line; PARÉ, Guy. Rigor in information systems positivist case research: current practices, trends, and recommendations. **Mis Quarterly**, v. 27, n. 4, p. 597-636, 2003.

DUZAKIN, Erkut; DUZAKIN, Hatice. 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.

DYSON, Robert G. et al. Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 2, p. 245-259, 2001.

EALEY, Lance A.; GROSS, Andrew C. The global market for buses, 2000-2010. **Business Economics**, v. 43, n. 2, p. 69-76, 2008.

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

ELMARAGHY, H. et al. Product variety management. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 62, n. 2, p. 629-652, 2013.

EMROUZNEJAD, Ali; PARKER, Barnett R.; TAVARES, Gabriel. Evaluation of research in efficiency and productivity: A survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 42, n. 3, p. 151-157, 2008.

ERENS, Freek; VERHULST, Karel. Architectures for product families. **Computers in Industry**, v. 33, n. 2, p. 165-178, 1997.

ERICSON, Anna; ERIXON, Gunnar. **Controlling Design Variants Modular Product**, Dearborn, MI: ASME Press, 1999.

ERIXON, G. **Modular Function Deployment** – a method for product modularization. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.

ERIXON, Gunnar; VON YXKULL, Alex; ARNSTROEM, Anders. Modularity-the basis for product and factory reengineering. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 1-6, 1996.

ERNST, R.; KAMRAD, B. Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement. **European Journal of Operational Research**, v. 124, n. 3, p. 495-510, 2000.

ESLAMI, Robabeh; KHOVEYNI, Mohammad. Right and left returns to scales in data envelopment analysis: Determining type and measuring value. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 3, p. 500-508, 2013.

ETHIRAJ, Sendil K.; LEVINTHAL, Daniel. Modularity and innovation in complex systems. **Management Science**, v. 50, n. 2, p. 159-173, 2004.

ETHIRAJ, Sendil K.; LEVINTHAL, Daniel; ROY, Rishi R. The dual role of modularity: innovation and imitation. **Management Science**, v. 54, n. 5, p. 939-955, 2008.

FANCHON, Phillip. Variable selection for dynamic measures of efficiency in the computer industry. **International Advances in Economic Research**, v. 9, n. 3, p. 175-188, 2003.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 120, n. 3, p. 253-281, 1957.

FENG, Tianjun. ZHANG, Fugiang. The impact of modular assembly on supply chain efficiency. **Production and Operations Management**, v. 23, n. 11, p. 1985-2001, 2014.

FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. **Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2009.

FINE, Charles H.; GOLANY, Boaz; NASERALDIN, Hussein. Modeling tradeoffs in three-dimensional concurrent engineering: a goal programming approach. **Journal of Operations Management**, v. 23, n. 3, p. 389-403, 2005.

FIXSON, S.K. The multiple faces of modularity: a literature analysis of a product concept for assembled hardware products. **Technical Report, Industrial and Operations Engineering**, University of Michigan, 2003.

FOGLIATTO, Flavio; SILVEIRA, Giovani da; BORENSTEIN, Denis. The mass customization decade: an update review of the literature. **International Journal of Production Economics**, v. 138, n. 1, p. 14-25, 2012.

FREDRIKSSON, P. Operations and logistics issues in modular assembly processes: cases from the automotive sector. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 2, p. 168-186, 2006.

FREUND, John. **Estatística Aplicada. Economia, Administração e Contabilidade**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FRIED, Harold O. et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis. **Journal of Productivity Analysis**, v. 17, n. 1-2, p. 157-174, 2002.

GERSHENSON, J. K.; PRASAD, G. J.; ZHANG, Y. Product modularity: definitions and benefits. **Journal of Engineering Design**, v. 14, n. 3, p. 295-313, 2003.

GERSHENSON, John K.; PRASAD, G. Jagganath; ZHANG, Ying. Product modularity: measures and design methods. **Journal of Engineering Design**, v. 15, n. 1, p. 33-51, 2004.

GEUM, Y.; KWAK, R.; PARK, Y. Modularizing services: A modified HoQ approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 62, n. 2, p. 579-590, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GIMENEZ, Marcos Carazatto. **Proposta de reestruturação de uma família de chassis de ônibus através da análise modular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

GOLANY, Boaz; ROLL, Yaakov. An application procedure for DEA. **Omega**, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

GUPTA, Sushil; ROTH, Aleda V. STARR, Martin K. A visionary proponent for system integration, modular production, and catastrophe avoidance. **Production and Operations Management**, v. 16, n. 1, p. 1-12, 2007.

HADI-VCHEH, A.; GHELEJBEIGI, Z.; GHOLAMI, K. On the input/output reduction in efficiency measurement. **Measurement**, v. 50, p. 244-249, 2014.

HAIR JR., J. F. et al. **Fundamentos de Métodos de Pesquisa em Administração**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 471 p.

HAMDAN, Amer; ROGERS, K. J. Evaluating the efficiency of 3PL logistics operations. **International Journal of Production Economics**, v. 113, n. 1, p. 235-244, 2008.

HJORLAND, Birger. Empiricism, rationalism and positivism in library and information science. **Journal of Documentation**, v. 61, n. 1, p. 130-155, 2005.

HOLMQVIST, Tobias KP; PERSSON, Magnus L. Analysis and improvement of product modularization methods: Their ability to deal with complex products. **Systems Engineering**, v. 6, n. 3, p. 195-209, 2003.

HOPP, Wallace J.; XU, Xiaowei. Product line selection and pricing with modularity in design. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 7, n. 3, p. 172-187, 2005.

HSUAN, Juliana. Impacts of supplier–buyer relationships on modularization in new product development. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 5, n. 3, p. 197-209, 1999.

HUANG, Y.Y.; LI, S. J. Suitable application situation of different postponement approaches: standardization vs. modularization. **Journal of Manufacturing Systems**, n. 27, v.1, p.111-122, 2008.

HWANG, Shiu-Nan et al. Sustainable design performance evaluation with applications in the automobile industry: Focusing on inefficiency by undesirable factors. **Omega**, v. 41, n. 3, p. 553-558, 2013.

IYER, Ananth; SARANGA, Haritha; SESHADRI, Sridhar. Effect of Quality Management Systems and Total Quality Management on Productivity Before and After: Empirical Evidence from the Indian Auto Component Industry. **Production and Operations Management**, v. 22, n. 2, p. 283-301, 2013.

JACOBS, Mark et al. Product and process modularity's effects on manufacturing agility and firm growth performance. **Journal of Product Innovation Management**, v. 28, n. 1, p. 123-137, 2011.

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

JENKINS, Larry; ANDERSON, Murray. 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.

JIANG, Kai; LEE, Hau L.; SEIFERT, Ralf W. Satisfying customer preferences via mass customization and mass production. **IIE Transactions**, v. 38, n. 1, p. 25-38, 2006.

JOHNSON, Philip. The Challenge of Complexity in Global Manufacturing. Critical Trends in Supply Chain Management. **Supply Chain Practice**, v. 5, n. 3, p. 54-67, 2003.

JONEJA, Ajay; LEE, Neville. A modular, parametric vibratory feeder: a case study for flexible assembly tools for mass customization. **IIE Transactions**, v. 30, n. 10, p. 923-931, 2007.

JONSEN, Karsten; JEHN, Karen A. Using triangulation to validate themes in qualitative studies. **Qualitative Research in Organizations and Management: An International Journal**, v. 4, n. 2, p. 123-150, 2009.

JOO, Seong-Jong. Scheduling preventive maintenance for modular designed components: a dynamic approach. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 2, p. 512-520, 2009.

KAHMEYER, M.; WARNECKE, H. J.; SHEIDER, W. D. Fractal product design: Design for assembly and disassembly in fractal factory. In: **Proceedings of DFMA Conference**, p. 1-9, 1994.

KANG, J. A new trend of parts supply system in korean automobile industry; the case of the modular production system at Hyundai motor company. **5th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology**. v. 2, n. 1, p. 314–317, 2001.

KAO, Chiang. Network data envelopment analysis: a review. **European Journal of Operational Research**, p. 1-16, 2014.

KLEINBERG, Samantha; HRIPCSAK, George. A review of causal inference for biomedical informatics. **Journal of Biomedical Informatics**, v. 44, n. 6, p. 1102-1112, 2011.

KLEINE, Andreas. A general model framework for DEA. **Omega**, v. 32, n. 1, p. 17-23, 2004.

KNEIP, Alois; PARK, Byeong U.; SIMAR, Léopold. A note on the convergence of nonparametric DEA estimators for production efficiency scores. **Econometric Theory**, v. 14, n. 06, p. 783-793, 1998.

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

KRISHNAN, Vish; RAMACHANDRAN, Karthik. Integrated product architecture and pricing for managing sequential innovation. **Management Science**, v. 57, n. 11, p. 2040-2053, 2011.

KUBOTA, Flávio Issao, CAUCHICK MIGUEL, Paulo Augusto. Modularidade e desdobramento da função qualidade: uma análise teórica de publicações. **Revista Gestão Industrial**, v. 9, n. 3, p. 700-726, 2013.

KUBOTA, Flávio Issao; CAMPOS, Lucila Maria; CAUCHICK MIGUEL, Paulo Augusto. Classificação e análise da literatura sobre modularidade: perspectivas futuras para pesquisa. **GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias**, v. 4, n. 1, p. 604-621, 2014.

KUMAR, Soumojit; CHATTERJEE, Ashis Kumar. A heuristic-based approach to integrate the product line selection decision to the supply chain configuration. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 8, p. 2399-2413, 2013.



KUSIAK, Andrew; HUANG, Chun-Che. Development of modular products. Components, Packaging, and Manufacturing Technology, **IEEE Transactions**, v. 19, n. 4, p. 523-538, 1996.

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

LANGLOIS, Richard N. Modularity in technology and organization. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 49, n. 1, p. 19-37, 2002.

LAU ANTONIO, K. W.; RICHARD, C. M.; TANG, Esther. The complementarity of internal integration and product modularity: an empirical study of their interaction effect on competitive capabilities. **Journal of Engineering and Technology Management**, v. 26, n. 4, p. 305-326, 2009.

LAU ANTONIO, K. W.; YAM, Richard; TANG, Esther. The impacts of product modularity on competitive capabilities and performance: an empirical study. **International Journal of Production Economics**, v. 105, n. 1, p. 1-20, 2007.

LEE, Hakyeon; KIM, Chulhyun. Benchmarking of service quality with data envelopment analysis. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 8, p. 3761-3768, 2014.

LI, Jianzhi et al. A multi-objective fuzzy graph approach for modular formulation considering end-of-life issues. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 14, p. 4011-4033, 2008.

LIN, Yong; MA, Shihua; ZHOU, Li. Manufacturing strategies for time based competitive advantages. **Industrial Management & Data Systems**, v. 112, n. 5, p. 729-747, 2012.

LIU, John S. et al. Data envelopment analysis 1978–2010: A citation-based literature survey. **Omega**, v. 41, n. 1, p. 3-15, 2013.

LIU, Zhuo; WONG, Yoke San; LEE, Kim Seng. Modularity analysis and commonality design: a framework for the top-down platform and product family design. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 12, p. 3657-3680, 2010.

MACDUFFIE, John Paul. Modularity-as-Property, Modularization-as-Process, and 'Modularity'-as-Frame: Lessons from Product Architecture Initiatives in the Global Automotive Industry. **Global Strategy Journal**, v. 3, n. 1, p. 8-40, 2013.

MACEDO; SILVA, F. F.; SANTOS, R. M. Análise do Mercado de Seguros no Brasil: uma visão do desempenho organizacional das seguradoras no ano de 2003. **Revista de Contabilidade & Finanças**, v. Edição Especial - Atuária, 2006.

MARIANO, Enzo B.; ALMEIDA, M. R.; REBELATTO, DAN. Princípios Básicos para uma proposta de ensino sobre análise por envoltória de dados. In: **XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA (COBENGE 2006)**, Universidade de Passo Fundo–UPF. 2006.

MARTIN, M. V.; ISHII, K. Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. **Research in Engineering Design**, v. 13, n. 1, p. 213-235, 2002.

MATSUBARA, K. Todd; POURMOHAMMADI, Hamid. Modular vehicle production method for improved efficiency, quality and environmental responsibility. **Review of Business Research**, v. 10, n. 2, p.127-132, 2010.

MCDONALD, John. Using least squares and tobit in second stage DEA efficiency analyses. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 2, p. 792-798, 2009.

MELLO, Luís C. B. de B.; BANDEIRA, Renata A. de M.; FARIAS FILHO, José R. de. Análise da competitividade dos estaleiros nacionais fabricantes de embarcações offshore através de estudo de casos múltiplos. **Revista Produção Online**, v.11, n. 2, p. 369-398, 2011.

MIKKOLA, J.H.; GASSMANN, O. Managing modularity of product architectures: toward an integrated theory. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 50, n.2, p. 204-218, 2003.

MILLER, T.D.; ELGARD, P. Defining modules, modularity and modularization – evolution of concept in a historical perspective. **Proceeding of the 13<sup>o</sup> IPS Research Seminar**, Dinamarca, 1998.

MILTENBURG, Peter Robert. **Effects of modular sourcing on manufacturing flexibility in the automotive industry**. A study among German OEMs. Erasmus University Rotterdam, 2003.

MINTZBERG, Henry. An emerging strategy of "direct" research. **Administrative Science Quarterly**, v. 24, n. 4, p. 582-589, 1979.

MOON, Seung Ki et al. A module-based service model for mass customization: service family design. **IIE Transactions**, v. 43, n. 3, p. 153-163, 2010.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Revisão Sistemática da Literatura. In: **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 142-172, 2015.

MORRIS, D.; DONELLY, T. Insights from Industry: Supplier Parks in the Automotive Industry. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 9, n. 2, p. 129-133, 2004.

MUKHOPADHYAY, Samar K.; SETOPUTRO, Robert. Optimal return policy and modular design for build-to-order products. **Journal of Operations Management**, v. 23, n. 5, p. 496-506, 2005.

NANCI, Luiz Cesar; 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, n. 3, p. 27-35, 2004.

NAPPER, Robbie. Modular route bus design-A method of meeting transport operation and vehicle manufacturing requirements. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 38, p. 56-72, 2014.

NATARAJA, Niranjan R.; JOHNSON, Andrew L. Guidelines for using variable selection techniques in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 215, n. 3, p. 662-669, 2011.

NEGRETE, Carmita. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. **Journal of Cleaner Production**, v. 53, p. 195-203, 2013.

NEPAL, B., MONPLAISIR, L.; SINGH, N. Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. **International Journal of Production Economics**, v. 96, n. 1, p. 157-174, 2005.

NEPAL, Bimal; MONPLAISIR, Leslie; FAMUYIWA, Oluwafemi. Matching product architecture with supply chain design. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 2, p. 312-325, 2012.

OLIVEIRA I. R. **Utilização da Análise Envoltória de Dados (DEA), no Diagnóstico da Eficiência de Cultivo do Camarão Marinho**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008.

O'LEARY-KELLY, Scott W.; VOKURKA, Robert J. The empirical assessment of construct validity. **Journal of Operations Management**, v. 16, n. 4, p. 387-405, 1998.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**, London, Springer-Verlag: 1996.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering design**. London: Design Council, 1984.

PALENCIA, Alberto E.; DELGADILLO, Gonzalo E. A computer application for a bus body assembly line using genetic algorithms. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 431-438, 2012.

PANDREMENOS, J.; PARALIKAS, J.; SALONITIS, G.; CHRYSOLOURIS, J. Modularity concepts for the automotive industry: a critical review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.1, p. 148-152, 2009.

PARK, Jaehun; LEE, Dongha; ZHU, Joe. 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.

PARNAS, D.L. On the criteria to be used in decomposing system into modules. **Carnegie-Mellon University**, v. 15, n. 12, p.1053-1058, 1972.

PASTOR, J. T.; RUIZ, J. L.; SIRVENT, I. A statistical test for nested radial DEA models. **Operations Research**, v. 50, n. 4, p. 728-735, 2002.

PATEL, Pankaj C.; JAYARAM, Jayanth. The antecedents and consequences of product variety in new ventures: An empirical study. **Journal of Operations Management**, v. 32, n. 1, p. 34-50, 2014.

PERSSON, Magnus; ÅHLSTRÖM, Pär. Managerial issues in modularising complex products. **Technovation**, v. 26, n. 11, p. 1201-1209, 2006.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D. Integration analysis of product decomposition. ASME, **Design Theory and Methodology Conference**, Minneapolis, 1994.

PINE, B. J. Mass customization: The new frontier in business competition. Boston: **Harvard Business School Press**, 1993.

RAMACHANDRAN, Karthik; KRISHNAN, Vish. Design architecture and introduction timing for rapidly improving industrial products. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 10, n. 1, p. 149-171, 2008.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social Métodos e Técnicas**. São Paulo: Atlas, 1999.

ROBERTSON, David; ULRICH, Karl. Planning for product platforms. **Sloan Management Review**, v. 39, n. 4, p. 20-30, 1998.

RUGGIERO, John. Impact assessment of input omission on DEA. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 4, n. 3, p. 359-368, 2005.

SAKO, M.; MURRAY, F. Modular strategies in cars and computers. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1999. Disponível em <<http://www.impvp.mit.edu/papers/99/sako2.pdf>>. Acesso em: 25 de dezembro de 2013.

SAKO, M.; MURRAY, F. Modules in Design, Production and Use: Implications for the Global Automotive Industry. **International Motor Vehicle Program (IMVP) Annual Sponsors Meeting 5-7 October 1999**, Cambridge Massachusetts, USA, 2000.

SALVADOR, Fabrizio. Toward a product system modularity construct: literature review and reconceptualization. **Engineering Management, IEEE Transactions**, v. 54, n. 2, p. 219-240, 2007.

SALVADOR, Fabrizio; FORZA, Cipriano; RUNGTUSANATHAM, Manus. Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions. **Journal of Operations Management**, v. 20, n. 5, p. 549-575, 2002.

SANCHEZ, R.; MAHONEY, J. Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organizational design. **Strategic Management Journal**, v. 17, p. 63-76, 1996.

SANCHEZ, Ron. Modular architectures, knowledge assets and organisational learning: new management processes for product creation. **International Journal of Technology Management**, v. 19, n. 6, p. 610-629, 2000.

SAND, J. C.; GU, P.; WATSON, G. HOME: house of modular enhancement: a tool for modular product redesign. **Concurrent Engineering: Research and Applications**, v. 10, n. 1, p. 153-164, 2002.

SAUNDERS M., LEWIS P., THORNHILL A.: **Research Methods for Business Students**. Fifth edition, Pearson Education, 2009.

SCANDURA, Terri A.; WILLIAMS, Ethlyn A. Research methodology in management: Current practices, trends, and implications for future research. **Academy of Management Journal**, v. 43, n. 6, p. 1248-1264, 2000.

SCHILLING, Melissa A. Toward a general modular systems theory and its application to interfirm product modularity. **Academy of Management Review**, v. 25, n. 2, p. 312-334, 2000.

SEIFORD, Lawrence M. Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978-1995). **Journal of Productivity Analysis**, v. 7, n. 2-3, p. 99-137, 1996.

SEIFORD, Lawrence M.; THRALL, Robert M. Recent developments in DEA: the mathematical programming approach to frontier analysis. **Journal of Econometrics**, v. 46, n. 1, p. 7-38, 1990.

SEIFORD, Lawrence M.; ZHU, Joe. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. **European Journal of Operational Research**, v. 142, n. 1, p. 16-20, 2002.

SENRA, Luis Felipe Aragão de Castro et al. Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 2, p. 191-207, 2007.

SHAMMARI, Minwir. Optimization modeling for estimating and enhancing relative efficiency with application to industrial companies. **European Journal of Operational Research**, v. 115, n. 3, p. 488-496, 1999.

SIMAR, Leopold; WILSON, Paul W. Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. **Journal of Econometrics**, v. 136, n. 1, p. 31-64, 2007.

SIMAR, Léopold; WILSON, Paul W. Some problems with the Ferrier/Hirschberg bootstrap idea. **Journal of Productivity Analysis**, v. 11, n. 1, p. 67-80, 1999.

SIMAR, Leopold; WILSON, Paul W. Statistical inference in nonparametric frontier models: The state of the art. **Journal of Productivity Analysis**, v. 13, n. 1, p. 49-78, 2000.

SIMAR, Léopold; WILSON, Paul W. Testing restrictions in nonparametric efficiency models. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 30, n. 1, p. 159-184, 2001.

SIMON, H.A. The architecture of complexity. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 106, p.467-482, 1962.

SINGHAL, Kalyan; SINGHAL, Jaya. Imperatives of the science of operations and supply-chain management. **Journal of Operations Management**, v. 30, n. 3, p. 237-244, 2012.

SKINNER, Wickham. The focused factory. **Harvard Business Review**, v. 52, p. 113-121, 1974.

SODHI, ManMohan S.; TANG, Christopher S. Guiding the next generation of doctoral students in operations management. **International Journal of Production Economics**, v. 150, p. 28-36, 2014.

SONEGO, Monique. **Métodos de modularização no projeto conceitual de desenvolvimento de produtos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFGS, 2013.

SONG, Zhe; KUSIAK, Andrew. Mining Pareto-optimal modules for delayed product differentiation. **European Journal of Operational Research**, v. 201, n. 1, p. 123-128, 2010.

SOSA, Manuel; MIHM, Jurgen; BROWNING, Tyson. Linking Cyclical and Product Quality. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 15, n. 3, p. 473-491, 2013.

SOUZA, Iberê Guarani de. **Avaliação longitudinal da eficiência em uma fábrica de munições a partir da análise envoltória de dados (DEA)**. 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, 2014.

STARR, Martin K. **Product design and decision theory**. Prentice-Hall, 1963.

STARR, M. K. Modular production: a new concept. **Harvard Business Review**, v. 3, p. 131-142, 1965.

STARR, Martin K. Productivity is the USA's Problem. **California Management Review**, v. 16, n. 2, p. 32-36, 1973.

STARR, Martin K. There is a productivity problem in the world. **Perspectives**, v. 3, n. 1, p. 6-7, 1975.

STARR, M. K. Modular production: a 45 years hold concept. **International Journal of Operation and Production Management**, v.30, n.1, p. 7-19, 2010.

STONE, R. B.; WOOD, K. L.; CRAWORD, R. H. A heuristic method for identifying modules for product architectures. **Design Studies**, v. 21, n. 1, p. 5-31, 2000.

SUSHANDOYO, Dedy; MAGNUSSON, Thomas. A two-way relationship between multi-level technological change and organizational characteristics-cases involving the development of heavy hybrid buses. **Technovation**, v. 32, n. 7, p. 477-486, 2012.

SWINK, Morgan; TALLURI, Srinivas; PANDEJPONG, Temyos. Faster, better, cheaper: a study of NPD project efficiency and performance trade-offs. **Journal of Operations Management**, v. 24, n. 5, p. 542-562, 2006.

THOMAS, Douglas J.; WARSING, Donald P. A periodic inventory model for stocking modular components. **Production and Operations Management**, v. 16, n. 3, p. 343-359, 2007.

THOMPSON, Russell G. et al. The role of multiplier bounds in efficiency analysis with application to Kansas farming. **Journal of Econometrics**, v. 46, n. 1, p. 93-108, 1990.

TRAPPEY, Amy JC; CHIANG, Tzu-An. A DEA benchmarking methodology for project planning and management of new product development under decentralized profit-center business model. **Advanced Engineering Informatics**, v. 22, n. 4, p. 438-444, 2008.

TSENG, Hwai-En; CHANG, Chien-Chen; CHENG, Chih-Jen. Disassembly-oriented assessment methodology for product modularity. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 14, p. 4297-4320, 2010.

UEDA, Tohru; HOSHIAI, Yoko. Application of principal component analysis for parsimonious summarization of DEA inputs and/or outputs. **Journal of the Operations Research Society of Japan-Keiei Kagaku**, v. 40, n. 4, p. 466-487, 1997.

ULKU, Sezer; SCHMIDT, Glen M; DIMOFTE, Claudiu V. Consumer valuation of modularly upgradeable products. **Management Science**, v. 58, n. 9, p. 1761-1776, 2012.

ULRICH, K.T., TUNG, K., 1991. Fundamentals of product modularity. In: **Proceedings of the 1991 ASME Winter Annual Meeting Symposium on Issues in Design/ Manufacturing Integration**, Atlanta, GA, 1991.

ULRICH, Karl. The role of product architecture in the manufacturing firm. **Research policy**, v 24, n. 3, p. 419-440, 1995.

VENKATESH, Viswanath; BROWN, Susan A.; BALA, Hillol. Bridging the qualitative-quantitative divide: guidelines for conducting mixed methods research in information systems. **MIS Quarterly**, v. 37, n. 1, p. 37-52, 2013.

VIERO, Carlos Frederico. **Metodologia de projeto para arranjo estrutural de carroceria de ônibus através de sistemas modulares**: um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Projetos e Processos de Fabricação), Programa de Pós-graduação em Projetos e Processos de Fabricação, Universidade de Passo Fundo, UPF, 2013.

VON GILSA, Charles. **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.

VOSS, Christopher A; TSIKRIKTSIS, Nikos; FROHLICH, Mark. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195-219, 2002.

WAGNER, Janet M.; SHIMSHAK, Daniel 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.

WORREN, Nicolay; MOORE, Karl; CARDONA, Pablo. Modularity, strategic flexibility, and firm performance: a study of the home appliance industry. **Strategic Management Journal**, v. 23, n. 12, p. 1123-1140, 2002.



YAMADA, Y.; MATUI, T.; SUGIYAMA, M. New analysis of efficiency based on DEA. **Journal of the Operations Research Society of Japan**, v. 37, p.158-167. 1994.

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

ZACHARIADIS, Markos; SCOTT, Susan; BARRETT, Michael. Methodological implications of critical realism for mixed-methods research. **Mis Quarterly**, v. 37, n. 3, p. 855-879, 2013.

ZENG, Li; ZHOU, Shiyu. Variability monitoring of multistage manufacturing processes using regression adjustment methods. **IIE Transactions**, v. 40, n. 2, p. 109-121, 2007.

ZHU, Joe. Multi-factor performance measure model with an application to Fortune 500 companies. **European Journal of Operational Research**, v. 123, n. 1, p. 105-124, 2000.