

CARLOS ALBERTO USHIZIMA

**Uma abordagem inovadora para medir a eficiência do ciclo de manufatura por meio de
um novo modelo multiobjetivo de análise envoltória de dados**

Carlos Alberto Ushizima

Uma abordagem inovadora para medir a eficiência do ciclo de manufatura por meio de um novo modelo multiobjetivo de análise envoltória de dados

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, na área de Modelagem Organizacional Linha de Pesquisa: Modelagem Organizacional.

Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Guaratinguetá - SP
2018

Ushizima, Carlos Alberto
U85a Uma abordagem inovadora para medir a eficiência do ciclo de manufatura por meio de um novo modelo multiobjetivo de análise envoltória de dados / Carlos Alberto Ushizima – Guaratinguetá, 2018.
77 f : il.
Bibliografia: f. 66-70

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

1. Processo decisório por critério múltiplo 2. Produção enxuta
3. Processos de fabricação I. Título.

CDU 65.012.4(043)


Ana Cristina Figueiredo Loureiro
Ana Cristina Figueiredo Loureiro
Bibliotecária CRB-8/7094

CARLOS ALBERTO USHIZIMA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”

PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO: MESTRADO ACADÊMICO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Otávio José de Oliveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA
Orientador/UNESP/FEG


Prof. Dr. MESSIAS BORGES E SILVA
UNESP/FEG


Dr. DIMAS CAMPOS DE AGUIAR
Maxion Structural Compontes

Setembro de 2018

DADOS CURRICULARES
CARLOS ALBERTO USHIZIMA

NASCIMENTO 08.08.1963 ó São Paulo / SP

FILIAÇÃO Mitomi Ushizima
 Marie Ushizima

1981/1985 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
 Universidade Estadual Paulista, Campus Guaratinguetá-SP

Aos meus pais Mauro e Marie

À minha esposa Maria Clara

Aos meus filhos Mariana e Marcos

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, provendo nossas necessidades ao longo de toda esta caminhada.

Ao Luciano Pinho Nilo Júnior pelo apoio incondicional para que eu pudesse realizar este trabalho. Ao Péia, ao Eduardo Alves Oliveira, ao Rodrigo Fugihara, ao Elias Oliveira de Souza, ao Luis Fernando Lucas da Silva e ao Marcelo Amaral por compartilharem seus tempos, conhecimentos e parte de suas vidas profissionais.

Ao Bene amigo e companheiro de longa data no trabalho e mais recentemente nos estudos.

Ao Thiago Gaban e à Raphaela Bueno do nosso grupo de pesquisa.

Aos colaboradores da UNESP pela presteza e cuidado ao lidar com pessoas.

Aos professores do programa de pós-graduação por apresentar-nos possibilidades.

Ao professor Dr. Fernando Augusto Silva Marins por indicar e conduzir-nos pelos melhores caminhos.

Ao Dr. Dimas Campos de Aguiar e ao professor Dr. Messias Borges e Silva por aceitarem o convite para a banca e pelas valiosas contribuições dadas para a elaboração deste trabalho.

Ao orientador professor Dr. Aneirson Francisco da Silva pelo incentivo, paciência, respeito e bom humor. Por toda vida e conhecimento compartilhados em sala de aula, nas nossas conversas e reuniões semanais. Pelas correções dos meus erros, de alguns textos e formulações inclusive.

oAquele que ama a correção, ama a ciência,
mas o que detesta a reprimenda é um
insensato.

Provérbios 12, 1

RESUMO

A estratégia da organização *Green e Lean Manufacturing* enfatiza a redução de desperdícios, resíduos e seus impactos ambientais, o aumento da eficiência, a melhoria da qualidade e a redução do tempo de ciclo pela eliminação das atividades que não agregam valor. Normalmente, as empresas adotam o indicador *Manufacturing Cycle Efficiency* para identificar e melhorar seus processos buscando atender aos requisitos da *Lean Manufacturing*. Este trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada, a abordagem do problema é quantitativa e o método utilizado de Modelagem e Simulação, além da técnica não paramétrica da Análise Envoltória de Dados Multi-critério para calcular otimamente um novo indicador denominado *Value Added Activities in Manufacturing Processes* (VAAMP) ou Índice de Atividades de Valor Agregado em Processos de Manufatura para medir a eficiência dos processos produtivos por meio de parâmetros da *Lean e Green Manufacturing*. Uma aplicação em uma indústria multinacional de autopeças foi feita com o objetivo de testar e validar o novo indicador. Como vantagem imediata foi possível aos gestores tratar informações adicionais ao indicador *Manufacturing Cycle Efficiency*, adotado pela empresa, incorporando outros parâmetros importantes citando como exemplo: a quantidade de sucata, o volume das vendas, a quantidade de peças em processo, os gestores e especialistas em *Lean e Green Manufacturing* da empresa estudada, que observaram boa adesão à prática dos novos valores calculados, quando comparados aos cálculos tradicionalmente adotados. Outras vantagens deste novo indicador também são destacadas, como o estabelecimento de um *ranking* de eficiência entre os processos produtivos analisados e a determinação de metas viáveis para tornar eficientes os processos identificados como ineficientes.

PALAVRAS-CHAVE: *Multiple criteria data envelopment analysis. MCDEA. Green manufacturing. Lean manufacturing. Value-added activities. Manufacturing processes.*

ABSTRACT

The strategy of organizational Green & Lean Manufacturing emphasizes on reducing waste and environmental impacts, increasing efficiency, quality improvement, and cycle time reduction by eliminating non-value-added activities. Usually enterprises adopt the indicator Manufacturing Cycle Efficiency to identify and make improvement so as to meet Lean Manufacturing requirements. This work is classified as an applied research, approach of problem is quantitative and based on Modeling and Simulation, in addition to the non-parametric technique the Multi-Criteria Data Envelopment Analysis, to optimally calculate a new indicator, hereby called as Value-Added Activities in Manufacturing Processes, to measure the efficiency of productive processes through Green and Lean Manufacturing parameters. An application of new indicator was made in a multinational auto parts industry with the purpose of validating and testing it. As an immediate advantage of this new indicator, it was possible for managers to insert more information, as incorporating aspects associated with Green Manufacturing, in the calculation of the Manufacturing Cycle Efficiency, making it more consistent and representative of what is happening in practice. Among this additional information on the real processes analyzed, we can mention, for example, the amount of scrap generated, the amount of sales invoicing, the quantity of work in process, the quantity of finished products in stock, among others. The results of a new indicator were validated by specialists in Green & Lean Manufacturing, managers of the studied company, who observed greater adherence to the practice of these new calculated values, when compared to the calculations traditionally adopted. Other a new indicator advantages are also highlighted, such as the establishment of a ranking of efficiency between the productive processes analyzed and the determination of feasible goals to make efficient the processes identified as inefficient.

KEYWORDS: Multiple criteria data envelopment analysis. Green manufacturing. Lean manufacturing. Value-added activities. Manufacturing processes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 ó Importância e atualidade dos temas estudados	18
Figura 2 ó Número de publicações pesquisa palavras-chave <i>“Non-Value-Added Time”</i> ou <i>“Non-Value-Added Activities”</i>	20
Figura 3 ó Número de citações de pesquisa com as palavras-chave <i>“Non-Value-Added Time”</i> ou <i>“Non-Value-Added Activities”</i>	20
Figura 4 ó Número de publicações e o número de citações em MCDEA.....	21
Figura 5 ó Áreas de conhecimento com aplicações do MCDEA.	22
Figura 6 ó Abordagem metodológica proposta	25
Figura 7 ó Tempo total do Ciclo de entrega que Agrega Valor e Não Agrega Valor	28
Figura 8 ó Intersecção entre <i>Lean</i> e <i>Green Manufacturing</i>	30
Figura 9 ó Macro Fluxo do processo.	46
Figura 10 ó Máquina Rollforming e Perfil U gerado.....	46
Figura 11 ó Máquina Puncionadeira CNC e Perfil U perfurado	47
Figura 12 ó Parametrização do modelo no Solver.....	53
Figura 13 ó Pseudo-código de programação VBA Excel®	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 ó Relatório de citações da pesquisa na <i>Web of Science</i>	19
Tabela 2 ó Dados coletados de <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> por DMU.....	51
Tabela 3 ó Comparativo das Eficiências método MCE x modelos DEA	56
Tabela 4 ó Coeficientes de Correlação de Spearman entre os métodos.....	58
Tabela 5 ó Variáveis <i>input</i> e <i>output</i> relevantes por DMU no modelo TriO-MCDEA.....	60
Tabela 6 ó Classificação das DMUs com Super-eficiência	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 ó Parâmetros selecionados para <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> do modelo	48
Quadro 2 - Pesquisa das chaves <i>lean manufacturing</i> , <i>green manufacturing</i> e <i>quantitative</i> na base <i>Web of Science</i>	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
BiO-MCDEA	<i>Bi-Objective Multiple Criteria Data Envelopment Analysis</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CMA	Comitê de Meio Ambiente
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DEA-BCC	<i>Data Envelopment Analysis Banker, Charnes and Coopers</i>
DEA-CCR	<i>Data Envelopment Analysis Charnes, Coopers and Rhodes</i>
DMU	<i>Decision Making Units</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
GM	<i>Green Manufacturing</i>
GP	<i>Goal Programming</i>
GPDEA	<i>Goal Programming Data Envelopment Analysis</i>
GSCM	<i>Green Supply Chain Management</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LA	<i>Lean Assessment</i>
LM	<i>Lean Manufacturing</i>
LP	<i>Linear Programming</i>
MCDEA	<i>Multiple Criteria Data Envelopment Analysis</i>
MCE	<i>Manufacturing Cycle Efficiency</i>
MPa	Mega Pascal, (unidade de medida para tensão ou pressão)
MQCL	<i>Minimum Quantity Cooling Lubrication</i>
NVAA	<i>Non-Value Added Activity</i>
NVAT	<i>Non-Value Added Time</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OME	<i>Overall Machine Effectiveness</i>
RTS	<i>Returns to Scale</i>
SBM	<i>Slack Based Measure</i>
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SGI	Sistema de Gestão Integrado
SGSSO	Sistema de Gestão de Segurança e Saúde Ocupacional
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
SMED	<i>Single Minute Exchange of Die</i>
SPT	Sistema de Produção Toyota
TMC	<i>Toyota Motors Corporation</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
TriO-MCDEA	<i>Tri-Objective Multiple Criteria Data Envelopment Analysis</i>
VAAMP	<i>Value Added Activity in Manufacturing Process</i>
VAT	<i>Value Added Time</i>
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>
WGP	<i>Weighted Goal Programming</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	15
1.3	QUESTÕES E OBJETIVOS DA PESQUISA	22
1.4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E MATERIAIS.....	23
1.5	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	25
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	O SISTEMA <i>LEAN MANUFACTURING</i> E O <i>GREEN MANUFACTURING</i>	27
2.2	A ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)	32
2.2.1	Os modelos clássicos dos multiplicadores DEA CCR (CRS) e BCC (VRS) orientados ao <i>input</i>	35
2.2.2	Os modelos de Análise Envoltória de Dados Multi-critério.....	37
2.2.3	O modelo ponderado Bi-Objetivo (BiO-MCDEA).....	39
2.2.4	Modelo ponderado Bi-Objetivo estendido.....	40
2.2.5	Modelo de Programação por Metas combinado com Análise Envoltória de Dados Multi-critério.....	41
2.2.6	Modelo Tri-Objetivo de Análise Envoltória de Dados Multi-critério	42
3	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA.....	45
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	45
3.1.1	Identificação do problema.....	47
3.1.2	Modelagem do problema.....	47
4	APLICAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
4.1	COLETA DE DADOS.....	50
4.2	SOLUÇÃO DO MODELO.....	52
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	57
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	64
5.1	RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DE PESQUISA E VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS	64
5.2	PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A - Resultados de pesquisa na base <i>Web of Science</i>	71

1 INTRODUÇÃO

Apresentam-se neste capítulo as considerações iniciais, a justificativa, as questões e os objetivos da pesquisa, sua delimitação, os materiais e métodos utilizados, e por fim a estrutura desta dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A concorrência global impõe intensa pressão sobre as organizações no sentido de melhorar a qualidade dos seus produtos, reduzir seus *lead-times*, aumentar a flexibilidade dos processos e reduzir continuamente seus custos (KHANCHANAPONG *et al.*, 2014).

Nesse contexto, os desafios mais importantes para sobreviver em um mercado competitivo é o fornecimento de produtos e serviços com a mais alta qualidade e menor custo (AZADEH *et al.*, 2015).

O investimento em tecnologias limpas, *design* baseado em sustentabilidade e a criação de valor para a sociedade são estratégias de desenvolvimento adotadas pelas empresas automotivas, visando mitigar os impactos ambientais e sociais (SILVA *et al.*, 2017). Desta maneira, o *Lean Manufacturing* (LM) ou Sistema de Produção Toyota - SPT (OHNO, 1997) baseia-se na eliminação total do desperdício e produção somente do que é necessário. Para tanto é preciso identificar completamente a ocorrência e a natureza de oito tipos destes desperdícios (OHNO, 1997; HOMA SHEIKH-SAJADIEH *et al.*, 2013; CHIARINI, 2014; AZADEH *et al.*, 2015):

- a) Defeito ó um produto ou serviço que está fora da especificação exigindo recursos para retrabalho;
- b) Super-produção ó produzir itens em excesso ou antes do prazo necessário para estar em estoque;
- c) Espera por peças ó aguardar uma etapa anterior do processo ser concluída;
- d) Talento não utilizado ó subutilizar a capacidade dos colaboradores, sem a participação dos funcionários no processo;
- e) Transportes desnecessários ó Transporte de itens e/ou informações desnecessárias ao processo;
- f) Inventário ó Inventário ou informação ociosa (que não está sendo processada);

- g) Movimento ó Movimentos dispensáveis de equipamentos e/ou pessoas em decorrência de questões ergonômicas, layout inadequado ou à procura de itens perdidos;
- h) Processamento Extra ó Realização de atividades dispensáveis para a produção ou serviço prestado.

O Sistema de Produção Toyota baseado no *Lean Thinking* ou Pensamento Enxuto é definido como uma abordagem de negócios, que melhor oferece valor para os clientes, eliminando atividades que não agregam valor (SOUZA e ALVES, 2016). Aqlan e Al-Fandi (2018) conceituam que o *Lean Manufacturing* está baseado na recusa em aceitar desperdícios.

Segundo Azadeh *et al.* (2015) estas perdas podem ser classificadas em três grupos denominados: *MUDA* são atividades que não agregam valor ao processo (desperdícios), *MURI* refere-se a qualquer variação que leve a falta de regularidade e *MURA* são atividades que geram estresse ou esforço sobre os equipamentos ou colaboradores (sobrecarga). Este trabalho tem como foco a eliminação de *MUDA* (desperdícios) para melhorar o desempenho das organizações, considerando aspectos *Green Manufacturing* (GM) e *Lean Manufacturing* (LM).

A eliminação dos desperdícios é a forma mais eficaz para tornar um negócio rentável, pois visa melhorar o desempenho dos processos de fabricação, reduzindo ou eliminando atividades que não agregam valor ou *Non-Value-Added Activities* (NVAA) (HOMA SHEIKH-SAJADIEH *et al.* (2013)

As empresas normalmente utilizam o indicador *Manufacturing Cycle Efficiency* (MCE) para identificar e melhorar o NVAA. Neste sentido, um novo indicador para o cálculo das Atividades que Agregam Valor aos Processos de Manufatura ou *Value-Added Activities in Manufacturing Processes* (VAAMP) será proposto para identificar oportunidades de melhoria nos processos de manufatura.

Por meio de um procedimento inovador, o VAAMP baseia-se em técnicas de Pesquisa Operacional, modelos de Análise Envoltória de Dados ou *Data Envelopment Analysis* (DEA) de (CHARNES *et al.*, 1978) desenvolvida para medir a eficiência de Unidades Tomadoras de Decisão ou *Decision Making Units* (DMUs), mais especificamente de modelos de Análise Envoltória de Dados Multi-critério ou *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis* (MCDEA) desenvolvido por Li e Reeves (1999), e por fim uma abordagem de Programação por Metas ó *Goal Programming* (GP) (SILVA *et al.*, 2013; SILVA e MARINS, 2014; SILVA *et al.*, 2015).

1.2 Justificativa e Contribuição Científica

Nesta seção descreve-se a importância do tema pesquisado que é identificado como uma lacuna de conhecimento obtida por meio de uma revisão da literatura, deste fato percebe-se a relevância deste trabalho como uma contribuição científica. Além disso, pela abordagem metodológica, pelo novo modelo e o novo indicador propostos pode-se caracterizá-lo como inovador e, finalmente, por atender a uma necessidade real da empresa estudada traz notadamente uma contribuição e novos conhecimentos para a organização como a aplicação de modelos DEA e uma alternativa ao cálculo do MCE levando em conta conceitos de *Green* e *Lean Manufacturing*.

Desde os primeiros anos após o surgimento da DEA o problema de fraco poder de discriminação e a atribuição irreal de pesos às variáveis de entrada e ou saída é citada por diversos autores quando modelos clássicos são utilizados para lidar com problemas onde o número de DMUs é muito pequeno.

Neste cenário, Banker *et al.* (1989) propõem a regra de ouro (*Golden Rule*) da DEA que sugere que são necessárias uma quantidade de DMUs maior ou igual a três vezes a soma do número de parâmetros de entrada e de saída ou maior ou igual ao produto do número de parâmetros de entrada e de saída, adotando o maior entre os dois valores calculados.

Li e Reeves (1999) propõem um modelo original Tri-Objetivo denominado *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis* (MCDEA) para lidar com situações onde a regra de ouro de Banker *et al.* (1989) não é atendida.

Bal *et al.* (2010) utilizam uma abordagem de Programação de Metas para desenvolver a *Goal Programming and Data Envelopment Analysis* (GPDEA) sobre este modelo reivindicando ser esta a solução para obter-se uma dispersão de pesos mais realista e maior poder de discriminação,

Ghasemi *et al.* (2014) apontam inconsistências na proposta de Bal *et al.* (2010) e apresentam um novo modelo Bi-Objetivo DEA Múltiplos Critérios (BiO-MCDEA) para contornar as mesmas limitações já descritas. Uma versão deste modelo encontrada em Silva *et al.* (2017) é aplicada em problema real em uma empresa de autopeças combinando o BiO-MCDEA com *Overall Equipment Effectiveness* ó OEE (NALLUSAMY, 2016) que é baseado em conceitos da *Lean Manufacturing*.

Hatami-Marbini e Toloo (2017) apresentam um modelo baseado no modelo de Ghasemi *et al.* (2014) BiO-MCDEA estendido (*Extended-MCDEA*) focado em calcular e atribuir um limite α (pesos) inferior ótimo para as variáveis de entrada e saída.

Por fim, Rubem *et al.* (2017) propõem um modelo WGP-MCDEA CCR baseado em Programação de Metas (GP) para resolver as inconsistências existentes no modelo de Bal *et*

al. (2010) sendo que os autores propõem como pesquisas futuras, testar o modelo WGP ó MCDEA em uma aplicação real.

Do ponto de vista de vista de um processo produtivo a *Lean Manufacturing* é uma estratégia gerencial focada em eliminar desperdícios (*MUDA*) porque ajuda a identificar com clareza as atividades que agregam valor e as que não acrescentam valor podendo ou não ser evitadas (SHAHIN *et al.*, 2016). Para Salem e Deif (2017) o termo *Green Manufacturing* surge para refletir o novo paradigma de manufatura impelida a adotar as várias estratégias verdes como objetivos e princípios bem como o uso de técnicas lançando mão das tecnologias e inovações emergentes.

De acordo com Helleno *et al.* (2017), os modelos de gestão de operações acompanham as mudanças nas demandas da sociedade que busca por melhores condições de trabalho, produção limpa, qualidade de vida, entre outras.

Para Thanki *et al.* (2016) enquanto a *Lean Manufacturing* tem como objetivo reduzir desperdícios, a *Green Manufacturing* (DÜES *et al.*, 2013) tem como foco gerir a questão de resíduos ambientais e também o uso eficiente dos recursos disponíveis.

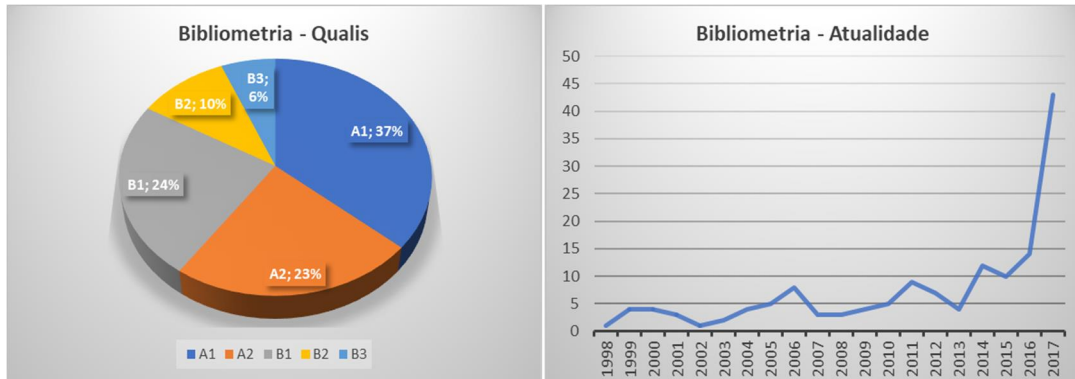
Foram realizadas pesquisas na base *Web of Science* no período de 1998 a 2018 com as palavras-chave *Lean Manufacturing*, *Green Manufacturing*, *Non-Value-Added Time*, *Non-Value-Added Activities*, *Data Envelopment Analysis* e *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis* para evidenciar a importância do tema.

A Figura 1 apresenta nos gráficos que 84% das publicações utilizadas são de periódicos de alto impacto¹ avaliados Qualis A1, A2 e B1, também mostra a atualidade do assunto dos temas comentados preliminarmente, sendo que 50% destas publicações ocorreram nos últimos quatro anos, de um período pesquisado de 20 anos.

Também foi possível identificar lacunas de pesquisa, cujas proposições pudessem trazer uma contribuição científica para a literatura de MCDEA, *Lean* e *Green Manufacturing*.

¹ A classificação Qualis Periódicos conta com atualização anual onde são atribuídos indicativos de qualidade A1, A2, B1, B2, B3, B4, B5 e C, sendo A1 o estrato mais elevado. O Relatório Qualis Periódicos é publicado pela CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Figura 1 ó Importância e atualidade dos temas estudados



Fonte: *Web of Science* (2018).

A Tabela 1 apresenta os dados do relatório de citações da pesquisa sendo que o item #1 utilizou a palavras-chave "*Lean Manufacturing*" (LM), retornando 1.317 publicações com 10.141 citações, excluídas as auto-citações e o item #2 utilizou a palavras-chave "*Green Manufacturing*" (GM) e retornou 688 publicações com 4.334 citações.

Tabela 1 ó Relatório de citações da pesquisa na *Web of Science*

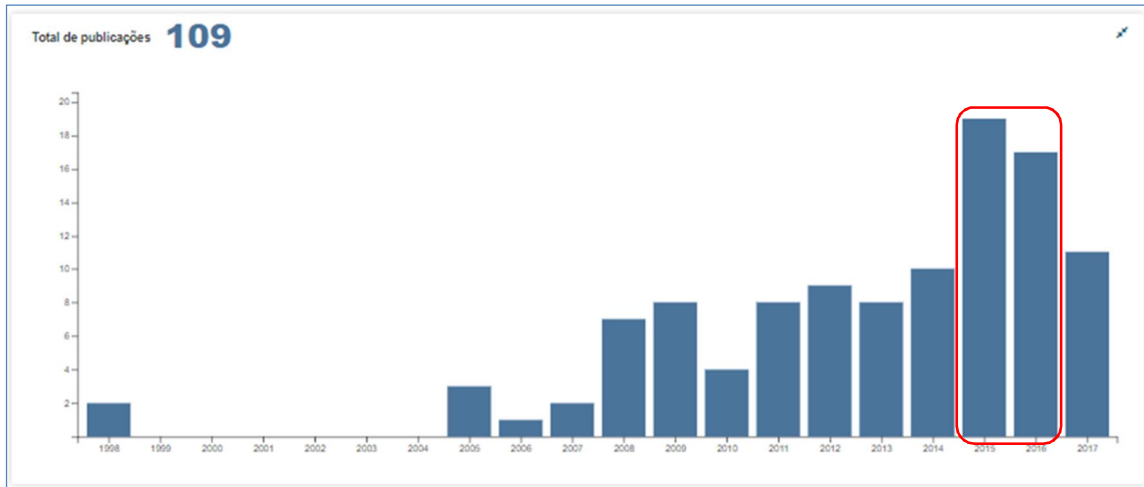
ITEM	Palavras-chave e combinações pesquisadas	Publicações	Citações
# 1	" <i>Lean Manufacturing</i> "	1.317	10.141
# 2	" <i>Green Manufacturing</i> "	688	4.334
# 3	" <i>Non-Value-Added Time</i> " or "Non-Value-Added Activities"	109	438
# 4	" <i>Data Envelopment Analysis</i> "	11.193	> 50.000
# 5	" <i>Multiple Criteria Data Envelopment Analysis</i> "	8	258
# 6	#1 e #2	25	112
# 7	#1 e #3	28	142
# 8	#2 e #3	1	1
# 9	#1 e #2 e #3	1	1
# 10	#1 e #4	4	99
# 11	#2 e #4	4	4
# 12	#1 e #5	0	0
# 13	#2 e #5	0	0

Fonte: Relatório de citações da base *Web of Science* (2018)

O item #3 é melhor explicado pelas Figuras 2 e 3, que apresentam respectivamente, o resultado do número de publicações e citações com as palavras-chave "*Non-Value-Added Time*" (NVAT) ou "*Non-Value-Added Activities*" (NVAA), na base *Web of Science*, notou-se um número crescente de publicações e citações na última década.

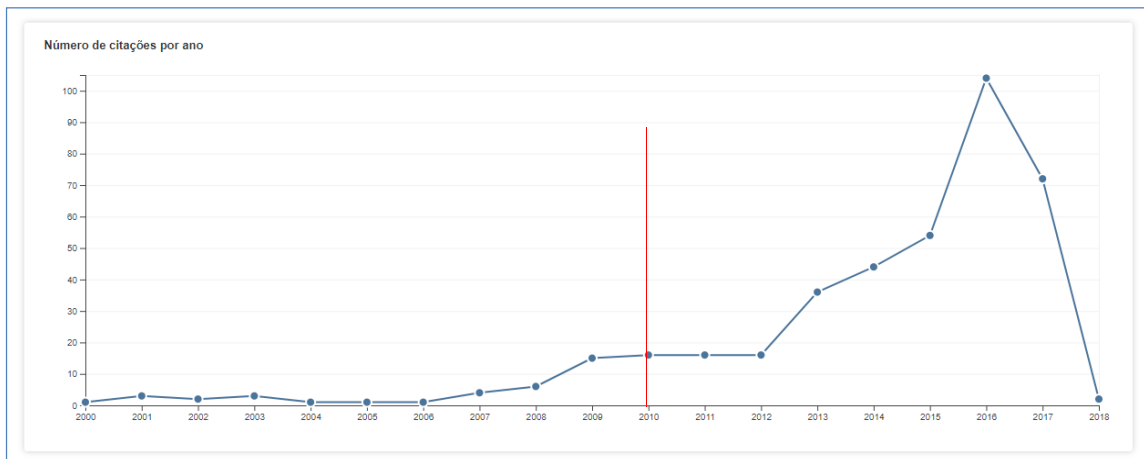
Conforme os resultados gerados na Figura 2 existem 109 publicações deste tema, com uma grande ocorrência no período de 2015 e 2016 o que traduz a contemporaneidade do assunto aqui tratado.

Figura 2 ó Número de publicações pesquisa palavras-chave *Non-Value-Added Time* ou *Non-Value-Added Activities*



Fonte: Adaptado do relatório de citações da *Web of Science* (2018).

Figura 3 ó Número de citações de pesquisa com as palavras-chave *Non-Value-Added Time* ou *Non-Value-Added Activities*



Fonte: Adaptado do relatório de citações da *Web of Science* (2018).

O item #4 que pesquisa a chave *Data Envelopment Analysis* (DEA), trouxe 11.193 publicações com mais de 50.000 citações. Notou-se que este foi um assunto amplamente abordados e aplicados na solução de vários problemas industriais e de serviços.

Quando avaliados separadamente, não se percebe qualquer oportunidade com os temas LM, DEA, NVAT e NVAA, pois há uma grande quantidade de publicações. No entanto, quando combinou-se as palavras-chave dos itens #1 e #3, *Lean Manufacturing* e *Non-Value Added Time* ou *Non-Value Added Activities*, retornaram da pesquisa 28 publicações com 142 citações.

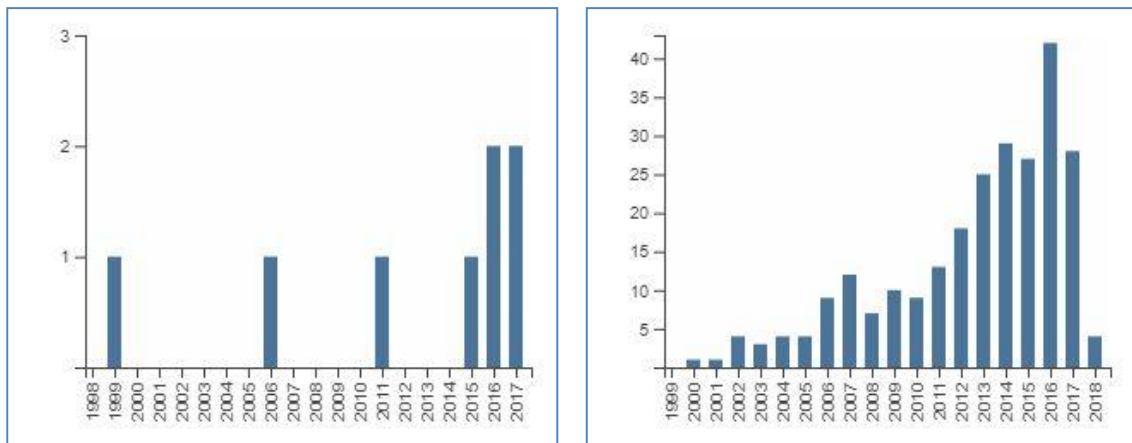
De modo semelhante, se combinadas as palavras-chave dos itens #1 e #4 "*Lean Manufacturing*" e "*Data Envelopment Analysis*" quatro artigos com noventa e nove citações foram encontrados e dos itens #2 e #4 ou "*Green Manufacturing*" e "*Data Envelopment Analysis*" somente quatro artigos com quatro citações. Foi evidenciado que poucas publicações ocorreram no período pesquisado. Desta maneira, surge uma primeira oportunidade em abordar os temas LM e DEA, bem como GM e DEA combinados, pois ficou demonstrada uma importante lacuna que confere um caráter inovador à pesquisa.

Vários autores têm focado nos conceitos e benefícios da LM para as organizações (AZADEH *et al.*, 2015), porém, pouco tem sido feito pelo tema *Lean Assessment* (LA) para os diversos tipos de sistema de fabricação (SINGH *et al.*, 2010).

Azadeh *et al.* (2015) comentam que a medida do desempenho é uma das questões mais importantes nos sistemas de fabricação e serviços, no qual a maioria dos gestores está interessada em conhecer para ter mais controle sobre os processos de produção.

Utilizando-se as palavras-chave "*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*" (MCDEA) foram encontradas apenas oito publicações com 258 citações, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 ó Número de publicações e o número de citações em MCDEA.



Fonte: *Web of Science* (2018).

A Figura 5 apresenta as aplicações utilizando modelos "*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*" (MCDEA) pelas áreas de conhecimento como: Pesquisa Operacional, *Management Science*, Gestão, Tecnologia da Ciência *Green* Sustentável, sendo que este trabalho também contempla grande parte destas áreas de pesquisa.

Figura 5 ó Áreas de conhecimento com aplicações do MCDEA.



Fonte: *Web of Science* (2018).

Não foi encontrada nenhuma publicação na base de dados quando combinados os itens #1 e #5 ou #2 e #5, não ou seja, o uso conjunto de temas LM, GM, NVAT ou NVAA e MCDEA é uma lacuna de pesquisa que será estudada neste trabalho.

1.3 QUESTÕES E OBJETIVOS DA PESQUISA

Com base no exposto pelas seções anteriores na contextualização, justificativa e contribuições científicas surgem as seguintes questões de pesquisa:

- O MCE que baseia-se somente em parâmetros de tempo é suficiente para medir a eficiência de processos produtivos?
- É possível aplicar um novo modelo MCDEA para medir a eficiência de processos reais de fabricação, e também, identificar quais parâmetros de entrada e saída são importantes para cada DMU analisada?
- É possível estabelecer um *ranking* dos períodos produtivos com este novo indicador?
- É possível estabelecer metas para tornar as DMUs avaliadas como ineficientes em eficientes?

O foco deste trabalho é apresentar uma abordagem inovadora para medir a eficiência do ciclo de manufatura em processos de fabricação por meio de um novo modelo MCDEA e compará-lo aos modelos MCDEA apresentados pela literatura em um problema real utilizando conceitos da *Green e Lean Manufacturing*. Sendo assim o objetivo geral da pesquisa fica definido por: Aplicar um novo modelo Multiobjetivo de Análise Envoltória de Dados para medir a eficiência do ciclo de manufatura baseado em conceitos da *Lean e Green Manufacturing*.

A seguir são apresentados os objetivos específicos que se atendidos, juntamente com as repostas às questões de pesquisa, fica caracterizada a consecução do objetivo geral. Como um primeiro objetivo específico busca-se identificar os parâmetros de entrada (insumos) e os parâmetros de saída (produtos) significativos para o cálculo da eficiência de cada DMU ao ser avaliada pelo modelo proposto. O segundo objetivo específico é propor um procedimento para calcular e estabelecer metas para reduzir os insumos e/ou aumentar os produtos, iniciativas necessárias para que uma DMU avaliada ineficiente possa tornar-se eficiente. Propor um modelo que possa estabelecer um *ranking* das DMUs do processo analisado utilizado como um critério de desempate é o terceiro objetivo específico e quarto e último objetivo específico vai analisar a existência de alguma correlação do novo indicador VAAMP com o MCE da empresa por meio de Teste de Correlação.

1.4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E MATERIAIS

Este trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada com objetivos empíricos normativos pelo fato de que os resultados do modelo de otimização, têm a finalidade de desenvolver políticas e estratégias que melhorem uma situação atual. A abordagem do problema é quantitativa pois busca explicar as relações entre causa e efeito pelo menos em parte (BERTRAND e FRANSOO, 2002). Por fim, o método de pesquisa é a Modelagem e Simulação com a estruturação de um problema real por meio de algoritmos de otimização com o emprego de recursos computacionais para obtenção dos resultados (BERTRAND e FRANSOO, 2002; MIGUEL, *et al.*, 2010; BRYMAN e BELL, 2007).

Os Materiais utilizados são: O Sistema Integrado de Gestão da Empresa ou *Enterprise Resource Planning* (ERP) para coletar dados² reais dos processos em estudo a partir de relatórios ou consulta direta ao banco de dados, registros disponíveis em planilha MS-Excel[®]

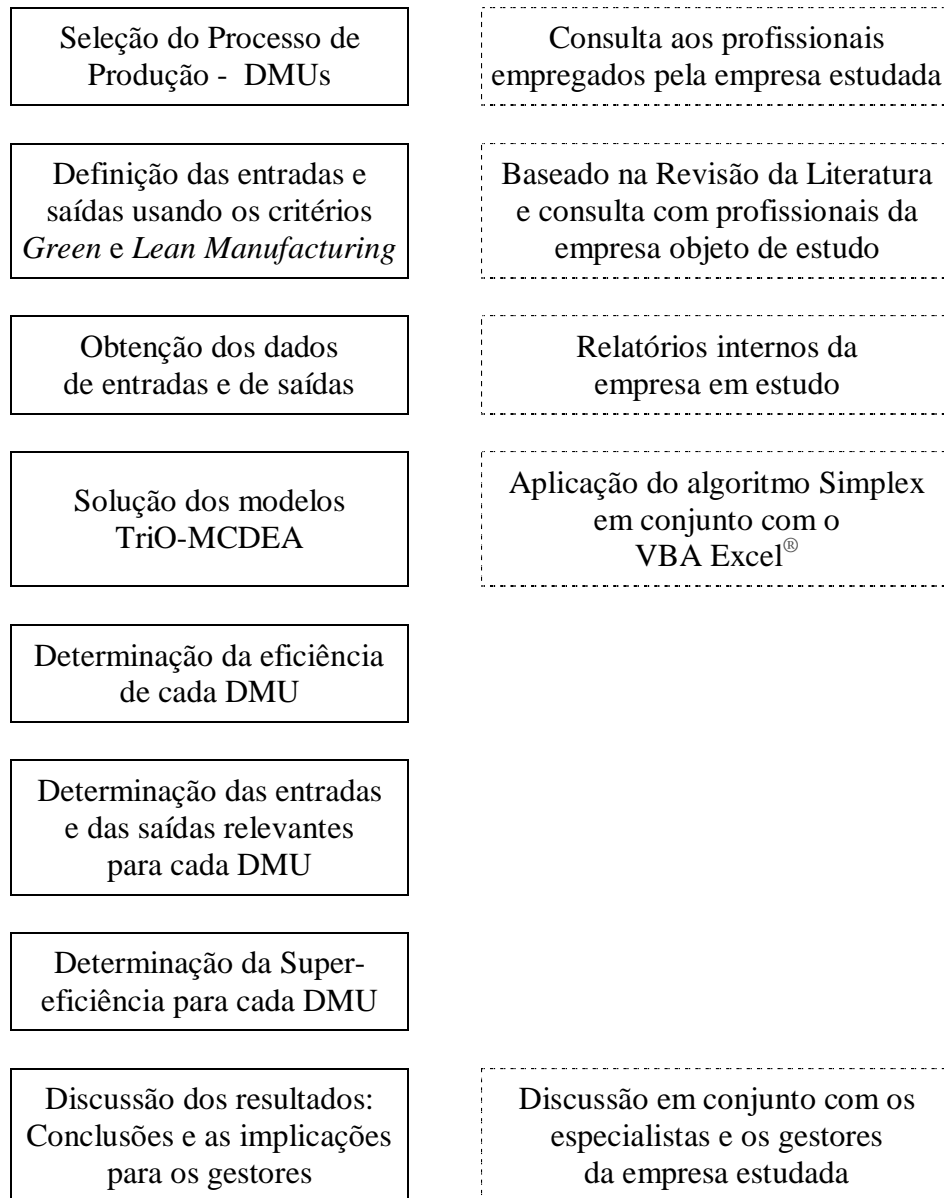
² Dados coletados avaliados em sua consistência pelo autor para garantir a integridade da aplicação nas etapas posteriores do trabalho.

contendo os indicadores monitorados pela área de produção e pelas áreas de apoio para o controle dos processos.

Os *softwares* utilizados neste trabalho para a aplicação dos métodos quantitativos na coleta, no armazenamento e no tratamento dos dados são planilhas MS-Excel[®], o Solver do MS-Excel[®] para calcular otimizadamente as variáveis peso do TriO-MCDEA modelado, sendo que a otimização é feita meio do algoritmo Simplex (HILLIER e LIEBERMAN, 2010), o *Visual Basic for Applications* - VBA incorporado ao MS-Excel[®] para executar as iterações do algoritmos simplex para obtenção da solução ótima relacionada a análise de eficiência para todas as DMUs, e o MS-Query[®] utilizado para acesso ao banco disponível para consulta e importação de dados do Sistema ERP da empresa.

A Figura 6 apresenta a abordagem metodológica proposta descrevendo um fluxo detalhado das etapas para a realização deste trabalho.

Figura 6 ó Abordagem metodológica proposta



Fonte: Produção de próprio autor

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A aplicação é feita em uma importante empresa multinacional brasileira do ramo metalúrgico do segmento de autopeças. Foi estudada uma linha de produção de componentes estruturais pesados, que utiliza no seu processo máquina de conformação *rollforming* e máquina puncionadeira de Comando Numérico Computadorizado (CNC) para fabricação de longarinas para uso em chassis de caminhões e de ônibus.

Para solução do problema utiliza-se de modelos de Análise Envoltória de Dados Multiobjetivo e programação VBA Excel[®] empregando algoritmo LP Simplex como método de solução interno ao Solver do MS-Excel[®].

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. Além deste Capítulo de Introdução, apresenta-se no Capítulo 2 o referencial teórico relacionado aos temas: *Lean Manufacturing*, *Green Manufacturing*, modelos clássicos DEA, modelos MCDEA sem Super-eficiência e modelos MCDEA com Super-Eficiência. O Capítulo 3 apresenta a descrição e modelagem do problema, o Capítulo 4 a aplicação do modelo e os resultados encontrados e por fim o Capítulo 5 que apresenta as conclusões, as verificações dos objetivos e sugestões para estudos futuros seguidas das referências bibliográficas e Apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O SISTEMA *LEAN MANUFACTURING* E O *GREEN MANUFACTURING*

O *Lean Manufacturing* tem origem em 1950 na *Toyota Motors Corporation* - TMC do Japão, que tem na Ford americana a referência global para a produção em larga escala, porém a partir de ideias e conceitos experimentais na busca do seu próprio modelo de produção, surge assim o que vem a tornar-se o Sistema de Produção Toyota - STP (WOMACK *et al.*, 2004). De acordo com estes os mesmos autores a base da estratégia adotada pela Toyota está em identificar, reduzir ou mesmo eliminar os desperdícios (*MUDA*) para assim reduzir custos e avançar em direção à produtividade e excelência.

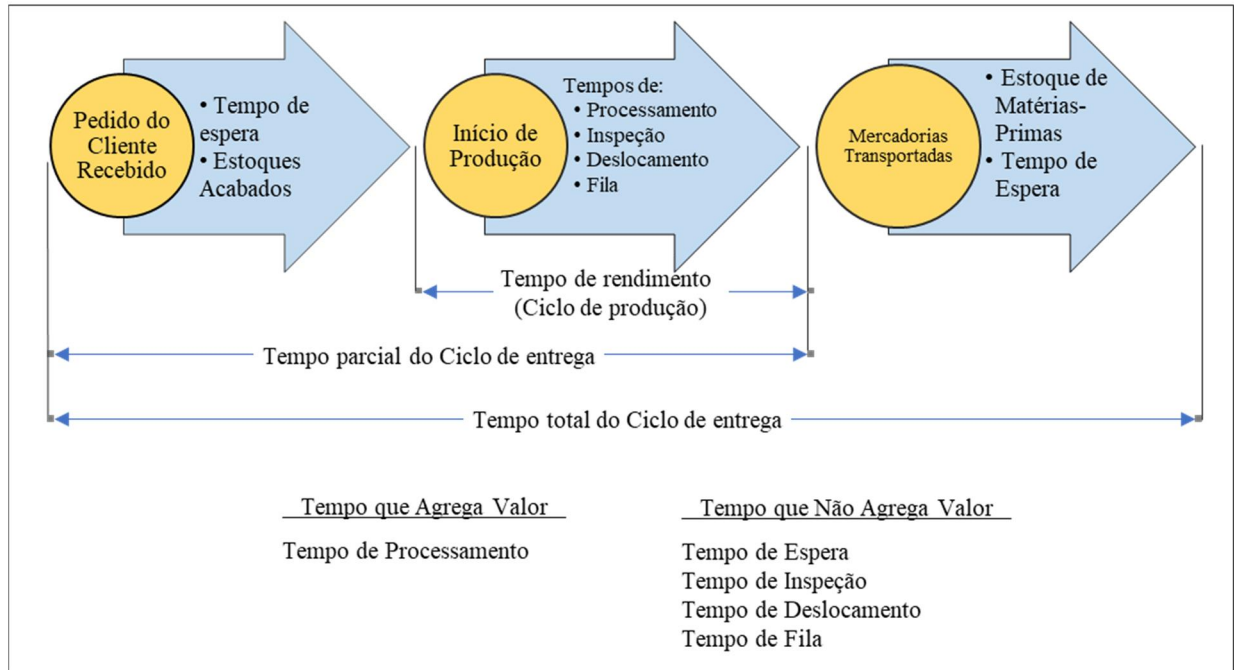
Sob o ponto de vista da redução ou eliminação de desperdícios, é criticamente importante identificar claramente as atividades que adicionam valor, as atividades que não adicionam valor mas que não podem ser evitadas e por fim as atividades que não adicionam valor e devem ser eliminadas (SHAHIN *et al.*, 2016).

Aplicações no contexto da redução ou eliminação de desperdícios têm-se estendido além das áreas fabris, como por exemplo: a projetos de desenvolvimento de novos produtos (CIARAPICA *et al.*, 2016), a área de serviços puros como bancos (BORTOLOTTI e ROMANO, 2012) e educação (JOHNES *et al.*, 2017), a área da saúde em gestão hospitalar (TEICHGRÄBER e DE BUCOURT, 2012), ou seja, a quase totalidade das empresas ou negócios nas áreas do serviço público ou privado ganhando novas denominações como *Lean Office* e *Lean Healthcare*.

Ainda no contexto da redução de desperdícios, um outro ponto crítico para o pensamento enxuto é a criação de valor para o cliente, algumas vezes visto apenas como redução de custos (HINES *et al.*, 2004), porém, a implementação desta abordagem que tem foco na eliminação das atividades que não agregam valor ao negócio devem então ser evitadas durante todo o processo produtivo desde o desenvolvimento do produto até a definição dos fornecedores (UGARTE *et al.*, 2016).

A Figura 7 exemplifica o Tempo total e parcial do Ciclo de Entrega, bem como o Tempo de rendimento do Ciclo de produção ou Eficiência do Ciclo de Manufatura ó MCE, pelo qual busca-se identificar os tempos que agregam valor ou *Value Added Time* (VAT) e os tempos que não agregam valor ou *Non Value Added Time* (NVAT) ao processo, sendo foco a redução ou mesmo eliminação dos NVAT.

Figura 7 ó Tempo total do Ciclo de entrega que Agrega Valor e Não Agrega Valor



Fonte: Adaptado de Plenert, (2012).

Observa-se que as empresas industriais utilizam de diferentes formas para avaliação da Eficiência do Ciclo de Manufatura - *Manufacturing Cycle Efficiency* (MCE), as Equações (1) e (2) são exemplos dessas opções:

$$MCE = \frac{\text{Tempo que agrega valor}}{\text{Tempo total do ciclo de entrega}} \quad (1)$$

ou

$$MCE = \frac{\text{Tempo de processamento}}{\text{Tempo de espera + Tempo de inspeção + Tempo de deslocamento + Tempo de fila + Tempo de processamento}} \quad (2)$$

A *Green Manufacturing* (GM), para Helleno *et al.* (2017), surge da integração do conceito de sustentabilidade ao *Lean Manufacturing* ou Manufatura Enxuta e ocorre pela inclusão de indicadores que consideram além das questões econômicas, aspectos ambientais como o consumo de recursos naturais, a eliminação de resíduos, a reutilização e a reciclagem; aspectos sociais tratam ainda das condições de trabalho, segurança e responsabilidade social.

Dao *et al.* (2011) abordam de modo semelhante avaliar de forma integrada o desempenho econômico com foco em rentabilidade, desempenho ambiental monitorando

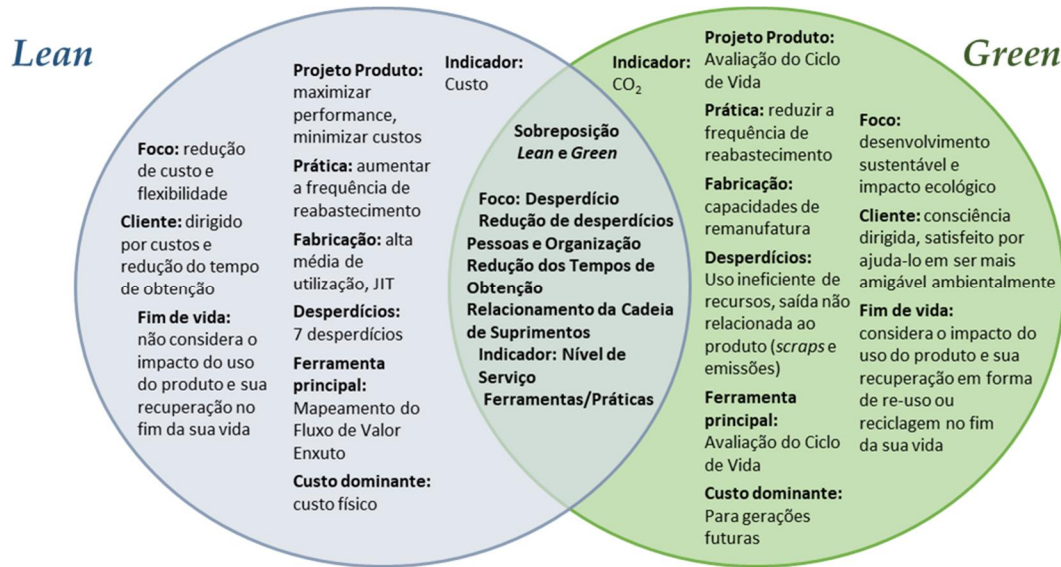
aspectos que possam impactar o planeta e o desempenho social cuidando das pessoas. Estes autores em sua pesquisa envolvendo Cadeia de Suprimentos, Recursos Humanos e Tecnologia da Informação argumentam ainda que a rentabilidade no longo prazo é melhor avaliada quando está em equilíbrio com as metas ambientais e as metas sociais.

A LM é consistente com os objetivos tanto da responsabilidade social quanto da ambiental, bem como do desenvolvimento sustentável (ALHURAISH *et al.*, 2017). De fato, Aguado, *et al.* (2013) argumentam que um sistema de manufatura baseado em conceitos da LM promove condições favoráveis para implementação de conceitos GM e para o desenvolvimento sustentável dos aspectos sociais e ambientais. Estes aspectos têm sido bastante discutidos na literatura recente, no entanto, modelos ou indicadores que efetivamente contribuam com a melhoria destes pontos são ainda incipientes (HELLENO *et al.*, 2017).

Para Thanki *et al.*, (2016) a *Lean Manufacturing* tem o objetivo de reduzir desperdícios (*MUDA*) por meio da eliminação de atividades que não agregam valor, enquanto a *Green Manufacturing* tem como objetivo a redução do desperdício ambiental por meio do uso eficiente de recursos disponíveis.

O fato da *Lean* e *Green Manufacturing* estarem relacionadas é evidente na literatura onde vários autores concordam que a GM é uma extensão natural da implementação da LM e embora visíveis os diferentes paradigmas, similaridades também são percebidas nos seguintes atributos comuns: o desperdício e as técnicas para sua redução, a relação das pessoas com a organização, a redução dos tempos de obtenção, o relacionamento em toda a cadeia de suprimentos, os indicadores chave de performance (KPIs) para medir o nível de serviço e por fim as ferramentas e práticas que estão representados na Figura 8 pela intersecção da *Lean* e *Green Manufacturing* (DÜES *et al.*, 2013 e NG *et al.*, 2015). Estes autores ainda concordam que as empresas que adotam estes conceitos sinergicamente atingem melhores resultados do que as organizações que aplicam somente o LM.

Figura 8 ó Intersecção entre *Lean* e *Green Manufacturing*.



Fonte: Adaptado de Dües *et al.* (2013) e Ng *et al.*(2015)

Observa-se que, inevitavelmente, a redução de desperdício pela *Lean Manufacturing* promove indiretamente melhorias na *Green Manufacturing* (JOHANSSON e SUNDIN, 2014; PEDERSEN e SLEPNIOV, 2016) sendo o termo *Green Manufacturing* ou Produção Verde criado para refletir o novo paradigma da produção que implementa várias estratégias verdes (objetivos e princípios) e técnicas (tecnologia e inovações) (SALEM e DEIF, 2017).

A seguir apresenta-se o resultado de uma pesquisa na base *Web of Science* combinando as Palavras-Chave: *Lean Manufacturing* e *Quantitative* ou *Green Manufacturing* e *Quantitative* com o objetivo de identificar na literatura métodos quantitativos utilizados para avaliar a eficiência de processos de manufatura que abordam os conceitos de *Green* e *Lean Manufacturing*. Os títulos, objetivos, autores, métodos quantitativo e periódico estão disponíveis no apêndice A.

Os autores Kumar *et al.* (2017) propõem avaliar o desempenho de fornecedores baseado em práticas da manufatura sustentável usando a lógica dos Conjuntos *Fuzzy* e o método multicritério ELECTRE III no âmbito empresarial. Krolczyk *et al.* (2016) aplicam conceitos da GM e LM em processos de torneamento a seco analisando como os métodos influenciam na morfologia dos aços usinados. E ainda, outra prática proposta por Soubihia *et al.* (2015) que visa comparar a gestão ambiental pró-ativa e sua relação com o desempenho verde para um grupo de empresas certificadas com ISO 9001.

Em Boyd *et al.* (2006) os autores examinam o efeito da implementação da *Lean Manufacturing* no desempenho financeiro de 18 diferentes empresas usando o modelo DEA-

CCR de Charnes *et al.* (1978). Wan e Chen (2008) propõem em uma outra aplicação um indicador para medir quão enxuto (*leanness*) é um sistema de manufatura pela classificação obtida por meio de um modelo DEA baseado em folgas (*Slack-Based - DEA*) (COOPER, 2005). Amindoust *et al.* (2013) aplicam modelos DEA para seleção de fornecedores considerando conceitos e questões ambientais.

Anvari *et al.* (2014) combinam o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) de Saaty (1977) e modelos DEA com fatores desejáveis e indesejáveis para avaliar as ferramentas e técnicas enxutas e classificá-los considerando aspectos de eficácia.

Abdollahi; *et al.* (2015) utilizam um modelo DEA-CCR para selecionar uma carteira de fornecedores apropriada com base em critérios que consideram conceitos de manufatura ágil e enxuta, com o objetivo de satisfazer as necessidades do cliente e aumentar o lucro da cadeia.

Uma nova abordagem aplicando o modelo DEA-BCC de Banker *et al.* (1984) foi proposta por Shahin *et al.* (2016) para determinar um ponto de desacoplamento *leagile* na cadeia de suprimento baseada em critérios Ágil e *Lean* relacionados às demandas do mercado e dos clientes, bem como às demandas das capacidades internas da cadeia.

Saleeshya e Vyass (2017) pesquisam sobre a capacidade de um modelo multinível para calcular um índice de *leanness* de um sistema e apresentam estudos aplicados em várias indústrias de manufatura adotando modelos DEA-CCR.

Salem e Deif (2017) propõem um conjunto de ferramentas (*Greenometer*) para avaliar o nível de esverdeamento (*Greenness*) de empresas de manufatura utilizando uma abordagem de avaliação baseada na captura da posição relativa do *Greenness* de uma dada empresa comparada com outras de diferentes setores, bem como dentro do mesmo setor por meio de um modelo DEA-CCR.

Pode-se concluir que por meio da pesquisa bibliográfica realizada na base de dados *Web of Science* que não é identificado um trabalho abordando o mesmo tipo de problema proposto neste estudo e também não é encontrada uma pesquisa aplicando modelos MCDEA em problemas que utilizam conceito da *Lean* e *Green Manufacturing*. Este achado é uma lacuna de pesquisa e caracteriza este trabalho como inovador que é a motivação para realização dos estudos presente nesta dissertação.

Na próxima seção são apresentados os modelos DEA e MCDEA encontrados na literatura e são propostas as expressões dos novos modelos TriO-MCDEA com e sem o conceito de Super-eficiência utilizados no cálculo do novo indicador de desempenho

VAAMP, bem como na obtenção de um ranking dos processos de uma empresa multinacional brasileira do ramo metalúrgico no segmento de autopeças.

2.2 A ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)

Em uma proposta original Charnes *et al.* (1978) apresentam um modelo que calcula de modo otimizado a eficiência relativa h_0 de qualquer DMU_0 de um conjunto de j DMUs e é dada pela máxima razão da soma ponderada dos produtos (saídas) pela soma ponderada dos insumos (entradas), sujeitos à condição desta mesma razão para as demais j DMUs sejam menores ou iguais a unidade. A solução do modelo vai atribuir às variáveis peso u_r e v_i os valores mais vantajosos para a DMU_0 que as restrições permitirem. A eficiência h_0 é obtida pela solução do modelo:

Função objetivo:

$$\max h_0 = \frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{i0}} \quad (3)$$

Sujeito às restrições:

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, j \quad (4)$$

$$u_r \geq 0; \quad r = 1, \dots, R \quad (5)$$

$$v_i \geq 0; \quad i = 1, \dots, I \quad (6)$$

A Equação (3) representa a função objetivo do modelo a ser otimizada:

$$\max h_0 = \frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{i0}}$$

Sendo h_0 a eficiência dada pela razão das saídas ponderadas pelas entradas ponderadas; r o índice das s saídas, $r \in \{1, \dots, s\}$; i o índice das m entradas, $i \in \{1, \dots, m\}$; u_r é a variável peso atribuída pelo modelo para a saída r ; y_{r0} o valor conhecido da r -ésima saída para a DMU₀ (em análise); v_i é a variável peso atribuída pelo modelo à entrada i e x_{i0} é o valor conhecido da i -ésima entrada para a DMU₀ (em análise).

Sujeito à restrição representada pela Inequação (4):

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

Sendo j o índice das n DMUs, $j \in \{1, \dots, n\}$; y_{rj} o valor conhecido da r -ésima saída para a j -ésima DMU; x_{ij} o valor conhecido da i -ésima entrada para j -ésima DMU. A razão das saídas ponderadas pelas entradas ponderadas é a eficiência calculada da j -ésima DMU deve ser menor ou igual a 1 (100%).

Sujeito às restrições de não negatividade das variáveis (5) e (6):

$$u_r \geq 0; \quad r = 1, \dots, s$$

$$v_i \geq 0; \quad i = 1, \dots, m$$

Sendo j o índice das n DMUs, $j \in \{1, \dots, n\}$; r o índice das s saídas, $r \in \{1, \dots, s\}$; i o índice das m entradas, $i \in \{1, \dots, m\}$; y_{rj} o valor conhecido da r -ésima saída para a j -ésima DMU; x_{ij} é o valor conhecido da i -ésima entrada para a j -ésima DMU; u_r é a variável peso atribuída pelo modelo para a saída r ; v_i é a variável peso atribuída pelo modelo à entrada i e h_0 a eficiência relativa da DMU₀ (a DMU em análise).

A medida de eficiência h_0 de qualquer DMU é obtida pela máxima razão entre as saídas ponderadas e as entradas ponderadas da que está sob análise (DMU₀), presente na função objetivo do modelo (3) sujeito às condições de que razões semelhantes para cada DMU _{j} sejam menores ou iguais à unidade que é a restrição (4) e da não negatividade das variáveis peso u_r (5) e v_i (6).

De acordo com este modelo, $h_0 = 1$ (ou 100%) significa que a DMU₀ é eficiente e se $h_0 < 1$ significa que a DMU₀ (em avaliação) é ineficiente em relação às demais unidades (CHARNES *et al.*, 1978).

A DEA é um método quantitativo amplamente utilizado na avaliação de eficiência de empresas, tanto nos setores públicos como privados (SUEYOSHI e GOTO, 2012). Friesner *et al.* (2013) comentam que a DEA é uma das ferramentas mais populares para se medir eficiência em indústrias. Estes autores citam algumas vantagens em se utilizar a DEA na avaliação de eficiência, tais como:

- a) A DEA permite aos pesquisadores selecionar dados de *input* e *output*, relevantes para as DMUs sem regras muito rígidas;
- b) A DEA é um método não paramétrico, permite relacionar *inputs* e *outputs* com diferentes escalas e unidades de medidas;
- c) Ao contrário de outros métodos para avaliação de eficiência, a aplicação da DEA é relativamente simples para se estimar a eficiência de DMUs que produzem múltiplos *outputs* a partir de múltiplos *inputs*.

Azadeh *et al.* (2013) citam ainda outras características importantes da modelagem DEA, como:

- a) O método identifica a melhor prática para as unidades, de forma que nenhuma outra combinação linear das mesmas será maior que todos os *outputs* ou menor que todos os *inputs*;
- b) A ideia fundamental do DEA é que todos os dados sejam representados em forma de valores;
- c) DEA assume valores menores que um para DMUs ineficientes e igual a um para DMUs eficientes;
- d) É disponibilizado um *ranking* para DMUs ineficientes porém o mesmo não acontece para as DMUs eficientes;

Uma utilização da DEA abrangendo estas vantagens citadas está em Sueyoshi e Goto (2012), sendo que um problema para ranquear a eficiência em firmas de energia foi modelado obtendo resultados satisfatórios condizentes com a realidade

A DEA é um método de abordagem não-paramétrica de Programação Linear que se adequa ao propósito de calcular a eficiência relativa de DMUs, usando múltiplas entradas e saídas ponderadas (SAN CRISTÓBAL, 2011; HONMA e HU, 2014). Estendendo-se para o contexto da eco-eficiência, torna-se um indicador útil para avaliar a capacidade das empresas de produzir bens e serviços com menor consumo de recursos naturais e menor impacto no meio ambiente (GODOY-DURÁN *et al.*, 2017).

Os modelos clássicos da DEA podem eventualmente apresentar dificuldades na discriminação de DMUs, ou seja, identificar muitas DMUs como eficientes e resultar em uma dispersão irrealista dos pesos (GHASEMI *et al.*, 2014, RUBEM *et al.*, 2017).

Essa dificuldade ocorre pelo número insuficiente de DMUs quando a Regra de Ouro da DEA de Banker *et al.* (1989) não é atendida, sendo definida como: o número de DMUs deve ser maior ou igual a três vezes a soma do número de parâmetros de entrada e saída (m inputs + s outputs) multiplicado por três ou o produto do mesmo (m inputs x s outputs) devendo-se adotar o resultado que indicar a maior quantidade de DMUs (SILVA *et al.*, 2017).

Essa regra determina o número mínimo de DMUs para aplicar-se os modelos tradicionais de DEA, o DEA-CCR (CRS) de Charnes *et al.* (1978) e o DEA-BCC (VRS) de Banker *et al.* (1984). Hatami-Marbini e Toloo (2017) comentam que há pesquisadores que adaptaram modelos DEA para lidar com esses dois problemas inter-relacionados: fraco poder de discriminação e distribuição de peso irreal. Na próxima seção são apresentados os modelos clássicos da DEA.

2.2.1 Os modelos clássicos dos multiplicadores DEA CCR (CRS) e BCC (VRS) orientados ao *input*

O modelo original apresentado na seção anterior é um Problema de Programação Fracionária Não Linear de difícil implementação computacional. Uma formulação equivalente transforma-o em um modelo de Problema de Programação Linear conhecido como o modelo DEA-CCR na forma dos Multiplicadores, pois retorna com os coeficientes das entradas e das saídas na sua resolução. Este modelo assume retornos constantes de escala ou *Constant Return to Scale* (CRS) e orientado ao *input*. O modelo é representado pela função objetivo (7), sujeito às restrições (8) - (11):

Função objetivo:

$$\max h_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad (7)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} - \theta \sum_{f=1}^F \mu_f x_{rf} \leq 0, \quad r = 1, 2, \dots, R \tag{9}$$

$$\theta \geq 0, \quad \theta = 1, 2, \dots, R \tag{10}$$

$$\mu_f \geq 0, \quad f = 1, 2, \dots, F \tag{11}$$

Sendo a Equação (7) uma função objetivo equivalente à Equação (3) do modelo apresentado anteriormente assumindo a restrição (8) ou a soma ponderada das entradas ser igual a uma constante 1, o modelo, antes um problema de programação fracionário, é transformado em um problema de programação linear equivalente e de fácil tratamento computacional. Tem-se assim o modelo DEA-CCR CRS que assume retornos constantes de escala.

Banker *et al.* (1984) ampliam o trabalho anterior de Charnes *et al.* (1978) que assume retornos constantes de escala em seu modelo DEA-CCR CRS, por meio de uma variável adicional C_0 (fator de escala) fornecendo um modelo que assume retornos variáveis de escala ou *Variable Return to Scale* (VRS) para exibir uma fronteira de eficiências, surgindo desta forma o modelo DEA-BCC VRS que é apresentado pela Expressões (12) - (17):

Função Objetivo:

$$\max h_{\theta} = \theta \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} + \theta_0 \tag{12}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} = 1 \tag{13}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} - \theta \sum_{f=1}^F \mu_f x_{rf} + \theta_0 \leq 0, \quad r = 1, 2, \dots, R \tag{24}$$

$$\theta \geq 0, \quad \theta = 1, 2, \dots, R \tag{15}$$

$$\mu_f \geq 0, \quad f = 1, 2, \dots, F \tag{36}$$

$$\theta_0, \quad \theta_0 \tag{17}$$

Sendo a variável θ_j adicionada na função objetivo (12), bem como na restrição (14), sendo excluída a restrição de não negatividade (17), demais restrições (13) e de não negatividade (15) e (16) são análogas ao modelo DEA-CCR CRS.

2.2.2 Os modelos de Análise Envoltória de Dados Multi-critério

Li e Reeves (1999) utilizam uma abordagem DEA Multiobjetivo denominada de *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis* (MCDEA) ou Análise Envoltória de Dados Múltiplos Critérios para contornar o problema de fraco poder de discriminação e distribuição irreal de pesos atribuídos pelos modelos clássicos da DEA, e ocorrem quando o número de DMUs não atende a regra de ouro da DEA (BANKER *et al.*, 1989), conforme a Expressão (18):

$$\theta \geq 3 * \theta_j + \theta_j \theta_j \theta \geq \theta * \theta \tag{18}$$

Sendo n a quantidade de DMUs, m a quantidade de *inputs* e s a quantidade de *outputs* do problema.

O modelo original MCDEA proposto por Li e Reeves (1999) e apresentado a seguir contém três funções objetivo (19) - (21) otimizadas separadamente, sujeitas às restrições dadas pelas Expressões (22) - (27):

Funções objetivo

$$\min \theta_j \theta_j \max \theta \theta_j \theta_j \tag{19}$$

$$\min \theta \tag{20}$$

$$\min \theta \theta_j \tag{21}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{f=1}^F \alpha_f \beta_{f0} = 1 \quad (22)$$

$$\sum_{r=1}^R \alpha_r \beta_{r0} - \sum_{f=1}^F \alpha_f \beta_{f0} + \beta_0 = 0, \quad f = 1, 2, \dots, F \quad (23)$$

$$\beta_0 - \beta_f \geq 0, \quad f = 1, 2, \dots, F \quad (24)$$

$$\beta_{r0} \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (25)$$

$$\alpha_f \geq 0, \quad f = 1, 2, \dots, F \quad (26)$$

$$\beta_f \geq 0, \quad f = 1, 2, \dots, F \quad (27)$$

Sendo d_0 a variável que representa a ineficiência da DMU₀ que está sob análise e $M = \text{Max} \{d_j\}$ é a variável que está associada ao máximo valor de ineficiência atribuído pelo modelo e que deve ser minimizada, e d_j é j -ésima ineficiência. Os outros parâmetros e variáveis são análogos ao modelo apresentado em (3) - (6).

Vários modelos são derivados do MCDEA de Li e Reeves (1999) como, por exemplo o modelo *Minsum*-CCR que tem por característica considerar apenas uma função objetivo ($\sum_{r=1}^R \beta_{r0}$) e o modelo o *Minmax* que considera apenas a variável M na função objetivo (CHEN *et al.*, 2009).

Bal, Örkücü e Çelebioglu (2010) propõem uma abordagem GPDEA, que visa aumentar a discriminação entre as DMUs reduzindo também a dispersão entre os pesos.

Ghasemi *et al.* (2014) identificam incoerências matemáticas no modelo de Bal *et al.* (2010) e propõem o modelo BiO-MCDEA que utiliza apenas o segundo e terceiro termos na função objetivo ($\sum_{r=1}^R \beta_{r0}$) e (M) do modelo de Li e Reeves (1999) e altera as restrições de não negatividade para os pesos, de maior ou igual a zero para maior ou igual a *epsilon* ε para o qual é designado um valor próximo a zero a ser definido a priori limitando as variáveis de decisão v_r e u_i para que assumam valores maiores que zero.

Hatami-Marbini e Toloo (2017) propõem modificações no modelo BiO-MCDEA de Ghasemi *et al.* (2014), demonstrando como estimar um valor ótimo para o parâmetro ε antes do cálculo das eficiências.

Rubem *et al.* (2017) combinam técnicas de DEA com Programação Por Metas (*Goal Programming*) a partir do modelo inicial de Li e Reeves (1999), analisando problemas no

modelo proposto por Ghasemi *et al.* (2014) e apresentando ainda um modelo para lidar com os problemas da utilização da Programação por Metas GPDEA de Bal *et al.* (2010) corrigindo as inconsistências relatadas.

Silva *et al.* (2017) aplicam o modelo BiO-MCDEA de Ghasemi *et al.* (2014) em um problema real na avaliação de eficiência de máquinas na indústria.

A seguir são apresentados de forma detalhada estes modelos MCDEA de Ghasemi *et al.* (2014), Hatami-Marbini e Toloo (2017) e Rubem *et al.* (2017) citados, a serem utilizados como referência de comparação com o novo modelo TriO-MCDEA proposto neste trabalho.

2.2.3 O modelo ponderado Bi-Objetivo (BiO-MCDEA)

O modelo BiO-MCDEA proposto por Ghasemi *et al.* (2014) que está apresentado a seguir pelas Expressões (28) - (34) tem como característica a inclusão de um novo termo na função objetivo do modelo *Minsum*, considerando o máximo desvio (*M*), os pesos (*w*₂ e *w*₃) na função objetivo e a parametrização (*ε*) para variáveis *u_r* na restrição (32) e *v_i* na restrição (33) que permitem, em alguns casos, aumentar a discriminação entre as DMUs:

Função objetivo:

$$h = \sum_{r=1}^R w_r u_r + \sum_{i=1}^I w_i v_i \tag{28}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1 \tag{29}$$

$$\sum_{r=1}^R w_r u_r - \sum_{i=1}^I w_i v_i + M = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I \tag{30}$$

$$u_r - v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, I \tag{31}$$

$$u_r \geq \epsilon, \quad r = 1, 2, \dots, R \tag{32}$$

$$v_i \geq \epsilon, \quad i = 1, 2, \dots, I \tag{33}$$

$$z_{\bar{f}} \geq 0, \quad \bar{f} = 1, 2, \dots, \bar{f} \tag{34}$$

2.2.4 Modelo ponderado Bi-Objetivo estendido

Hatami-Marbini e Toloo (2017) propõem o modelo apresentado pelas Expressões (40) - (46) como uma extensão ao modelo de Ghasemi *et al.* (2014), denominado pelos autores modelo *epsilon-based weighted* MCDEA pela proposição de um valor para *epsilon* calculado de modo otimizado antes da aplicação do modelo apresentado pelas Expressões (35) - (39) (AMIN e TOLOO, 2009; HATAMI-MARBINI e TOLOO, 2017) a seguir:

Modelo para cálculo otimizado de $\bar{\epsilon}$ ($\bar{\epsilon}^*$):

$$\bar{\epsilon}^* = \max \bar{\epsilon} \tag{35}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{\bar{f}} w_{\bar{f}} z_{\bar{f}} \leq 1, \quad \bar{f} = 1, 2, \dots, \bar{f} \tag{36}$$

$$w_{\bar{f}} z_{\bar{f}} - w_{\bar{f}'} z_{\bar{f}'} \leq 0, \quad \bar{f} = 1, 2, \dots, \bar{f} \tag{37}$$

$$\epsilon - z_{\bar{f}} \leq 0, \quad \bar{f} = 1, 2, \dots, \bar{f} \tag{38}$$

$$\epsilon - z_{\bar{f}} \leq 0, \quad \bar{f} = 1, 2, \dots, \bar{f} \tag{39}$$

Modelo Ponderado BiOMCDEA Estendido:

Função objetivo:

$$z_{\bar{f}} = \min w_{\bar{f}} z_{\bar{f}} + w_{\bar{f}'} z_{\bar{f}'} + w_{\bar{f}''} z_{\bar{f}''} \tag{35}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{\bar{f}} w_{\bar{f}} z_{\bar{f}} = 1 \tag{36}$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \mu_i - \sum_{i=1}^m \beta_i \mu_i + \alpha_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (37)$$

$$\alpha_i - \beta_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (38)$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (39)$$

$$\alpha_0 \geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (40)$$

$$\beta_i \geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (41)$$

2.2.5 Modelo de Programação por Metas combinado com Análise Envoltória de Dados Multi-critério

Com o objetivo de resolver o MCDEA por um modelo *Weighted Goal Programming* WGP, proposto inicialmente por Bal *et al.* (2010), que tiveram equívocos comprovados por Gahsemi *et al.* (2014), Rubem *et al.* (2017) apresentaram um modelo WGP-MCDEA-CCR corrigindo cinco inconsistências do modelo original de Bal *et al.* (2010), conforme as Expressões (47) - (56):

Função objetivo:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \alpha_i \mu_i + \sum_{i=1}^m \beta_i \mu_i + \alpha_0 \mu_0 \quad (47)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \mu_i = 1 \quad (48)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \mu_i - \sum_{i=1}^m \beta_i \mu_i + \alpha_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (49)$$

$$\alpha_i - \beta_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (50)$$

$$\alpha_0 + \alpha_0 - \alpha_0 \leq \alpha_0 \quad (51)$$

$$w_{1j} + w_{2j}^+ - w_{2j}^- \leq m_{1j}, \quad j = 1, 2, \dots, J \tag{52}$$

$$w_{1j} + w_{2j}^+ - w_{2j}^- \leq m_{1j}, \quad j = 1, 2, \dots, J \tag{53}$$

$$w_{1j} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \tag{54}$$

$$w_{2j} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \tag{55}$$

$$w_{1j}, w_{2j}^+, w_{2j}^-, w_{1j}^+, w_{1j}^-, w_{2j}^+, w_{2j}^- \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \tag{56}$$

Sejam w_{1j} , w_{2j}^+ e w_{2j}^- os pesos associados a cada termo da função objetivo e m_{1j} , m_{2j}^+ e m_{2j}^- as metas associadas a cada objetivo analisado e, por fim, w_{1j}^+ , w_{1j}^- , w_{2j}^+ , w_{2j}^- e w_{2j}^+ as variáveis auxiliares de desvio associadas a realização de cada meta. Esses autores não testaram esse modelo, deixando como futuras pesquisas aplicar o mesmo em problemas reais.

2.2.6 Modelo Tri-Objetivo de Análise Envoltória de Dados Multi-critério

Como alternativa aos modelos DEA *Multiple Criteria* utilizados por Hatami-Marbini e Toloo (2017), Rubem *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2017), um modelo inovador denominado TriO-MCDEA-CRS foi proposto.

Com base no modelo original de Li e Reeves (1999) com três objetivos, medindo a ineficiência da DMU em análise (DMU_0) com base em metas e variáveis de desvio, conceitos oriundos da Programação por Metas (*Goal Programming*):

Função objetivo:

$$\min \theta + w_{1j}^+ + w_{1j}^- + w_{2j}^+ + w_{2j}^- \tag{57}$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^J w_{1j} = 1 \tag{58}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} - \theta x_{r0} \leq 0 \quad (59)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} - \sum_{f=1}^m \mu_f y_{rf} - \theta x_{r0} + \eta_r = 0, \quad r = 1, 2, \dots, m \quad (60)$$

$$\theta \geq \theta_r^*, \quad r = 1, 2, \dots, m \quad (61)$$

$$\theta_r^* \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, m \quad (62)$$

$$\mu_f \geq 0, \quad f = 1, 2, \dots, m \quad (63)$$

$$\lambda_j^*, \mu_f^* \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (64)$$

$$0 \leq \theta \leq 1 \quad (65)$$

Sendo M a máxima quantidade entre todas as variáveis de desvio θ_r^* , θ é a medida da eficiência da DMU sob análise, θ_r^* significa o quanto que se pode aumentar as entradas (ou reduzir as saídas) de uma DMU_j eficiente, sem torná-la ineficiente, em outras palavras, quando o valor de θ_r^* é não nulo tem-se uma DMU eficiente, mas que utiliza recursos em excesso, ou seja, não seria DMU Pareto eficiente. A variável θ_r^* é o valor da ineficiência para j -ésima DMU.

Cabe destacar que a inclusão da restrição (59) combinada com a restrição (60) possibilitará um aumento na discriminação entre as DMU, visto que, estas restrições penalizam as DMUs que seriam fracamente eficientes (COOK e SEIFORD, 2009), ou seja, realizando uma análise de eficiência mais coerente e confiável. O Apêndice A contempla uma explicação detalhada do modelamento do TriO-MCDEA.

A Super-eficiência é um método apresentado por Andersen e Petersen (1993) com o objetivo de obter maior discriminação para as DMUs avaliadas eficientes (igual a 100%) atua como um critério de desempate.

A proposta é comparar a DMU em análise (DMU_0) com uma combinação linear das demais DMUs, excluindo a DMU que está sendo avaliada representado no modelo pelo índice $\theta \neq 0$.

De acordo com Meza e Lins (2002) somente a eficiência das DMUs extremamente eficientes são impactadas, podendo estas DMUs obter uma eficiência maior que 100% oferecendo assim um *ranking* de DMUs eficientes semelhante ao de DMUs ineficientes.

Proposições para os modelos DEA com Super-eficiência são encontrados em Andersen e Petersen (1993); Lee *et al.* (2011); Chen *et al.* (2012); Hatami-Marbini e Toloo (2017).

Neste trabalho a Super-eficiência também é explorada para o modelo TriO-MCDEA com com a proposição a seguir:

Função objetivo:

$$\max \sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{r=1}^R \mu_r^+ x_{rj} - \sum_{s=1}^S \mu_s^- x_{sj} \right) + \theta + \sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{r=1}^R \mu_r^+ x_{rj} - \sum_{s=1}^S \mu_s^- x_{sj} \right) \quad (66)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (67)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{r=1}^R \mu_r^+ x_{rj} - \sum_{s=1}^S \mu_s^- x_{sj} \right) - \theta \leq 0 \quad (68)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{r=1}^R \mu_r^+ x_{rj} - \sum_{s=1}^S \mu_s^- x_{sj} \right) + \sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{r=1}^R \mu_r^+ x_{rj} - \sum_{s=1}^S \mu_s^- x_{sj} \right) = 0, \quad \ell = 1, 2, \dots, \ell: \ell \neq 0 \quad (69)$$

$$\theta \geq \theta^*, \quad \ell = 1, 2, \dots, \ell: \ell \neq 0 \quad (70)$$

$$\mu_r^+ \geq 0, \quad \ell = 1, 2, \dots, \ell \quad (71)$$

$$\mu_s^- \geq 0, \quad \ell = 1, 2, \dots, \ell \quad (72)$$

$$\mu_r^+, \mu_s^- \geq 0, \quad \ell = 1, 2, \dots, \ell: \ell \neq 0 \quad (73)$$

$$\theta \geq 0 \quad (74)$$

A próxima seção descreve o procedimento para calcular um novo indicador de eficiência para um processo real de produção, incorporando aspectos do *Green* e *Lean Manufacturing*.

3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste capítulo é apresentado o problema em um processo real na indústria, para avaliar e melhorar a eficiência do ciclo de manufatura pela eliminação ou redução de desperdícios, levando em conta aspectos de *Green* e *Lean Manufacturing*. A seguir o problema é modelado de acordo com a abordagem metodológica proposta.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O ambiente de manufatura de um modo geral é bastante complexo e necessita portanto de um sistema robusto que integre os Sistemas de Gestão da Qualidade - SGQ, Gestão Ambiental - SGA, Segurança e Saúde Ocupacional ó SGSSO e Segurança da Informação ó SSI e que utilize métricas próprias para avaliar e monitorar o seu desempenho.

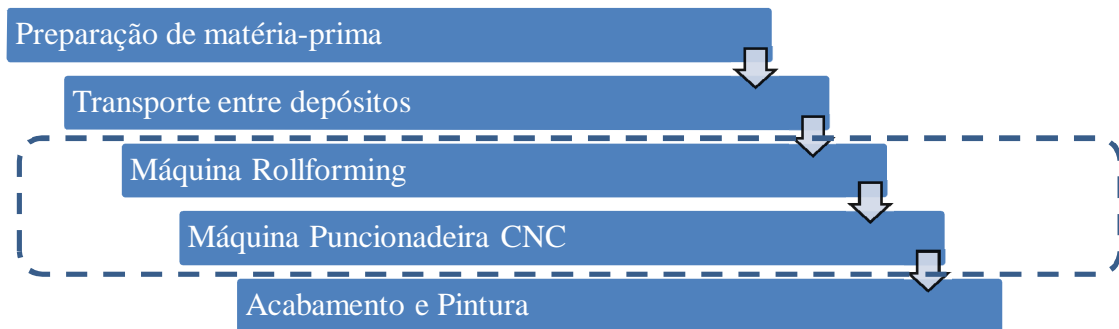
As áreas de manufatura e seus apoios necessitam priorizar esforços na busca da melhor relação entre os produtos (saídas) e os recursos aplicados (entradas), ou seja, a eficiência dos seus processos.

Os indicadores são vários e medem os aspectos relevantes para cada sistema de forma isolada. Um indicador que integre aspectos importantes para os vários sistemas permite ao decisor aplicar esforços com menos julgamentos pessoais.

Neste contexto, uma aplicação foi realizada em uma empresa multinacional brasileira do ramo metalúrgico no segmento de autopeças, sediada no Vale do Paraíba, no setor de fabricação de componentes estruturais pesados denominado *õrollformingö*. Neste setor são produzidos longarinas e reforços retos utilizados pela principais empresas montadoras de caminhões e ônibus que operam no Brasil.

Estes produtos são fabricados a partir de bobinas ou chapas de aço estruturais com resistências mínimas de 260 MPa a 600 MPa, espessuras que variam de 4 a 10 milímetros e peças com comprimentos de 4 a 12 metros com pesos entre 40 e 270 quilos. O macrofluxo do roteiro de fabricação está representado na Figura 9, sendo os processos principais do setor de fabricação estão destacados (hachurados).

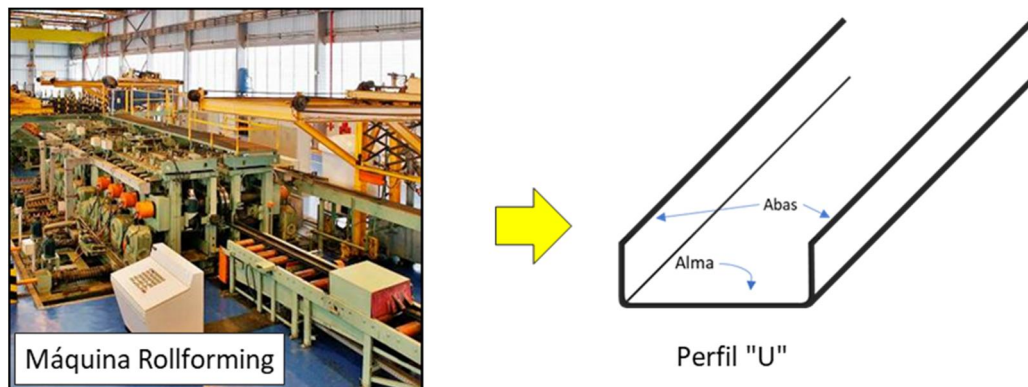
Figura 9 ó Macro Fluxo do processo.



Fonte: Produção do próprio autor

A máquina *rollforming* executa a conformação contínua de uma chapa de aço plano por meio de um banco de rolos num processo de laminação obtendo perfis U retos conforme mostrado na Figura 10.

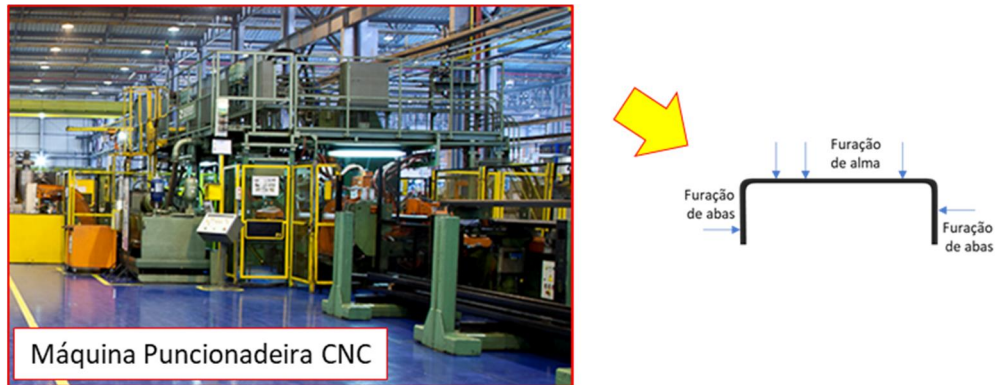
Figura 10 ó Máquina rollforming e perfil U gerado



Fonte: Produção do próprio autor

Na sequência os perfis U retos são perfurados na máquina puncionadeira CNC que executa as furações tanto na alma quanto nas abas das longarinas de acordo com os requerimentos dos clientes representados esquematicamente na Figura 11.

Figura 11 ó Máquina Puncionadeira CNC e Perfil U perfurado



Fonte: Produção do próprio autor

3.1.1 Identificação do problema

Os principais indicadores para um setor produtivo são o MCE - *Manufacturing Cycle Efficiency* na fase do projeto do produto e processo (concepção) e o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) na fase validação e controle (produção).

Para o cálculo dos indicadores do processo-chave o setor da empresa em estudo utiliza os dados planejados e realizados de volume de produção, faturamento, peças sucateadas ou retrabalhadas no processo, tempo disponível, paradas de produção, produção real e prevista, nível de estoques acabados, semi-acabados, estoques em processo e de matérias-primas, produtividade em unidades de [pcs por hora homem].

Indicadores monitorados pelo Comitê de Meio Ambiente - CMA, envolvem o consumo de energia elétrica, água (potável e industrial) e a geração de resíduos industriais (aterro e perigosos) são coletados e apresentados de forma agregada por um ou mais setores da empresa. E ainda indicadores de qualidade, acidentes, abstenção, afastamento e horas extras são gerados pelas áreas de apoio à manufatura.

3.1.2 Modelagem do problema

Uma matriz composta de 16 entradas (X) e quatro saídas (Y) é definida com base na literatura na opinião de gestores e especialistas³ da empresa em estudo. A matriz está organizada em 12 DMUs sendo que cada DMU é referente a um mês do período produtivo de Julho de 2016 a Junho de 2017 dos quais é interesse medir e comparar suas eficiências. Os

³ A empresa classifica como especialistas os colaboradores com formação superior com enquadramento sênior ou formação técnica com tempo de experiência superior a 10 anos na área de conhecimento.

parâmetros selecionados são os utilizados regularmente para calcular os indicadores monitorados pelo setor em estudo ou por suas áreas de apoio. O Quadro 1, que representa a matriz de *input/output*, é a base para a aplicação dos modelos apresentados na seção 2.2.6.

Quadro 1 ó Parâmetros selecionados para *Inputs* e *Outputs* do modelo

Parâmetros	Descrição do parâmetro	[UM]
X ₁	Número de dias trabalhados no período	[dias]
X ₂	Estoque de peças em processo, mais o saldo de ordens de produção	[PC]
X ₃	Cobertura em dias de peças em processo, calculado por X ₂ dividido pela demanda média diária	[PC/dia]
X ₄	Tempo gasto com <i>Setup</i> no período	[horas]
X ₅	Tempo gasto com Inspeção no período	[horas]
X ₆	Tempo gasto com Produção no período	[horas]
X ₇	Tempo gasto com Manutenção corretiva no período	[horas]
X ₈	Tempo gasto com Espera por equipamentos de movimentação	[horas]
X ₉	Outros Tempos gastos no período	[horas]
X ₁₀	Tempo disponível total, corresponde à soma de X ₄ a X ₉	[horas]
X ₁₁	Estoque de Peças Acabadas) no período do fechamento mensal	[PC]
X ₁₂	Excesso de cobertura de estoques acabados em dias, calculado pela divisão de X ₁₁ pela demanda media diária subtraíndo 3 dias	[dias]
X ₁₃	Peças rejeitadas pelo controle de qualidade no período	[PC]
X ₁₄	Consumo de energia elétrica pelo processo	[MWh]
X ₁₅	Consumo de água pelo processo	[m ³ /mês]
X ₁₆	Resíduos industriais gerados pelo processo	[TON/mês]
Y ₁	Peças acabadas produzidas da família A, B e B aprovadas	[PC]
Y ₂	Faturamento de peças da família A realizado no período	[R\$]
Y ₃	Faturamento de peças da família B realizado no período	[R\$]
Y ₄	Faturamento de peças da família C realizado no período	[R\$]

Fonte: Produção do próprio autor

Cabe observar no Quadro 1 que o parâmetro X₁₃ e X₁₆ que representam as peças rejeitadas pelo controle de qualidade e os resíduos industriais gerados pelo processo no período, respectivamente, são *outputs* indesejados portanto considerados como *inputs* no modelo, pois para medir a eficiência normalmente assume-se que os *inputs* devem ser minimizados ou os *outputs* maximizados (ANVARI *et al.*, 2014).

Segundo Ignatius *et al.* (2016), autores modelam *outputs* indesejados como *inputs* para modelos CRS ou seja, modelos que assumem retornos constantes de escala. Uma aplicação recente pode ser encontrada em Silva *et al.* (2017) que assume para uma condição semelhante a mesma consideração, ou seja *output* indesejado tratado como *input* no modelo.

4 APLICAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a aplicação do modelo TriO-MCDEA, partindo da coleta de dados, passando pela solução detalhada do modelo e trazendo como resultado, entre outros, a medida da eficiência por meio do novo indicador, o VAAMP do processo em estudo.

Do ponto de vista do gestor, as referências benchmarking internas identificadas, juntamente com as metas de desempenho por parâmetro estabelecidas, possibilitam a priorização dos esforços das áreas de Manufatura e seus apoios, mantendo-as alinhadas aos objetivos estratégicos da organização.

4.1 COLETA DE DADOS

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos do acesso à base de dados disponíveis do Sistema ERP da empresa, dados das planilhas eletrônicas utilizadas para calcular os indicadores monitorados mensalmente pela área estudada, bem como os acompanhados pelas áreas de apoio. Estes dados *inputs* e *outputs* coletados ou calculados do fechamento mensal do período são utilizados na aplicação do modelo apresentado no Capítulo 4.

Tabela 2 ó Dados coletados de *Inputs* e *Outputs* por DMU

<i>DMU_j</i>	<i>Inputs</i>																<i>Outputs</i>			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
Julho/2016	16	173	115,3	1,8	1,1	5,6	0,1	0,5	0,5	9,5	12	5,0	2	0,237	33,3	0,024	28	16,69	0	0
Agosto/2016	19	92	46,0	4,6	1,6	20,9	2,4	0,8	1,8	32,0	36	15,0	0	0,463	37,1	0,083	62	25,03	1,92	0
Setembro/2016	17	14	3,4	11,6	3,6	35,9	6,9	2,9	5,6	66,3	72	14,2	1	0,935	43,2	0,132	107	27,12	13,41	17,94
Outubro/2016	16	165	40,6	9,0	4,0	37,3	35,8	1,5	5,8	93,2	49	9,1	0	0,335	26,8	0,029	42	31,29	0	19,93
Novembro/2016	16	73	11,3	2,3	1,3	7,1	1,7	1,2	4,1	17,6	11	0,0	4	0,455	33,6	0,068	65	0	59,38	40,86
Dezembro/2016	9	97	218,3	2,5	0,7	8,9	1,2	0,0	0,8	14,1	11	21,8	0	0,051	9,2	0,005	4	0	3,83	0
Janeiro/2017	16	125	33,3	10,8	4,8	75,6	14,9	1,0	6,6	113,7	53	11,1	1	0,745	42,8	0,086	102	12,52	26,82	13,95
Fevereiro/2017	18	340	61,8	7,2	2,8	28,8	4,5	0,9	2,4	46,5	3	0,0	1	0,425	28,5	0,047	49	9,73	71,83	9,97
Março/2017	21	526	104,2	8,7	2,3	51,4	6,1	3,5	5,5	77,4	137	24,1	0	1,817	90,5	0,209	240	15,3	0	83,72
Abril/2017	18	324	19,3	14,2	4,2	98,9	22,8	1,4	9,7	151,0	130	4,7	4	2,210	102,2	0,223	295	82,05	33,52	148,5
Mai/2017	20	126	9,8	13,9	5,8	105,2	21,9	4,0	5,7	156,5	233	15,1	5	1,992	125,1	0,375	360	125,16	28,73	46,84
Junho/2017	19	157	7,4	21,5	4,8	102,5	11,8	6,7	15,5	162,9	201	6,5	7	2,040	146,1	0,241	372	162,01	30,65	138,54

Fonte: Produção do próprio autor

4.2 SOLUÇÃO DO MODELO

O modelo TriO-MCDEA é construído a partir do carregamento dos dados da Tabela 2 em uma planilha Excel®. São contruídas as equações e as inequações relacionando as variáveis e os parâmetros segundo o modelo representado pelas Expressões (57) ó (65) detalhados a seguir para uma DMU da aplicação do TriO-MCDEA sem Super-eficiência.

Dados dos parâmetros de *input* / *output* da Tabela 2.

DMU	x_1	x_2	...	x_{16}	y_1	y_2	...	y_4
1	16	173	...	0,024	28	16,69	...	0
2	19	92	...	0,083	62	25,03	...	0
...
12	19	157	...	0,241	372	162,01	...	138,54

Função objetivo:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9 + \theta_{10} + \theta_{11} + \theta_{12} + \theta_{13} + \theta_{14} + \theta_{15} + \theta_{16} + \theta_{17} + \theta_{18} + \theta_{19} + \theta_{20} + \theta_{21} + \theta_{22} + \theta_{23} + \theta_{24} + \theta_{25} + \theta_{26} + \theta_{27} + \theta_{28} + \theta_{29} + \theta_{30} + \theta_{31} + \theta_{32} + \theta_{33} + \theta_{34} + \theta_{35} + \theta_{36} + \theta_{37} + \theta_{38} + \theta_{39} + \theta_{40} + \theta_{41} + \theta_{42} + \theta_{43} + \theta_{44} + \theta_{45} + \theta_{46} + \theta_{47} + \theta_{48} + \theta_{49} + \theta_{50} + \theta_{51} + \theta_{52} + \theta_{53} + \theta_{54} + \theta_{55} + \theta_{56} + \theta_{57} + \theta_{58} + \theta_{59} + \theta_{60} + \theta_{61} + \theta_{62} + \theta_{63} + \theta_{64} + \theta_{65} + \theta_{66} + \theta_{67} + \theta_{68} + \theta_{69} + \theta_{70} + \theta_{71} + \theta_{72} + \theta_{73} + \theta_{74} + \theta_{75} + \theta_{76} + \theta_{77} + \theta_{78} + \theta_{79} + \theta_{80} + \theta_{81} + \theta_{82} + \theta_{83} + \theta_{84} + \theta_{85} + \theta_{86} + \theta_{87} + \theta_{88} + \theta_{89} + \theta_{90} + \theta_{91} + \theta_{92} + \theta_{93} + \theta_{94} + \theta_{95} + \theta_{96} + \theta_{97} + \theta_{98} + \theta_{99} + \theta_{100}$$

Sujeito às restrições:

$$16\theta_1 + 173\theta_2 + \dots + 0,024\theta_{16} = 1$$

$$28\theta_1 + 16,69\theta_2 + \dots + 0\theta_{16} - \theta_{17} \leq \theta$$

$$28\theta_1 + 16,69\theta_2 + \dots + 0\theta_{16} - [16\theta_1 + 173\theta_2 + \dots + 0,024\theta_{16}] - \theta_{17} + \theta_{18} = 0$$

$$62\theta_1 + 25,03\theta_2 + \dots + 0\theta_{16} - [19\theta_1 + 92\theta_2 + \dots + 0,083\theta_{16}] - \theta_{19} + \theta_{20} = 0$$

...

$$372\theta_1 + 162,01\theta_2 + \dots + 138,54\theta_{16} - [19\theta_1 + 157\theta_2 + \dots + 0,241\theta_{16}] - \theta_{31} + \theta_{32} = 0$$

$$\theta \geq \theta_{17}; \theta_{19}; \dots; \theta_{32}$$

$$\theta_{17}; \theta_{19}; \dots; \theta_{32} \geq 0$$

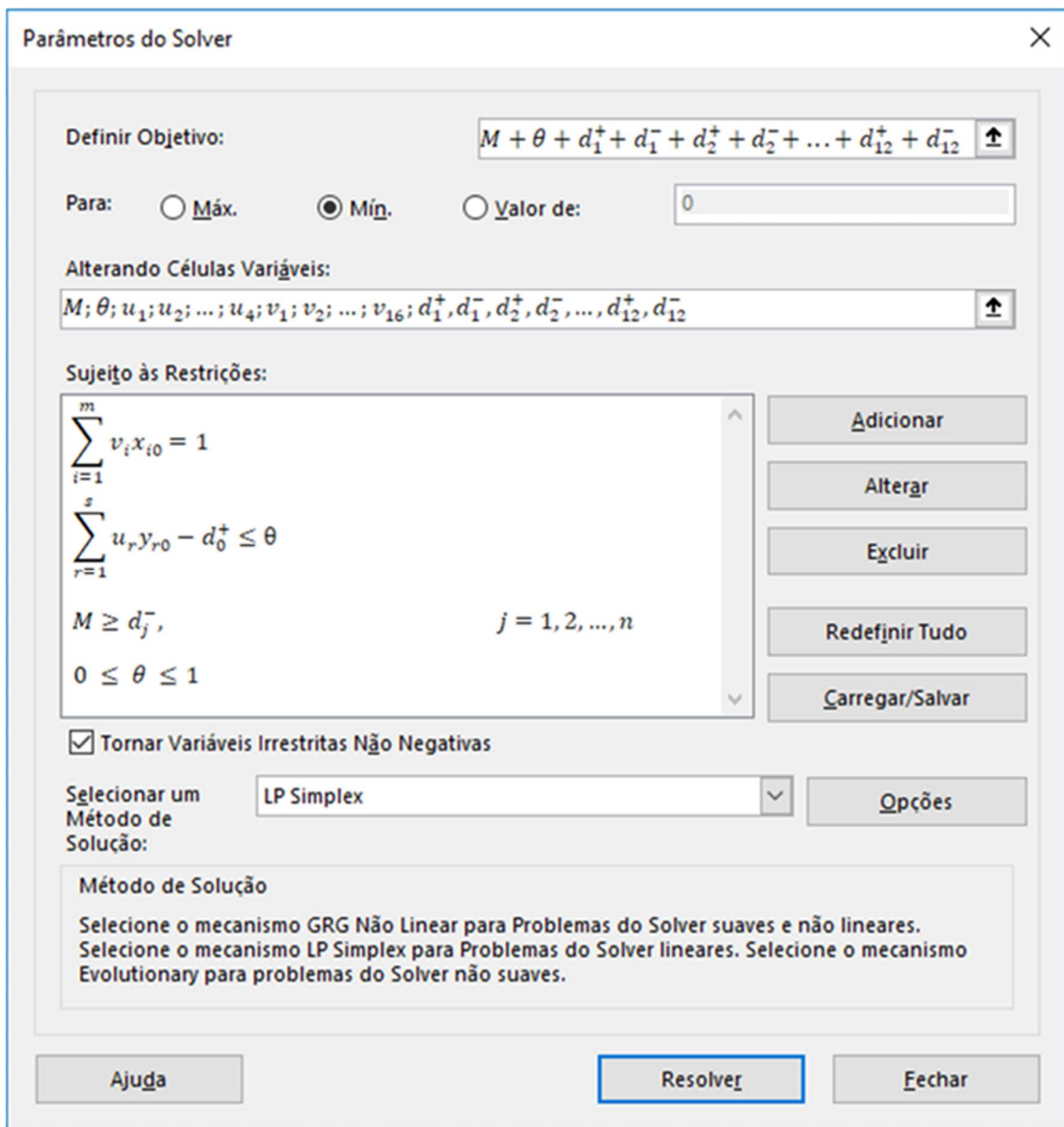
$$\theta_{17}; \theta_{19}; \dots; \theta_{32} \geq 0$$

$$\theta_{17}, \theta_{19}, \theta_{21}, \theta_{23}, \dots, \theta_{31}, \theta_{32} \geq 0$$

0 2 2 2 1

A eficiência calculada para DMU₁ (em análise) é dada por $Eff = (1 - \theta) \cdot \theta$ sendo variáveis os multiplicadores $u_1; u_2; \dots; u_4; v_1; v_2; \dots; v_{16}$ e as expressões $\theta; \theta; \theta; \theta; \theta; \theta; \dots; \theta; \theta$ que em conjunto com a função objetivo e as restrições são parametrizadas no Solver do Excel representada na Figura 12 complementando a modelagem do TriO-MCDEA.

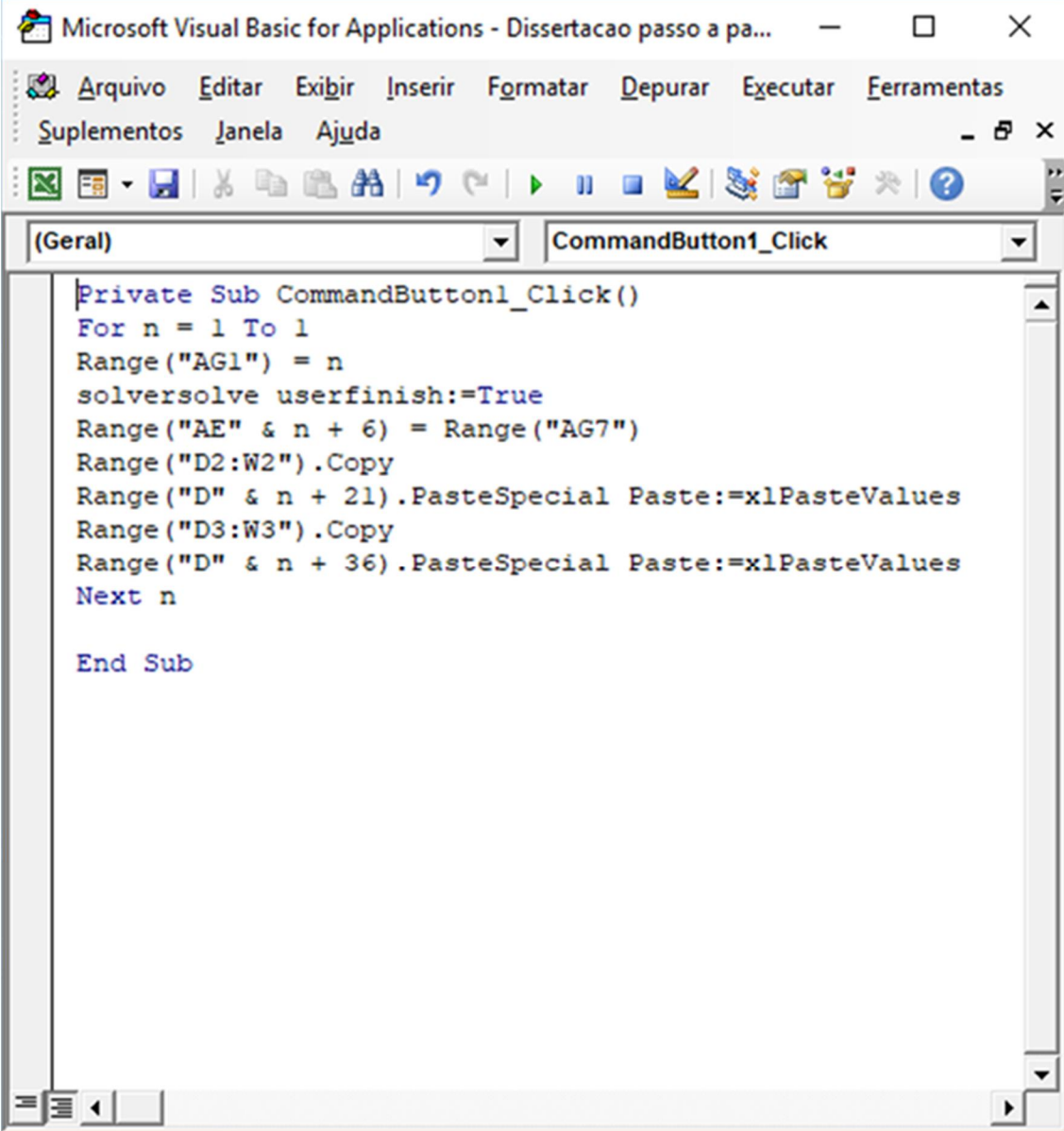
Figura 12 ó Parametrização do modelo no Solver



Fonte: Produção do próprio autor

O pseudo-código de programação VBA Excel[®] apresentado na Figura 13, executa a otimização pelo algoritmo LP Simplex no Solver, bem como as iterações retornando com a eficiência calculada para as 12 DMUs de modo automatizado apresentando os resultados em planilha.

Figura 13 ó Pseudo-código de programação VBA Excel[®]



```

Private Sub CommandButton1_Click()
    For n = 1 To 12
        Range("AG1") = n
        solversolve userfinish:=True
        Range("AE" & n + 6) = Range("AG7")
        Range("D2:W2").Copy
        Range("D" & n + 21).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
        Range("D3:W3").Copy
        Range("D" & n + 36).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    Next n

End Sub

```

Fonte: Produção do próprio autor

Para os métodos quantitativos foi utilizada uma máquina com processador Intel Core i5[®], com *clock* de 1,9 GHZ e capacidade de 4 GB de memória RAM. O tempo computacional para realização da rotina é inferior a 5 segundos.

A seguir a Tabela 3 apresenta a avaliação da eficiência das 12 DMUs pelos métodos do MCE da empresa, do TriO-MCDEA, do BiO-MCDEA, do MCDEA Estendido, do WGP-MCDEA e do DEA-CCR CRS.

Tabela 3 ó Comparativo das Eficiências método MCE x modelos DEA

DMU	MCE da Empresa	TriO-MCDEA (VAAMP)	BiO-MCDEA	MCDEA Estendido	WGP MCDEA	DEA-CRS
Julho/2016	0,20%	20,40%	28.57%	44.49%	37.81%	100,00%
Agosto/2016	1,42%	91,32%	91.85%	100.00%	100.00%	100,00%
Setembro/2016	6,77%	77,17%	78.88%	81.63%	63.77%	100,00%
Outubro/2016	2,95%	24,10%	60.30%	64.03%	49.43%	100,00%
Novembro/2016	1,91%	65,87%	65.87%	74.71%	68.22%	100,00%
Dezembro/2016	0,16%	3,98%	4.18%	4.18%	4.12%	100,00%
Janeiro/2017	6,68%	73,87%	91.88%	98.92%	92.04%	100,00%
Fevereiro/2017	1,93%	100,00%	100.00%	100.00%	64.39%	100,00%
Março/2017	1,73%	96,67%	100.00%	100.00%	100.00%	100,00%
Abril/2017	14,24%	94,97%	100.00%	100.00%	100.00%	100,00%
Mai/2017	14,75%	95,25%	100.00%	100.00%	100.00%	100,00%
Junho/2017	21,50%	100,00%	100.00%	100.00%	100.00%	100,00%
DMUs eficientes		2	5	6	5	12

Fonte: Produção do próprio autor

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Primeiramente nota-se que o problema da empresa em estudo envolve somente 12 DMUs, 16 *inputs* e quatro *outputs*, que pela regra de ouro de Banker *et al.* (1989) seriam necessárias três vezes a soma do número de *inputs* e *outputs* ($3 \times (16+4)$) igual a 60 DMUs, ou o produto do número de *inputs* e *outputs* (16×4) igual a 64 DMUs, devendo-se adotar o maior entre os dois critérios, portanto 64 DMUs.

De fato, ao aplicar-se o modelo DEA-CRS todas às DMUs são eficientes (igual a 100%), conforme mostrado última coluna da Tabela 3 confirmando o baixo poder de discriminação dos modelos clássicos quando a regra de ouro não é atendida.

Na última linha da Tabela 3 apresenta-se a quantidade de DMUs avaliadas eficientes pelos modelos MCDEA, sendo TriO-MCDEA superior aos demais modelos quanto ao poder de discriminação avaliando somente duas DMUs como eficientes.

Para explorar os resultados na Tabela 3 é verificada a existência de correlação entre as eficiências calculadas pelo MCE da empresa e pelos modelos MCDEA estudados aplicando-se o teste de Correlação de postos de Spearman (FOX, 2008) e *p-valor* para julgar se há correlação entre estes indicadores.

Considerando-se a hipótese nula H_0 - Não há correlação entre os indicadores e H_1 - Há correlação entre os indicadores, a um nível de significância α de 5% (risco de aceitar H_0 e haver correlação ou rejeitar H_0 e não haver correlação), a aplicação do teste de Correlação de Spearman vai retornar com valores para os coeficientes ρ_{τ} no intervalo entre menos um e um (-1, 1), significando que há correlação forte e positiva quanto mais o valor de ρ_{τ} se aproximar de um (1) ou há correlação forte e negativa quanto mais o valor de ρ_{τ} se aproximar de menos um (-1) (SILVA *et al.*, 2017).

Tendo estabelecido um risco α , se o *p-valor* for menor que o risco escolhido conclui-se que o resultado do teste de correlação aplicado tem validade, caso contrário, ou seja se *p-valor* for maior que o risco estabelecido não se tem informações suficientes para concluir se o resultado do teste de correlação seja válido (CAKMAKCI, 2009). O cálculo de ρ_{τ} é expresso pela Equação (75) a seguir:

$$\rho_{\tau} = 1 - \frac{6 \sum \Delta_i^2}{(n^2 - 1)} \quad (75)$$

Sendo n o número de DMUs e Δ_{\square} a diferença entre a posição (*ranking*) da eficiência de cada DMU para cada modelo que se deseja comparar. A Tabela 4 apresenta os valores do coeficiente de Correlação de Spearman \square_{\square} e o *p-valor* para comparações entre o MCE da empresa e cada uma das eficiências calculadas pelos modelos MCDEA, bem como cada um dos modelos MCDEA entre si.

Tabela 4 ó Coeficientes de Correlação de Spearman entre os métodos

DMU	MCE da Empresa	TriO-MCDEA	BiO-MCDEA	MCDEA Estendido
TriO-MCDEA	$s = 0,570$ (<i>p-valor</i> = 0,05)	-	-	-
BiO-MCDEA	$s = 0,638$ (<i>p-valor</i> = 0,03)	$s = 0,944$ (<i>p-valor</i> = 0,00)	-	-
MCDEA Estendido	$s = 0,515$ (<i>p-valor</i> = 0,087)	$s = 0,931$ (<i>p-valor</i> = 0,00)	$s = 0,944$ (<i>p-valor</i> = 0,00)	-
WGP-MCDEA	$s = 0,638$ (<i>p-valor</i> = 0,087)	$s = 0,745$ (<i>p-valor</i> = 0,00)	$s = 0,827$ (<i>p-valor</i> = 0,00)	$s = 0,894$ (<i>p-valor</i> = 0,00)

Fonte: Produção do próprio autor

Dos resultados da Tabela 4 é possível verificar que os indicadores de eficiência calculados a partir dos quatro modelos MCDEA testados têm forte correlação positiva com os valores do MCE da empresa, e também entre si, sendo este último um resultado esperado pelo fato de que estes modelos são baseados no mesmo modelo proposto por Li e Reeves (1999) com algumas diferentes mudanças na sua estrutura algébrica para reduzir a complexidade computacional nas resoluções dos mesmos. No entanto, apenas para dois resultados o TriO-MCDEA e o BiO-MCDEA versus MCE pode-se afirmar que há correlação, ou seja é rejeitada a hipótese H_0 ao nível estabelecido em 5%, pois apresentam *p-valor* menor ou igual a 5%.

Para os outros dois resultados do MCDEA Estendido e do WGP-MCDEA versus MCE não há informação suficiente para afirmar se existe correlação entre eles pois apresentam *p-valor* maior que 5%.

Apresentadas algumas vantagens do novo indicador VAAMP calculado pelo novo modelo TriO-MCDEA proposto, sempre com base nos valores do MCE da empresa, Tabela 3 é retomada com seus resultados submetidos à análise dos especialistas e gestores envolvidos com o processo da empresa estudada. Outros resultados e implicações gerenciais são identificadas e comentadas a seguir.

Para o VAAMP apenas duas DMUs (Fevereiro/2017 e Junho/2017) foram consideradas eficientes (100%), sendo que uma delas (Junho/2017) é a mais eficiente pelo indicador MCE.

Os especialistas concordam que os resultados do VAAMP são coerentes com o MCE da empresa e que este último que leva em conta somente parâmetros de tempo pode não ser suficiente para medir e avaliar a eficiência da complexidade dos processos produtivos envolvidos. O VAAMP pode ser utilizado com vantagens, pois possibilita que outros parâmetros sejam incluídos para medir eficiência de um processo em um só indicador.

Sendo esta uma vantagem da nova abordagem proposta que é possibilitar aos gestores avaliar diferentes aspectos concomitantemente, contornando uma limitação do MCE, que considera apenas valores de tempo, enquanto o novo indicador proposto pode incluir mais informações além dos tempos produtivos gerando desta maneira, um valor de eficiência do processo de manufatura de forma otimizada aderente à realidade industrial.

Um outro ponto interessante foi que a DMU com o menor valor de MCE (0,16%), a DMU Dezembro/2016, coincide com a classificação da eficiência estimada pelo VAAMP (3,98%). Tais resultados foram consistentes pois neste período produziu-se antecipadamente as necessidades do período seguinte incorrendo em elevados estoques, indesejados em termos do LM.

Uma importante informação fornecida pelo procedimento proposto diz respeito à identificação dos parâmetros de entrada e de saída que considerados relevantes pelo modelo para cada DMU, ou seja, em quais questões a organização deve concentrar esforços para melhorar o desempenho do processo de produção estudado.

Um parâmetro é considerado relevante para o cálculo da eficiência de uma dada DMU quando o for atribuído, pelo modelo, um peso v_i para o parâmetro da entrada ou u_r para o parâmetro da saída maior que zero, que pode ser obtido pela otimização do modelo TriO-MCDEA, conforme apresentado pelas Expressões (57) - (65) e verificação dos valores atribuídos aos pesos u_r e v_i , se o valor é nulo o parâmetro não é relevante ou se é não nulo o parâmetro é relevante.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros relevantes para cada DMU avaliada pelo modelo TriO-MCDEA. Para a DMU Julho/2016 por exemplo, os parâmetros X_2 , X_6 , X_{13} e X_{14} para as entradas e Y_1 , Y_3 e Y_4 para as saídas são as relevantes para o período.

Tabela 5 ó Variáveis *input* e *output* relevantes por DMU no modelo TriO-MCDEA

<i>DMU_j</i>	<i>Inputs</i> relevantes																<i>Outputs</i> relevantes			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
Julho/2016		ç				ç							ç	ç			ç		ç	ç
Agosto/2016											ç		ç	ç	ç	ç	ç			
Setembro/2016				ç				ç			ç		ç	ç		ç	ç		ç	
Outubro/2016		ç					ç	ç					ç			ç	ç	ç	ç	
Novembro/2016		ç						ç	ç				ç	ç		ç	ç	ç	ç	
Dezembro/2016			ç								ç		ç				ç		ç	
Janeiro/2017						ç		ç					ç		ç		ç	ç	ç	ç
Fevereiro/2017		ç				ç		ç					ç	ç		ç	ç	ç	ç	
Março/2017		ç						ç			ç		ç	ç			ç		ç	
Abril/2017						ç					ç		ç	ç	ç		ç		ç	
Maiio/2017		ç									ç		ç	ç		ç	ç		ç	
Junho/2017		ç									ç		ç	ç		ç	ç		ç	

Fonte: Produção do próprio autor

Baseado nos conceitos do DEA-CRS, de acordo com Charnes *et al.* (1978), sabe-se que para as DMUs consideradas ineficientes pode-se estimar alvos para as saídas (*Outputs*) e para as entradas (*Inputs*), afim de tornar eficiente uma DMU ineficiente.

Metas⁴ podem ser estabelecidas multiplicando-se cada parâmetro de saída pelo valor inverso da eficiência obtendo metas para as saídas e dividindo-se cada parâmetro de entrada pelo valor inverso da eficiência obtendo as metas para as entradas. Esse procedimento deve ser feito somente para os parâmetros de entrada e de saída relevantes apresentados na Tabela 5 e para as DMUs avaliadas ineficientes tornem-se eficientes.

Tomando como base a DMU Julho/2016 que apresenta um VAAMP igual a 20,40%, para torná-la eficiente é necessário aumentar sua saída em 4,90 vezes (igual a 1 dividido por 20,40%), ou seja, Y_1 passa de 28 para 137,25. e Y_2 muda de 16.690 para 81.814. Estas metas não são possíveis de serem alcançadas na prática, na opinião dos especialistas e dos gestores.

Tendo como base agora a DMU Maio/2017 que apresenta um valor de VAAMP igual a 95,25%, para tornar essa DMU eficiente a Companhia precisa aumentar 1,05 vezes (igual a 1 dividido por 95,25%) seus *outputs* originais e reduzir em 1,05 vezes seus *inputs*, o que é considerado tangível pelos gestores⁵.

Seguindo o método de pesquisa apresentado na Figura 6, o modelo TriO-MCDEA foi otimizado pelo modelo da Super-eficiência, apresentado anteriormente pelas Expressões (66) - (74), cujos resultados são mostrados na Tabela 6.

⁴ Procedimento para calcular metas para os parâmetros de entrada e saída e tornar as DMUs avaliadas como ineficientes em eficientes.

⁵ Submeter as metas para avaliação dos gestores julgarem sua viabilidade

Tabela 6 ó Classificação das DMUs com Super-eficiência

DMU	Super-eficiência	Classificação
Fevereiro/2017	182,085%	1
Junho/2017	104,393%	2
Março/2017	96,668%	3
Mai/2017	95,482%	4
Abril/2017	94,975%	5
Agosto/2016	91,316%	6
Setembro/2016	77,417%	7
Novembro/2016	59,317%	8
Janeiro/2017	48,587%	9
Julho/2016	20,024%	10
Outubro/2016	14,616%	11
Dezembro/2016	2,237%	12

Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se verificar que a DMU Junho/2017 e a Dezembro/2016 coincidem como a melhor e a pior eficiência, respectivamente entre os métodos abordados. A DMU Fevereiro/2017 dada como eficiente pelo TriO-MCDEA apresenta a maior distância entre os métodos na avaliação das DMUs.

Verifica-se que o valor de θ_2^* é nulo para as DMUs Fevereiro/2017 e Junho/2017, indicando que são altamente eficientes, ou seja, não há margens para aumentar seus insumos ou reduzir seus produtos sem acarretar a ineficiência para estas DMUs.

Finalmente, os especialistas e gestores da empresa cumprindo a última etapa da abordagem metodológica proposta na Figura 6, quando solicitados a fazer seus comentários sobre esta abordagem para avaliar a eficiência do processo estudado estão descritos a seguir:

A adoção do indicador MCE na empresa é baseada nas análises iniciais de um projeto na sua fase de concepção, ou seja, leva em consideração a redução ou eliminação de atividades que não agregam valor ao processo produtivo avaliando o fluxo de materiais o leiaute das máquinas, equipamentos e periféricos sendo todos estes, dados de entradas para a

priorização de ações pelo time de projeto. As definições como tamanho de lotes, áreas de estocagem, quantidade de embalagens necessárias, estoque ou períodos de espera, entre outros são feitas neste momento. O indicador MCE também é usado quando um novo processo de produção é implementado, ou quando uma mudança é gerada por um projeto de melhoria contínua (SHAHIN *et al.*, 2016).

Na opinião dos especialistas e gestores da empresa, o resultado apresentado no comparativo das eficiência pelos diferentes métodos da Tabelas 3, bem como o ranqueamento das DMUs da Tabela 6, por meio da solução do modelo de Supereficiência são coerentes se comparados com o MCE da empresa. A abordagem proposta dos modelos TriO-MCDEA com e sem Supereficiência e o novo indicador VAAMP apresenta boa aderência com a realidade do setor estudado, sendo o procedimento proposto bastante interessante ao tratar ao mesmo tempo dados de tempos de produção, tempos de parada, estoques, meio-ambiente, volumes de produção e vendas podendo assim auxiliá-los na tomada de decisão envolvendo aspectos adicionais aos tratados pelo MCE.

Uma outra vantagem da abordagem proposta é que toda a modelagem e otimização pode ser feita utilizando VBA Excel[®], o que na opinião dos gestores é um diferencial, visto que, pode ser atualizada com facilidade, tanto na manutenção dos dados quanto na execução dos cálculos, por ser um recurso disponível e de larga utilização pelos colaboradores deste e outros setores da empresa.

Por fim, segundo os gestores, o indicador VAAMP aponta ações para redução de desperdícios e para a alocação dos recursos escassos podendo facilitar a gestão numa perspectiva da *Lean e Green Manufacturing* que está alinhada aos objetivos estratégicos da empresa.

No Capítulo cinco a seguir, busca-se responder às questões de pesquisa formuladas na Seção 1.3 verificando-se o atendimento aos objetivos geral e específicos. São propostas sugestões para pesquisas futuras com o objetivo de abordar temas não tratados no escopo deste trabalho.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DE PESQUISA E VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

Este trabalho descreve uma abordagem inovadora pelo fato de que, por meio de pesquisa realizada na base *Web of Science*, não são encontradas publicações aplicando modelos MCDEA em problemas para medir a eficiência de processos produtivos baseados em conceitos Green e Lean Manufacturing.

O novo indicador denominado VAAMP é proposto, calculado e tem os resultados apresentados na Tabela 3 por meio da aplicação do novo modelo TriO-MCDEA sem Super-eficiência representado pelas Expressões (57) - (65) responde a segunda questão de pesquisa definida na seção 1.3, ou seja, se é possível aplicar um novo modelo MCDEA para medir a eficiência de processos reais de fabricação.

O modelo aplicado agora com o conceito de Super-eficiência apresentado pelas Expressões (66) ó (74) que permite ao setor da empresa estudada classificar por um *ranking* de eficiência seus processos por período produtivo é apresentado na Tabela 6 e responde à terceira questão de pesquisa e atende ao terceiro objetivo específico.

Utilizar-se de parâmetros de entrada e saída diversos como tempo de produção, tempo de paradas, tempo de preparação (*set-up*), volumes de produção, volume e valores de vendas realizadas, e ainda, questões ligadas ao consumo de recursos com impacto no meio-ambiente para identificar quais parâmetros são significativos afim de direcionar recursos ou investimentos diretos para a melhoria dos processos são apresentados na Tabela 5, atendendo ao primeiro objetivo específico.

A possibilidade de identificar e estabelecer metas viáveis para valores de entradas ou saídas de uma DMU considerada ineficiente para torná-la eficiente é apresentado no capítulo anterior na seção 4.2 responde a quarta questão de pesquisa e atende ao segundo objetivo específico.

O quarto objetivo específico é atendido pelos resultados do Teste de Correlação de Spearman apresentados na Tabela 4 acrescidos aos resultados das eficiências apresentados na Tabela 3 e apoiados pela discussão conjunta com os especialistas e os gestores apresentada na seção 4.2. A primeira questão de pesquisa também é respondida pois, na opinião destes profissionais avaliar o MCE com base somente em parâmetros de tempo pode não ser suficiente para medir a eficiência de processos produtivos em toda sua complexidade.

Desta forma, as questões de pesquisa definidas na seção 1.3 que motivaram este trabalho são respondidas, bem como os objetivos específicos estruturados em seguida são completamente atendidos.

Conclui-se assim que o objetivo geral de aplicar um novo modelo multiobjetivo de Análise Envoltória de Dados para medir a eficiência do ciclo de manufatura baseado em conceitos da *Lean* e *Green Manufacturing* é atendido com resultados muito úteis para a empresa estudada, pois tendo identificadas as DMUs eficientes, bem como os *benchmankings* com proposição de metas para tornarem os períodos ineficientes, eficientes, suporta a organização na decisão da aplicação dos recursos escassos ou esforços de maneira otimizada na busca de eficiência em uma visão mais geral.

Do ponto de vista gerencial, com um certo esforço e alguns cuidados pode-se replicar esta aplicação em outros setores da empresa ou utilizar-se da mesma abordagem em outros tipos de indústrias buscando sua implementação e validação em outros segmentos industriais.

5.2 PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Como propostas para pesquisas futuras pode-se testar a inclusão no modelo de incerteza, inerente aos processos reais de manufatura para o cálculo do VAAMP, por meio da combinação de lógicas dos C

onjuntos *Fuzzy* com os modelos MCDEA ou alternativamente por Simulação Monte Carlo trabalhando em conjunto com modelos MCDEA; uma segunda proposta é aplicar em uma nova instância, incluindo nos parâmetros de saída (*Outputs*) dados reais do OEE, um indicador monitorado pelo setor em estudo na empresa,

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, M.; ARVAN, M.; RAZMI, J. An integrated approach for supplier portfolio selection: Lean or agile? **Expert Systems with Applications**, New York, p. 6796690, 2015.
- AGUADO, S.; ALVAREZ, R.; DOMINGO, R. Model of efficient and sustainable improvements in a lean production system through processes of environmental innovation. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 47, p. 1416148, 2013.
- ALHURAISH, I.; ROBLEDO, C.; KOBI, A. A comparative exploration of lean manufacturing and six sigma in terms of their critical success factors. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 164, p. 3256337, 2017.
- AMINDOUST, A., AHMED, S., SAGHAFINIA, A. Using data envelopment analysis for green supplier selection in manufacturing under vague environmental. **Advanced Materials Research**, Zurich, v. 622, p. 168261685, 2013.
- AMIN, GHOLAM R.; TOLOO, M. Comments on finding the most efficient DMUs in DEA: An improved integrated model. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 56, n. 4, p. 170161702, 2009.
- ANDERSEN, P.; PETERSEN, N. C. A Procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. **Management Science**, Providence, v. 39, n. 10, p. 126161264, 1993.
- ANVARI, A. et al. An integrated design methodology based on the use of group AHP-DEA approach for measuring lean tools efficiency with undesirable output. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 70, n. 9612, p. 216962186, 2014.
- AQLAN, F.; AL-FANDI, L. Prioritizing process improvement initiatives in manufacturing environments. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 196, n. December 2017, p. 2616268, 2018.
- AZADEH, A. et al. An integrated multi-criteria Taguchi computer simulation-DEA approach for optimum maintenance policy and planning by incorporating learning effects. **International Journal of Production Research**, London, v. 51, n. 18, p. 537465385, 2013.
- AZADEH, A. et al. Leanness assessment and optimization by fuzzy cognitive map and multivariate analysis. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 42, n. 15616, p. 605066064, 2015.
- BAL, H., ÖRKÜ, H. H., ÇELEBIOĞLU, S. Improving the discrimination power and weights dispersion in the data envelopment analysis. **Computers and Operations Research**, New York, v. 37, p. 996107, 2010.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, Providence, v. 30, n. 9, p. 107861092, 1984.
- BANKER, R. D. et al. An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. **Research in Governmental and Non-Profit Accounting**, v. 5, p. 1256163,

1989.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, Bradford, v. 22, n. 2, p. 2416264, 2002.

BORTOLOTTI, T.; ROMANO, P. Lean first, then automate a framework for process improvement in pure service companies. A case study. **Production Planning & Control**, London, v. 23, n. 7, p. 5136522, 4 jul. 2012.

BOYD, D. T., KRONK, L. A., BOYD, S. C. Measuring the effects of lean manufacturing systems on financial accounting metrics using data envelopment analysis. **Investment Management and Financial Innovations**, Sumy, v. 3, p. 40654, 2006.

BRYMAN, A.; BELL, E. **The nature of quantitative research**. In: Business Research Methods. New York: Oxford University, p. 154-177, 2007.

CAKMAKCI, M. Process improvement: Performance analysis of the setup time reduction-SMED in the automobile industry. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 41, n. 162, p. 1686179, 2009.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 2, n. 6, p. 4296444, 1978.

CHEN, YW., LARBANI, M. CHANG, Y. Multiobjective data envelopment analysis. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 60, n. 11, p. 155661566, 2009.

CHEN, Y.; DU, J.; HUO, J. Super-efficiency based on a modified directional distance function. **Omega (United Kingdom)**, Elmsford, v. 41, n. 3, p. 6216625, 2012.

CHIARINI, A. Sustainable manufacturing-greening processes using specific lean production tools: An empirical observation from european motorcycle component manufacturers. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 85, p. 2266233, 2014.

CIARAPICA, F. E.; BEVILACQUA, M.; MAZZUTO, G. Performance analysis of new product development projects. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 65, n. 2, p. 1776206, 2016.

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA) - Thirty years on. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 1617, 2009.

DAO, V.; LANGELLA, I.; CARBO, J. From green to sustainability: Information technology and an integrated sustainability framework. **Journal of Strategic Information Systems**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 63679, 2011.

DÜES, C. M.; TAN, K. H.; LIM, M. Green as the new lean: How to use lean practices as a catalyst to greening your supply chain. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 40, p. 936100, 2013.

FOX J. **Applied regression analysis and generalized linear models**. 2. ed. Los Angeles, CA: Sage Publications, 2008.

- FRIESNER, D.; MITTELHAMMER, R.; ROSENMAN, R. Inferring the incidence of industry inefficiency from DEA estimates. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 224, n. 2, p. 4146424, 2013.
- GHASEMI, M. R.; IGNATIUS, J.; EMROUZNEJAD, A. A bi-objective weighted model for improving the discrimination power in MCDEA. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 233, n. 3, p. 6406650, 2014.
- GODOY-DURÁN, Á. et al. Assessing eco-efficiency and the determinants of horticultural family-farming in southeast Spain. **Journal of Environmental Management**, v. 204, p. 5946604, 2017.
- HATAMI-MARBINI, A.; TOLOO, M. An extended multiple criteria data envelopment analysis model. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 73, p. 2016219, 2017.
- HELLENO, A. L. et al. Integrating sustainability indicators and lean manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in brazilian industry. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 153, p. 4056416, 2017.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**, 8. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010.
- HINES, P.; HOLWEG, M.; RICH, N. Learning to evolve. **International Journal of Operations & Production Management**, Bradford, v. 24, n. 10, p. 99461011, out. 2004.
- HOMA SHEIKH-SAJADIEH et al. Achieve to agility manufacturing by use of seven wastes through lean manufacturing. **Advances in Environmental Biology**, p. 1687, 2013.
- HONMA, S.; HU, J. L. Industry-level total-factor energy efficiency in developed countries: A Japan-centered analysis. **Applied Energy**, London, v. 119, p. 67678, 2014.
- IGNATIUS, J. et al. Carbon efficiency evaluation: An analytical framework using fuzzy DEA. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 253, n. 2, p. 4286440, fev. 2016.
- JOHANSSON, G.; SUNDIN, E. Lean and green product development: Two sides of the same coin? **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 85, p. 1046121, 2014.
- JOHNES, J.; PORTELA, M.; THANASSOULIS, E. Efficiency in education. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 68, n. 4, p. 3316338, 2017.
- KHANCHANAPONG, T. et al. The unique and complementary effects of manufacturing technologies and lean practices on manufacturing operational performance. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 153, p. 1916203, 2014.
- KROLCZYK, G. M. et al. Surface morphology analysis of duplex stainless steel (DSS) in clean production using the power spectral density. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Amsterdam, v. 94, p. 4646470, 2016.
- KUMAR, P.; SINGH, R. K.; VAISH, A. Suppliers green performance evaluation using fuzzy extended ELECTRE approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 3, p. 8096821, 2017.

LEE HSUAN-SHIH; CHU, C.-W.; ZHU, J. Super-efficiency DEA in the presence of infeasibility: One model approach. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 213, n. 1, p. 3596360, 2011.

LI, X.-B.; REEVES, G. R. A multiple criteria approach to data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 115, n. 3, p. 5076517, jun. 1999.

MEZA, L. A.; LINS, M. P. E. Review of methods for increasing discrimination in data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 116, n. 164, p. 2256242, 2002.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda., 2010.

NALLUSAMY, S. Enhancement of productivity and efficiency of cnc machines in a small scale industry using total productive maintenance. **International Journal of Engineering Research in Africa**, v. 25, p. 1196126, 2016.

NG, R.; LOW, J. S. C.; SONG, B. Integrating and implementing lean and green practices based on proposition of carbon-value efficiency metric. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 95, p. 2426255, 2015.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 1997.

PEDERSEN, P.-C.; SLEPNIOV, D. Management of the learning curve: a case of overseas production capacity expansion. **International Journal of Operations & Production Management**, Bradford, v. 36, n. 1, p. 42660, 2016.

PLENERT, G. J. **Lean Management principles for information technology**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

RUBEM, A. P. DOS S.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; ANGULO MEZA, L. A goal programming approach to solve the multiple criteria DEA model. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 260, n. 1, p. 1346139, jul. 2017.

SALEM, A. H.; DEIF, A. M. Developing a greenometer for green manufacturing assessment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 154, p. 4136423, 2017.

SALEESHYA, P. G.; VYASS, G. V. Assessment and quantification of leanness in manufacturing systems- an investigative study. **International Journal of Business and Systems Research**, v. 11, p. 3096324, 2017.

SAN CRISTÓBAL, J. R. A multi-criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the renewable energy technologies. **Renewable Energy**, Oxford, v. 36, n. 10, p. 274262746, 2011.

SHAHIN, A. et al. A new approach for estimating leagile decoupling point using data envelopment analysis. **Assembly Automation**, Bradford, v. 36, n. 3, p. 2336245, 2016.

SILVA, A. F. et al. Bi-Objective multiple criteria data envelopment analysis combined with

the overall equipment effectiveness: An application in an automotive company. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 157, p. 2786288, 2017.

SINGH, B.; GARG, S. K.; SHARMA, S. K. Development of index for measuring leanness: study of an indian auto component industry. **Measuring Business Excellence**, v. 14, n. 2, p. 46653, 2010.

SOUBIHIA, D. F.; JABBOUR, C. J. C.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. Green manufacturing: Relationship between adoption of green operational practices and green performance of brazilian ISO 9001-certified firms. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 2, n. 1, p. 95698, 2015.

SOUZA, J. P. E.; ALVES, J. M. Lean-integrated management system: A model for sustainability improvement. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 172, p. 266762682, 2016.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Efficiency-based rank assessment for electric power industry: A combined use of data envelopment analysis (DEA) and DEA-Discriminant Analysis (DA). **Energy Economics**, Guildford, v. 34, n. 3, p. 6346644, 2012.

TEICHGRÄBER, U. K.; DE BUCOURT, M. Applying value stream mapping techniques to eliminate non-value-added waste for the procurement of endovascular stents. **European Journal of Radiology**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 47652, 2012.

THANKI, S.; GOVINDAN, K.; THAKKAR, J. An investigation on lean-green implementation practices in indian SMEs using analytical hierarchy process (AHP) approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 135, p. 2846298, 2016.

UGARTE, G. M.; GOLDEN, J. S.; DOOLEY, K. J. Lean versus green: The impact of lean logistics on greenhouse gas emissions in consumer goods supply chains. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 22, n. 2, p. 986109, 2016.

WAN, HUNG-DA; CHEN, F. F. A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. **International Journal Of Production Research**, London, v. 46, n. 23, p. 656766584, 2008.

WEB OF SCIENCE. **Relatórios de citação**. Disponível em: <<http://apps-webofknowledge.ez87.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 05 fev. 2018

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda., 2004.

APÊNDICE A

Resultados da pesquisa na base *Web of Science* combinando as Palavras-Chave: *Lean Manufacturing* e *Quantitative* ou *Green Manufacturing* e *Quantitative* com o objetivo de identificar na literatura métodos quantitativos utilizados para avaliar a eficiência de processos de manufatura que abordam os conceitos de *Green & Lean Manufacturing*.

Quadro 2 - Pesquisa das chaves *lean manufacturing*, *green manufacturing* e *quantitative* na base *Web of Science*

Título	Objetivos	Autores	Método Quantitativo	Periódicos - Qualis
<i>Graph theoretic structural modeling based new measures of complexity for analysis of lean initiatives</i>	O objetivo deste trabalho é propor o uso de modelagem estrutural teórica de grafos para avaliar a possível redução da complexidade dos procedimentos de fluxo de trabalho em uma organização devido a iniciativas enxutas.	Singh, Varinder; Singru, Pravin M. (2018)	Modelos de teoria gráfica (Coeficientes de dissimilaridade)	<i>Journal of Manufacturing Technology Management</i> ó B2
<i>Development of an integrated performance measurement framework for lean organizations</i>	O objetivo deste artigo é propor uma estrutura integrada de medição de desempenho para medir o efeito da implementação enxuta em todas as funções de uma organização.	Sangwa, Narpal Ram; Sangwan, Kuldip Singh (2018)	Indicador (KPIs)	<i>Journal of Manufacturing Technology Management</i> ó B2
<i>Strategic and operational objectives and decisions as support for lean manufacturing</i>	O objetivo deste estudo é identificar mecanismos de coordenação entre ferramentas de fabricação enxuta e estratégia de operações.	Marulanda Grisales, Natalia; González Gaitán, Henry Heli (2017)	Escala Likert e análise estatística de correlação	<i>Suma de Negocios</i> ó Não Classificado
<i>Conceptions and operational use of value and waste in</i>	Neste artigo, o objetivo foi explorar como os principais conceitos de manufatura enxuta, valor, agregação de	Johansson, Peter E. e Osterman, Christer	Método misto (Quali- Quantitativo)	<i>International Journal of Production Research</i> - A2

Título	Objetivos	Autores	Método Quantitativo	Periódicos - Qualis
<i>lean manufacturing - an interpretivist approach</i>	valor e desperdício são utilizados pelos formadores <i>Lean</i> nos processos de trabalho operacional.	(2017)		
<i>Lean manufacturing implementation, context and behaviors of multi-level leadership A mixed-methods exploratory research</i>	O objetivo deste artigo é examinar empiricamente a relação entre a orientação comportamental de líderes de diferentes níveis hierárquicos e a fase de implementação do roteiro de manufatura enxuta (LM).	Tortorella, G.; Fettermann, D.; Anzanello, M.; Sawhney, R. (2017)	Método misto (Quali- Quantitativo)	<i>Journal of Manufacturing Technology Management</i> ó B2
<i>Application of quantitative and qualitative methods for determination of priority development directions of companies implementing lean manufacturing</i>	O objetivo é explorar os processo de hierarquia analítica e o envolvimento de especialistas de vários serviços na tomada de decisões gerenciais com relação à determinação das direções de desenvolvimento e tornar o processo objetivo ao máximo.	Shtefan, YG; Zimakova, LA; Kovalenko, SN; Peresykina, N N (2017)	Métodos qualitativos e quantitativos	<i>Journal of Fundamental and Applied Sciences</i> - Não Classificado
<i>Quantitative analysis of Six Sigma, Lean and Lean Six Sigma research publications in last two decades</i>	O objetivo deste trabalho é estender estudos anteriores para uma análise híbrida de três práticas de melhoria de negócios de <i>Lean</i> , <i>Six Sigma</i> e <i>Lean Six Sigma</i> (LSS) nas últimas duas décadas e identificar as lacunas de pesquisa e enfoca uma classificação mais abrangente e robusta. estrutura.	Shokri, Alireza (2017)	A análise de frequência /distribuição e teste <i>Pearson</i>	<i>International Journal of Quality & Reliability Management</i> - Não Classificado
<i>Criteria for a lean organisation: development of a lean assessment tool</i>	O método difuso permite que os gerentes identifiquem as necessidades de melhoria na implementação enxuta e o uso de gráficos de radar permite uma visão imediata e abrangente de áreas	Pakdil, Fatma e Leonard, Karen Moustafa (2014)	Método fuzzy e uma ferramenta abrangente chamada de <i>leanness assessment tool</i> (LAT) é desenvolvida, usando abordagens quantitativas (diretamente mensuráveis e objetivas) e	<i>International Journal of Production Research</i> - A2

Título	Objetivos	Autores	Método Quantitativo	Periódicos - Qualis
	fortes e aquelas que precisam ser melhoradas.		qualitativas (percepções de indivíduos) para avaliar a implementação enxuta	
<i>Improving quality and productivity at an automotive component manufacturing organisation in Durban South Africa</i>	O objetivo deste estudo foi identificar os pontos fortes e fracos do atual processo de manufatura enxuta na melhoria da qualidade e produtividade.	Raveen Rathilall e Shalini Singh (2011)	Foi realizado um estudo empírico, utilizando um questionário de pesquisa com um <i>ranking</i> de escore de avaliação.	<i>African Journal of Business Management</i> 6 C
<i>A survey of structured continuous improvement programs in the Canadian food sector</i>	Este artigo apresenta os resultados de uma pesquisa quantitativa de programas de melhoria contínua estruturados no setor de alimentos canadense, incluindo os fatores motivacionais subjacentes à implementação de tais programas.	Bradley S. Scott; Anne E. Wilcock e Vinay Kanetkar (2009)	<i>Survey</i> com 22 questões e Análise Estatística	<i>Food Control</i> - A1
<i>Process improvement: performance analysis of the setup time reduction-SMED in the automobile industry</i>	Investigar a relação entre a metodologia SMED e o projeto de equipamento, indicar se o SMED, em outras palavras, "troca rápida" ainda é um método adequado não apenas para a melhoria da fabricação, mas também para o desenvolvimento de projetos de equipamentos / matrizes.	Mehmet Cakmakci (2009)	Análise Estatística; para fornecer uma medida quantitativa do projeto do equipamento aplicando a metodologia SMED na fabricação de automóveis, o índice C (pk) foi usado.	<i>International Journal Of Advanced Manufacturing Technology</i> - B1
<i>A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives</i>	Este artigo propõe uma medida de medida enxuta invariante de unidade com um <i>benchmark</i> independente para quantificar o nível de medida enxuta dos sistemas de manufatura.	Hung-Da Wan e F. Frank Chen (2008)	Um programa linear baseado em medida baseada em folgas (SBM); DEA.	<i>International Journal of Production Research</i> - A2
<i>Application of mahalanobis distance as a lean assessment</i>	Neste artigo, uma metodologia complementar é proposta para auxiliar as ferramentas de avaliação enxuta	Jayanth Srinivasaraghava e Venkat Allada	<i>Mahalanobis Taguchi System (MTS)</i> , e <i>Mahalanobis Taguchi Gram-Schmidt Method (MTGS)</i> ;	<i>International Journal of Advanced Manufacturing</i>

Título	Objetivos	Autores	Método Quantitativo	Periódicos - Qualis
<i>metric</i>	contemporâneas que fornecerão uma medida quantitativa de medida enxuta comparando outras indústrias enxutas exemplares, juntamente com indicadores específicos para melhorias com base em considerações de custo.	(2006)		<i>Technology</i> - B1
<i>Developing a Greenometer for green manufacturing assessment</i>	Nesse trabalho uma ferramenta (<i>Greenometer</i>) para avaliar o nível de « <i>greenness</i> » da produção de companhias é proposto. Essa abordagem de avaliação é baseada em construir um <i>ranking</i> de políticas verdes de uma companhia entre outras indústrias de diferentes setores assim como as do mesmo setor.	Salem e Deif (2017)	<i>Geometric Mean Method (GMM) e Data Envelopment Analysis (DEA)</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i> - A1
<i>Suppliers green performance evaluation using fuzzy extended ELECTRE approach</i>	Esse estudo avalia as performances de fornecedores baseadas em práticas de manufatura sustentável assim como as seguintes: gestão ambiental e controle de poluição, custo, qualidade, e flexibilidade usando a lógica dos conjuntos fuzzy e o método multicritério ELECTRE III. Essa abordagem ajuda os gerentes a incorporar a decisão de linguística das tomadas de decisão e converter em uma escala qualitativa.	Pravin Kumar, Rajesh Kumar Singh e Anurika Vaish (2017)	<i>Fuzzy-extended Elimination e Choice Expressing Reality approach III.</i>	<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i> - C
<i>Surface morphology analysis of Duplex Stainless Steel(DSS) in Clean Production using the Power Spectral Density</i>	O documento analisa a influência dos métodos da Produção Limpa (Produção Verde) na morfologia do aço inoxidável duplex. A qualidade da superfície foi comparada usando , Densidade Espectral de Potência para processo de	G.M. Krolczyk, R.W. Maruda, P. Nieslony e M. Wieczorowski (2016)	MQCL e Técnicas estatísticas multivariadas.	<i>Journal of the International Measurement Confederation</i> - Não Classificado

Título	Objetivos	Autores	Método Quantitativo	Periódicos - Qualis
	torneamento seco e MQCL.			
Priorização de práticas verdes em GSCM: estudo de casos com empresas da indústria do pêssego	Este artigo teve como objetivo definir prioridades para práticas verdes que são observadas nas cadeias de suprimentos da indústria do pessegueiro. O método de pesquisa é a modelagem quali-quantitativa.	Miguel Afonso Sellitto e Felipe Fehlberg Hermann (2016)	O método de pesquisa é o modelo quali-quantitativo e AHP método de análise multicriterial.	Gestão e Produção - B3
<i>Green Manufacturing : Relationship between adoption of green operational practices and green performance of brazilian ISO 9001-certified firms</i>	O presente trabalho tem como objetivo analisar como a adoção de uma gestão ambiental proativa por meio de práticas operacionais verdes (GOPs) se correlaciona com indicadores de desempenho da produção enxuta (GrP) de um determinado conjunto de empresas certificadas pela norma ISO 9001 no Brasil.	Davi Fouad Soubihia, Charbel José Chiappetta Jabbour, e Ana Beatriz Lopes de Sousa Jabbour (2015)	Ferramentas estatísticas como análise descritiva, análise de correlação e <i>Structural Equation Modeling</i> (SEM).	<i>International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology - A2</i>
<i>Environmental impact assessment in an uncertain environment</i>	Este trabalho centra-se na análise da incerteza dos fatores de ponderação em uma avaliação de impacto ambiental e na aplicação da teoria dos conjuntos « fuzzy » para determinar os fatores de ponderação vagos ou « fuzzy » das várias categorias de impacto ambiental	Hui, IK; He, L e Dang, C (2002)	O modelo difuso foi baseado em conjunto que pode efetivamente dar conta da imprecisão e incerteza da informação que está sendo usada para avaliações de impacto ambiental.	<i>International Journal of Production Research - A2</i>

Fonte: Produção de próprio autor.