

GABRIEL DA SILVA SILVEIRA

Análise envoltória de dados multicritério na avaliação da eficiência de centros de distribuição no processo de entrega de produtos aos pontos de venda

Gabriel da Silva Silveira

Análise envoltória de dados multicritério na avaliação da eficiência de centros de distribuição no processo de entrega de produtos aos pontos de venda

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

S587a	<p>Silveira, Gabriel da Silva</p> <p>Análise envoltória de dados multicritério na avaliação da eficiência de centros de distribuição no processo de entrega de produtos aos pontos de venda / Gabriel da Silva Silveira – Guaratinguetá, 2020. 58 f : il. Bibliografia: f. 53-57</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva</p> <p>1. Processo decisório por critério múltiplo. 2. Cadeia de logística integrada. 3. Gestão da qualidade. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 65.012.4</p>
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

GABRIEL DA SILVA SILVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. Andreia Maria Pedro Salgado
Coordenador

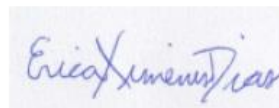
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
UNESP-FEG



Prof. Dr. Erica Ximenes Dias
Membro Externo

DADOS CURRICULARES

GABRIEL DA SILVA SILVEIRA

NASCIMENTO 30.01.1997 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO José Carlos Alves da Silveira
Eliene Pereira da Silva Silveira

dedico este trabalho
a minha mãe (in memoriam) e ao meu pai pelo
amor, luta e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

A meus pais José e Eliene, que foram meu primeiros professores e amigos, que dividiram momentos bons e ruins, mas sempre me apoiaram nas minhas decisões e me orientaram para me colocar no caminho correto quando necessário.

Aos meus amigos Enzo, Marco, Matheus e Pedro por todo o tempo de diversão, noites de estudo e experiências marcantes, e Sthephany e Diego por todo apoio nos momentos difíceis e pelos momentos de alegria durante esses anos.

A Bruna pelo amor e confiança.

Aos meu orientador Aneirson pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e pelo ótimo professor em aulas e como orientador.

Aos meus orientadores de pesquisa Delamaro e Arminda por serem os primeiros a me darem oportunidades na faculdade e por serem pessoas incríveis.

“Enfrentar os desafios com criatividade e determinação sempre aprendendo com a jornada”

Meu propósito

RESUMO

Os desenvolvimentos em logística estão conectados com a necessidade de informação sobre a eficiência do fluxo da cadeia de valor para a tomada de decisão e faz parte desse fluxo a distribuição de produtos dos centros de distribuição aos clientes e pontos de venda. Executar essa atividade de forma eficiente resulta em melhores retornos às empresas, devido à redução de custos fixos e variáveis das operações. Para analisar o contexto atual e, definir quais são os centros de distribuição eficientes, este trabalho utilizou o novo modelo MCDEA para avaliá-los e definir se são eficientes, identificar os parâmetros relevantes para cada um deles e classificá-los de acordo com a sua eficiência utilizando o método de supereficiência proposto pelo novo MCDEA. A aplicação foi feita em uma empresa multinacional de bens de consumo. Para o estudo foram selecionadas as operações de cinco Centros de Distribuição CDs para quatro meses ao longo do ano, a fim de avaliar como a sazonalidade afeta a eficiência. Os parâmetros de entrada e saída utilizados nas análises foram definidos junto aos especialistas da empresa. Feito isso, observou-se que os quatro CDs que foram eficientes, tiveram suas operações nos meses de maior volume, três nos meses de verão e um no mês de inverno, porém que historicamente sofre um aumento de volume. Por fim, foi possível determinar as DMUs eficientes, os parâmetros relevantes para cada DMU e como a sazonalidade interfere nesse indicador.

PALAVRAS-CHAVE: Análise envoltória de dados de critérios múltiplos critérios. MCDEA. Centros de distribuição. Distribuição de produtos

ABSTRACT

The developments in logistics relate to the need for information on the efficiency of the value chain flow for decision making and the distribution of products from distribution centers to customers (points of sale) is part of this flow. Performing this activity efficiently results in better returns to companies, due to the reduction of fixed and variable costs of operations. To analyze the current context and define which are the efficient distribution centers, this work used the new MCDEA model to evaluate them and define whether they are efficient, identify the relevant parameters for each one and classify them according to their efficiency. using the super-efficiency method proposed by the new MCDEA. The application was made in a multinational consumer goods company. For the study, the operations of five CDs for four months throughout the year were selected to assess how seasonality affects efficiency. The inputs and outputs parameters used in the analyzes were defined with the company's specialists. That done, it was observed that the four CDs that were efficient, had their operations in the months of greatest volume, three in the summer months and one in the winter month, but that historically suffers an increase in volume. Finally, it was possible to determine which DMUs are efficient, the relevant parameters for each DMU and how seasonality affects this indicator.

KEYWORDS: Multiple Criteria Data Envelopment Analysis. MCDEA. Distribution Centers. Products Distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras chaves para o primeiro conjunto	17
Figura 2 – Publicações por ano (1999 - 2021) “ <i>Multiple Criteria Data Envelopment Analysis</i> ” ou “ <i>Multi-Criteria Data Envelopment Analysis</i> ” ou “ <i>MCDEA Model</i> ” .	18
Figura 3 – Artigos mais citados (1999-2021)	19
Figura 4 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras chaves para o segundo conjunto	20
Figura 5 – Publicações por ano (1999-2021) para o segundo conjunto de palavras chave	21
Figura 6 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras chaves para o terceiro conjunto	21
Figura 7 – Publicações por ano (1999-2021) para o terceiro conjunto de palavras chave	22
Figura 8 – Abordagem metodológica	25
Figura 9 – Publicações por ano para os conjuntos 1 e 2 de palavras-chave (1990 – 2021)	28
Figura 10 – Configuração de elementos que compõem a cadeia de suprimento	30
Figura 11 – Cadeia de distribuição: principais componentes, fluxos e terminologias	31
Figura 12 – Projeção dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> para o exemplo de DEA CCR	35
Figura 13 – Projeção dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> para o exemplo de DEA-VRS	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relatório de publicações e citações da Scopus para o período de 1999-2021.....	16
Tabela 2 – Relatório de publicações da Scopus para o período de 1963-2021	27
Tabela 3 – As 10 melhores economias segundo o relatório <i>LPI</i>	29
Tabela 4 – <i>Input</i> , <i>Output</i> e eficiência para as DMUs do exemplo proposto.....	34
Tabela 5 – <i>Input</i> , <i>Output</i> e eficiência para as DMUs do exemplo proposto – DEA VRS	36
Tabela 6 - <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> coletados para cada DMU	46
Tabela 7 – Eficiência das DMUs	47
Tabela 8 – Classificação das DMUs pelo método de Supereficiência	48
Tabela 9 – Parâmetros (<i>inputs</i> e <i>outputs</i>) relevantes para as DMUs	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> selecionados como parâmetros.....	455
---	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	15
1.3	QUESTÕES DA PESQUISA E OBJETIVOS	23
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	23
1.5	MATERIAIS E MÉTODOS	24
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	LOGÍSTICA, DISTRIBUIÇÃO E SUPPLY CHAIN	27
2.1.1	<i>Supply Chain Management</i>	29
2.1.2	Processo de distribuição e centros de distribuição	31
2.2	ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS	32
2.2.1	DEA – CRS ou DEA – CCR	33
2.2.2	DEA – VRS ou DEA – BCC	35
2.2.3	MCDEA – <i>Multiple Criteria Data Envelopment Analysis</i>	36
2.2.4	Modelo ponderado Bi-Objetivo (BiO – MCDEA)	38
2.2.5	Modelo Ponderado Bi-Objetivo Estendido	39
2.2.6	Modelo de Programação por Meta ponderada (WGP – MCDEA – CCR)	40
2.2.7	Novo modelo MCDEA	41
2.2.8	Novo modelo MCDEA com supereficiência	42
3	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA	43
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	43
3.2	MODELAGEM DO PROBLEMA	44
3.2.1	Seleção dos centros de distribuição (DMUs)	44
3.2.2	Definir os <i>Inputs e Outputs</i>	44
3.2.3	Desenvolver a matriz de <i>Inputs e Outputs</i>	45
3.2.4	Seleção do modelo MCDEA	47
3.2.5	Determinar a eficiência por meio do novo modelo MCDEA	47
3.2.6	Determinar quais são as variáveis mais importantes para cada DMU	48
3.2.7	Discussão dos resultados	50
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	51
4.1	RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DE PESQUISA E VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	51

4.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	51
4.3	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Recentemente, muitos dos desenvolvimentos em logística estão conectados com a necessidade de informação sobre a eficiência do fluxo da cadeia de valor (SYARIF; YUN; GEN, 2002). Parte dessa eficiência está relacionada em determinar os melhores armazéns, tornando esses elementos que fazem parte da distribuição física dos produtos importantes nas operações das empresas (AMIRI, 2006). Assim, como os armazéns, os centros de distribuição tem as funções de armazenar e transferir produtos e matérias primas, consumindo recursos como veículos e motoristas/hora, combustível e capacidade de armazenamento em cada container (FRAZELLE, 2002).

De acordo com Andrejić, Bojović e Kilibarda (2013), para uma empresa sobreviver no mercado e obter lucros é necessário que a mesma desenvolva suas atividades de forma eficiente, mas medir, monitorar e aumentar a eficiência são atividades trabalhosas devido as complexas estruturas logísticas.

A literatura associada à obter a eficiência/produzitividade é vasta e quando relacionada com centros de distribuição alguns temas se relacionam mais, como simulação por computador, modelos matemáticos e a análise envoltória de dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*) (LI; RU; HAN, 2013). No DEA (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), estuda-se um conjunto de unidades tomadoras de decisão, tradução do termo DMUs (*Decision Make Units*), com o objetivo de determinar quais são eficientes (COOK; SEIFORD, 2009). As unidades tomadoras de decisão avaliadas são comparadas com relação aos mesmos *inputs* e *outputs*.

Os modelos precursores do DEA, são DEA com retorno constante de escala, *Constant Return Scale* (CRS), DEA-CRS (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), e o DEA com retorno variável de escala, *Variable Return Scale*, DEA-VRS (BANKER; CHARNES; COOPER, 1984), também são classificados respectivamente, como *Charnes, Cooper and Roodes* (CCR), *DEA-CCR*, e *Banker, Charnes and Cooper* (BCC), DEA – BCC (COOK; SEIFORD, 2009). Para garantir que os modelos, DEA-CRS e DEA-VRS, discriminem adequadamente as DMUs como eficientes, é imprescindível que a regra de ouro, *Golden Rule* (BANKER et al., 1989), seja respeitada.

A regra de ouro (BANKER et al., 1989), comede uma relação entre a quantidade de *inputs* e *outputs* e um mínimo de DMUs. Define-se o critério, no qual a quantidade de DMUs deve ser maior ou igual, a três vezes a soma da quantidade de *inputs* e *outputs* considerados na análise,

ou o produto dos *inputs* e *outputs*, considerando o critério que resulta no maior número DMUs, como mostra a expressão (1):

$$j \geq \max\{3 \cdot (m + s), m \cdot s\} \quad (1)$$

o índice j representa o número de DMUs, m a quantidade de *inputs* e s quantidade de *outputs* utilizados no estudo.

De acordo com Tolo e Tichý (2015), quando os critérios não são atendidos, a maioria das *DMUs* observadas serão consideradas eficientes e isso impede a obtenção de resultados confiáveis.

Para solucionar o baixo poder de discriminação, quando os critérios da regra de ouro (BANKER et al., 1989) não forem atendidos e para corrigir a distribuição de pesos irreal, Li e Reeves (1999) propõem o modelo DEA com múltiplos critérios, do termo em inglês *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis model* (MCDEA), e por sua vez, Hatami-Marbini e Toloo (2017) desenvolveram uma versão estendida do MCDEA (LI; REEVES, 1999), que lida com ambos os problemas dando ênfase nas restrições de pesos, considerando um limite inferior ótimo para os pesos dos *inputs* e *outputs*, quando esses não estão disponíveis. Diversos pesquisadores adaptaram o DEA para lidarem com esses problemas (HATAMI-MARBINI; TOLOO, 2017).

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Nesse contexto, foram pesquisadas combinações de palavras, termos e siglas na base Scopus, conforme representado na Tabela 1, onde encontra-se um resumo dos resultados com as combinações e as quantidades de publicações de 1999 a 2021.

Tabela 1 – Relatório de publicações e citações da Scopus para o período de 1999-2021

Palavras-Chaves	Quantidade de publicações	Quantidade de citações
<i>"Multiple criteria Data Envelopment analysis" ou "Multi-Criteria Data Envelopment Analysis" ou "MCDEA Model"</i>	35	767
<i>"DEA" ou "Data envelopment Analysis" e "Distribution Center"</i>	30	323
<i>"Distribution center" e "Efficiency"</i>	705	5.488
<i>"Distribution centre" e "Efficiency"</i>	705	5.488
<i>"Distribution centre" ou "Distribution center" e "Efficiency"</i>	705	5.488
<i>"Multiple criteria Data Envelopment analysis" e "MCDEA"</i>	13	466
<i>"Multiple criteria Data Envelopment analysis" e "Distribution center"</i>	0	0
<i>"Multiple criteria Data Envelopment analysis" e "Distribution centre"</i>	0	0

Fonte: Scopus (2021).

A primeira análise foi realizada com os seguintes grupos de palavras-chaves “DEA” e “Data Envelopment Analysis” e “Distribution Center”; “Distribution Center” e “Data Envelopment Analysis”; “Distribution Center” e “Multi-Criteria Data Envelopment Analysis”; “Distribution Center” e “MCDEA”. Para esses conjuntos que relacionam a análise envoltória de dados com centro de distribuição, foram encontrados poucos estudos com sua primeira publicação no ano de 2002, porém ao agrupar a análise envoltória de dados multicritérios e centros de distribuição não foi encontrado nenhum resultado, ou seja, é um campo pouco explorado e com oportunidades de pesquisa.

A partir da síntese das buscas realizadas na base de dados Scopus, foram analisados três grupos de palavras-chaves usando duas ferramentas o Scopus e o programa VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

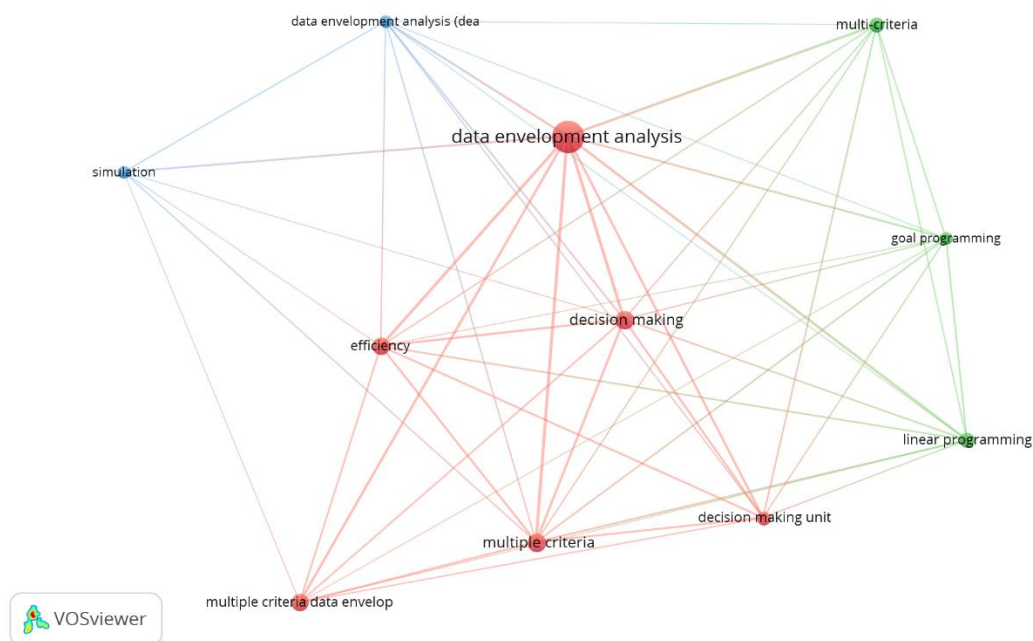
1. "*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*" ou "*Multi-Criteria Data Envelopment Analysis*" ou "*MCDEA Model*"
2. "*DEA*" ou "*Data envelopment Analysis*" e "*Distribution Centre*"
3. "*Distribution center*" e "*Efficiency*"

O VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010) é uma ferramenta de criação e visualização de mapas bibliométricos, que permite o uso dos resultados obtidos na base de dados Scopus e em outras bases configurados no formato CSV.

O programa permite criar a *Label view*, essa visualização faz uma conexão entre entidades que mudam de acordo com o seu tipo de análise, como palavras-chave e autores que são representados por círculos de diferentes tamanhos refletindo suas ocorrências nos artigos incluídos na análise, ou seja, quanto mais a palavra-chave for usada, maior será o diâmetro da sua representação e o VOSviewer faz uma representação por cores separando os dados em clusters (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

Essa aplicabilidade foi utilizada para construção do mapa bibliométrico, conforme ilustrado pela Figura 1, com base na coocorrência mínima de 5 vezes para todas as palavras chaves do primeiro conjunto de palavras, "*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*" ou "*Multi-Criteria Data Envelopment Analysis*" ou "*MCDEA Model*", para os artigos publicados de 1999 a 2021.

Figura 1 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras chaves para o primeiro conjunto

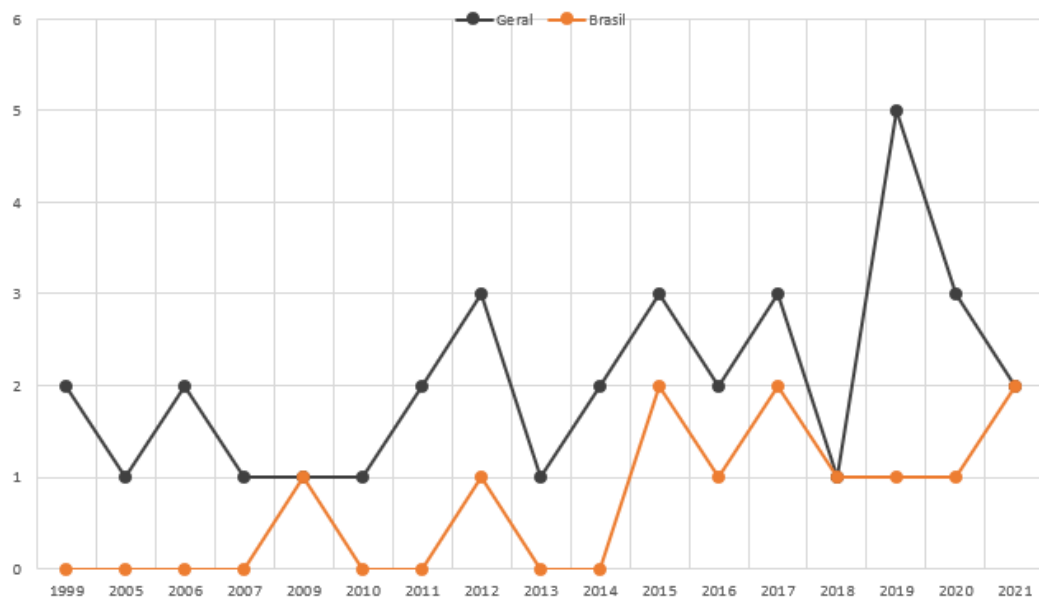


Fonte: VOSviewer e Scopus (2021).

O mapa da Figura 1 destaca a utilização do método para tomada de decisão e determinar a eficiência que é função dos modelos DEA (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978) e MCDEA (BANKER et al., 1989). Além do mais, essa visão traz em destaque a palavra-chave “*Data Envelopment Analysis*”, mostrando sua importância, uma vez que, os modelos de análise envoltória de dados com critérios múltiplos foram originados a partir do DEA (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978).

Para a análise no Scopus, os dados foram restringidos da mesma forma para um período de 1999 a 2021 como mostra a Figura 2, os 35 artigos publicados foram distribuídos em um gráfico de linha mostrando a evolução de publicações ao longo dos 23 anos analisados para nível geral e Brasil.

Figura 2 – Publicações por ano (1999 - 2021) “Multiple Criteria Data Envelopment Analysis” ou “Multi-Criteria Data Envelopment Analysis” ou “MCDEA Model”.



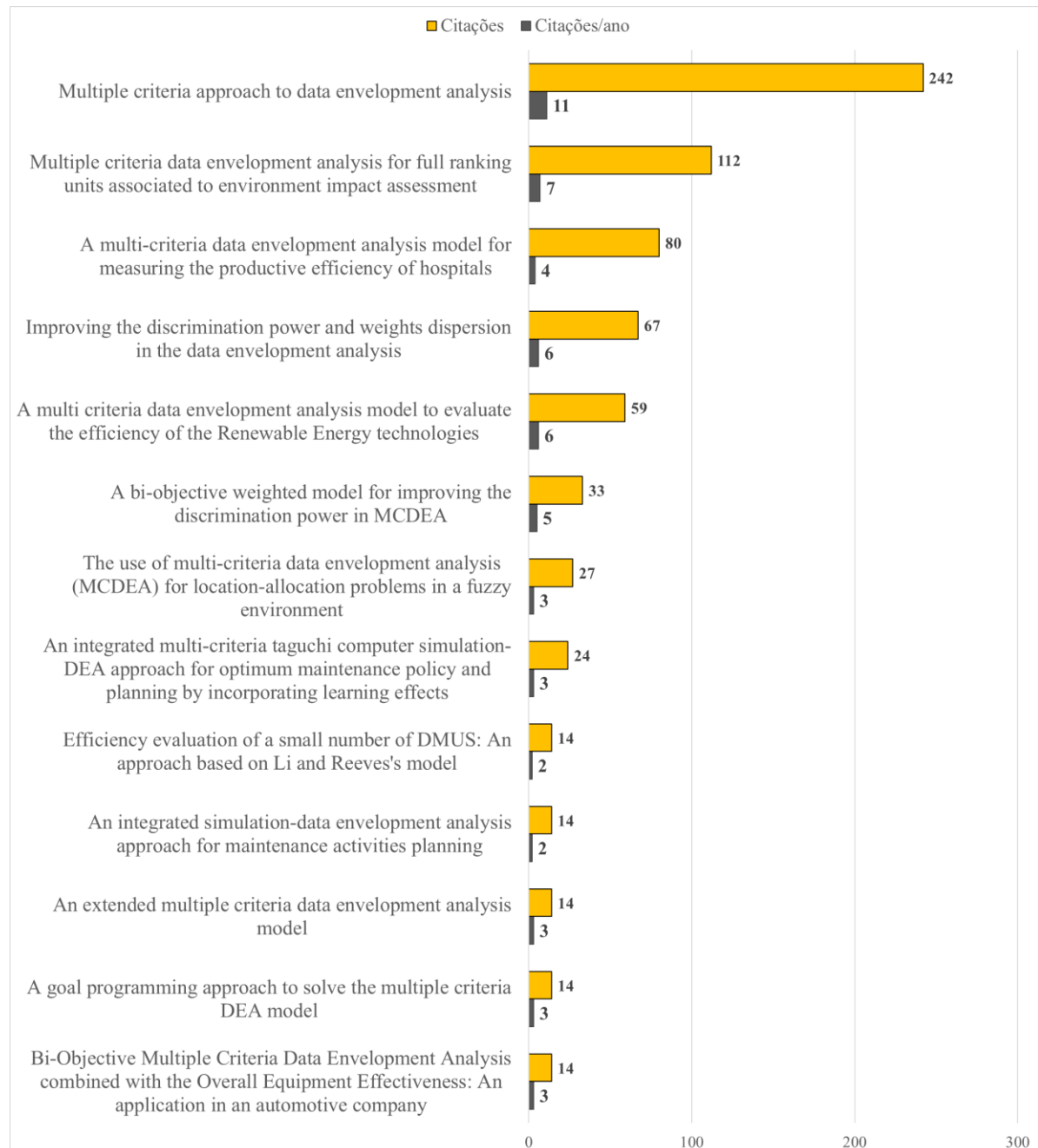
Fonte: Scopus (2020).

Observa-se que para o período analisado mais de 60% dos artigos foram publicados em um período de 5 anos (2014 - 2021) e desse resultado aproximadamente 50% são publicações brasileiras, o que mostra um aprofundamento teórico e uma participação significativa dos pesquisadores brasileiros em publicações de estudos relacionados ao tema.

A Figura 3 contempla os artigos mais publicados avaliando o período de 1999 a 2021, considerando o primeiro conjunto de palavras que estão ligadas ao MCDEA. Os dados foram analisados no SciMAT (COBO et al., 2013) que é uma ferramenta *open-source* para análise bibliométrica de dados. Ela possibilita o gerenciamento e análise dos dados bibliográficos

(COBO et al., 2013) e os resultados destacam o artigo “*Multiple Criteria Approach to Data Envelopment Analysis*” (LI; REEVES, 1999), como o mais citado com 242 citações e com média de 11 citações por ano, já que os autores são os precursores dos estudos relacionados ao tema.

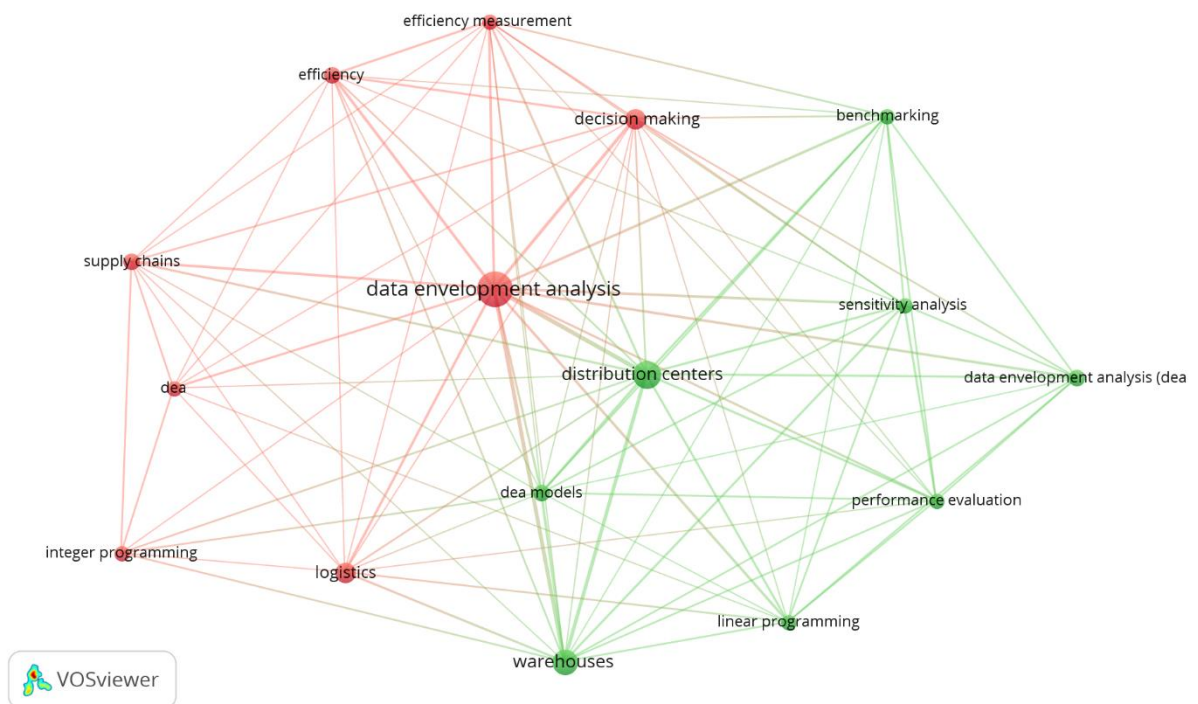
Figura 3 – Artigos mais citados (1999-2021)



Fonte: SciMAT e Scopus (2021).

Para o segundo conjunto de palavras que estão relacionadas a aplicação do modelo DEA (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), *Data Envelopment Analysis*, para avaliar a eficiência de centros de distribuição, aplicou-se restrições no VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010) para a construção do mapa de coocorrência de palavras-chaves, no qual foram consideradas aquelas com frequência de no mínimo quatro, isso para melhor ajuste e diferenciação dos *clusters* como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras chaves para o segundo conjunto

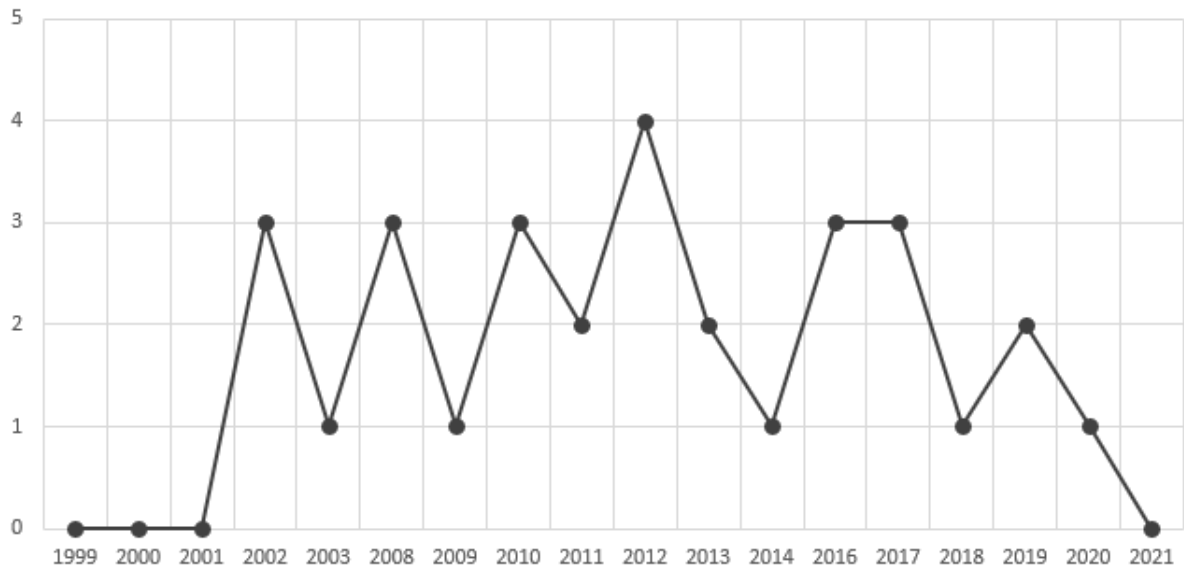


Fonte: VOSviewer e Scopus (2021).

A partir da Figura 4 é visível que os dois temas centrais são os focos de cada *cluster*, *Data Envelopment Analysis* e *Distribution Centers*, o primeiro evidencia a função do modelo de medir a eficiência das DMUs observadas e está associado a dois pilares de estudos, logística e cadeia de suprimento.

Já o segundo *cluster* apresenta associação dos modelos DEA na validação do desempenho dos centros de distribuição e armazéns. A análise realizada no Scopus mostra que os estudos associados a medir a eficiência de centros de distribuição utilizando os modelos de análise envoltória de dados iniciaram em 2002, como mostra a Figura 5, e até 2021 trinta estudos foram publicados sendo nenhum deles de pesquisadores brasileiros.

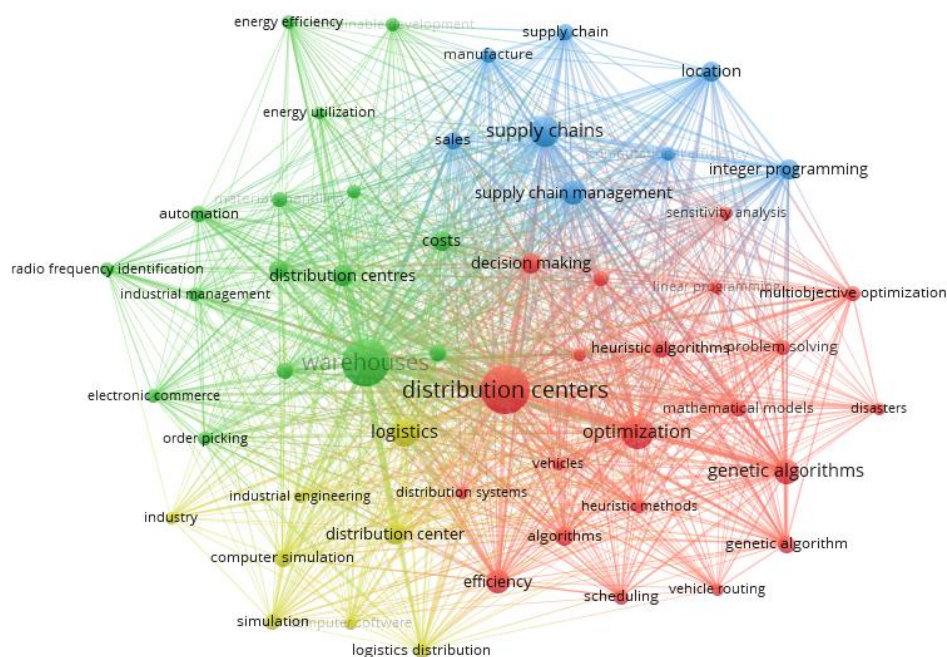
Figura 5 – Publicações por ano (1999-2021) para o segundo conjunto de palavras chave



Fonte: Scopus (2021).

Para o terceiro conjunto, como o tema selecionado é muito amplo, ao construir o mapa bibliométrico no VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010) foi necessário utilizar palavras com coocorrência mínima de 15 vezes, o que permitiu uma visualização mais clara das informações como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras chaves para o terceiro conjunto

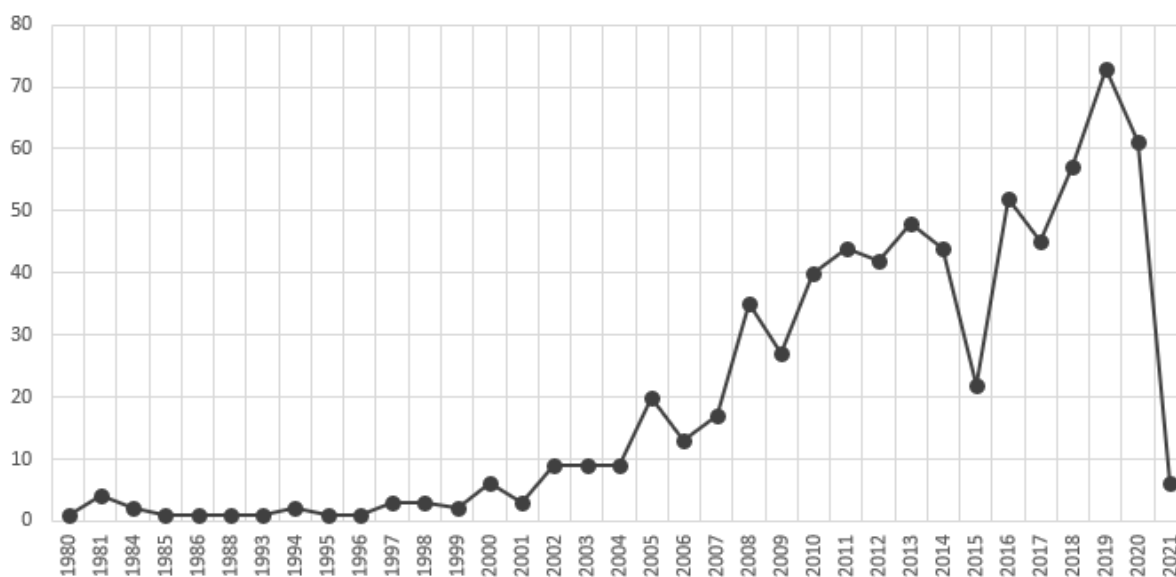


Fonte: VOSviewer e Scopus (2021).

Feito isso, nota-se formação de quatro cluster nos quais os dois de maior destaque são relacionados aos centros de distribuição e armazéns, interligados com ferramentas e temas, como *Data Envelopment Analysis* (DEA) (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), modelos matemáticos, simulação e eficiência.

A ausência do modelo MCDEA (BANKER et al., 1989) para determinar a eficiência dos CDs e armazéns, tanto no mapa bibliométrico do terceiro conjunto, quanto no número de publicações associado ao tema, "*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*" e "*Distribution Center*", apresentado na Tabela 1, indicam um tema pouco explorado e com oportunidade de pesquisas, assim esse estudo pretende preencher essa oportunidade. O gráfico da quantidade de publicações por ano de 1980 a 2021, mostrado na Figura 7, apresenta uma curva do crescimento de estudos publicados sobre o tema de eficiência de centros de distribuição evidenciando a relevância do assunto para a comunidade científica.

Figura 7 – Publicações por ano (1980-2021) para o terceiro conjunto de palavras chave



Fonte: Scopus (2021).

O objetivo da análise foi apresentar o cenário dos estudos relacionados com a pauta desta pesquisa, onde foi possível ver a curva de evolução das publicações dos principais temas relacionados e a participação à nível Brasil, concluindo que o país muito contribui para o tema relacionado ao *Multi- Criteria Data Envelopment Analysis* (MCDEA) (BANKER et al., 1989).

Os resultados na Tabela 1, indicam oportunidades de pesquisas com uso de modelos MCDEA para determinar a eficiência de centros de distribuição, uma vez que nenhuma publicação foi encontrada e a Figura 7 mostra um aumento na quantidade de estudos relacionados a eficiência e centro de distribuição de 1980 a 2021, apontando uma tendência para essa temática.

Dos artigos recentemente publicados sobre MCDEA, destaca-se o estudo *Improving the Discrimination power with a new Multi-Criteria Data Envelopment model*, (SILVA; MARINS; DIAS, 2020), com foco em propor um novo modelo MCDEA com maior poder de discriminação, mantendo a dispersão de pesos estatisticamente igual aos outros modelos MCDEA e propõe a identificação dos *inputs* e *outputs* mais importantes para o problema. Assim, o modelo proposto por Silva, Marins e Dias (2020) será usado para o presente estudo, uma vez que traz uma abordagem atualizado sobre o tema.

1.3 QUESTÕES DA PESQUISA E OBJETIVOS

Com base nos itens anteriores, as seguintes questões de pesquisas foram definidas:

- Quais são os centros de distribuição classificados pelo novo modelo MCDEA como eficientes na entrega de produtos para os clientes (pontos de venda)?
- Quais são os *inputs* e *outputs* mais relevantes para as DMUs?

Objetivo geral: Avaliar a eficiência de centros de distribuição na entrega de produtos para os clientes (pontos de venda) com a utilização de um modelo MCDEA.

Objetivos específicos:

- Determinar quais são os centros de distribuição eficientes.
- Identificar quais são os *inputs* e os *outputs* mais relevantes.
- Verificar se há mudança na eficiência dos centros de distribuição na virada de plano verão-inverno.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Como mencionado no item 1.2, o atual estudo tem o propósito de aplicar o novo modelo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) para análise da eficiência de centros de distribuição no processo de entrega de produtos aos pontos de venda. O modelo foi escolhido, porque além de ser o mais atual, ele traz vantagens em relação aos modelos propostos anteriormente por (LI; REEVES, 1999), (GHASEMI; IGNATIUS; EMROUZNEJAD, 2014), (HATAMI-MARBINI; TOLOO, 2017) e (RUBEM; MELLO; MEZA, 2017).

Um dos ganhos é conseguir determinar quais são os *inputs* e *outputs* mais importantes para o problema (SILVA; MARINS; DIAS, 2020), assim como mencionado por Andrejić, Bojović e Kilibarda (2013), que para ter êxito na validação da eficiência dos centros de distribuição, torna-se necessário escolher os indicadores que melhor descrevem os CDs.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Miguel et al. (2018), a pesquisa científica é um estudo minucioso com objetivo de resolver um problema recorrendo a procedimentos científicos. As pesquisas podem ser diferenciadas quanto a sua abordagem, natureza, objetivos e procedimentos (MIGUEL et al., 2018). Assim, esse estudo pode ser classificado por ter uma abordagem quantitativa, que tem como suas principais características foco na dedução, confirmação, testes de hipóteses/teorias, explicações, coleta padronizada de dados e análise estatística (JOHNSON; ONWUEGBUZIE, 2004). Já, quanto a natureza é uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo solucionar um problema específico envolvendo verdades e interesses locais (MIGUEL et al., 2018), tem um objetivo empírico normativo, no qual TRIVIÑOS (2013), destaca que sua principal função é descrever com o máximo de exatidão possível os fatos e fenômenos de determinada realidade e com o meio uma pesquisa de campo, pois baseia-se pela experiência que se está sendo aplicada na investigação e é realizada exatamente no local onde são observados os fenômenos estudados.

O método de pesquisa é por simulação. A simulação usa técnicas e ferramentas computacionais para simular o funcionamento de um processo ou operação por meio de um modelo matemático existente (MIGUEL et al., 2018).

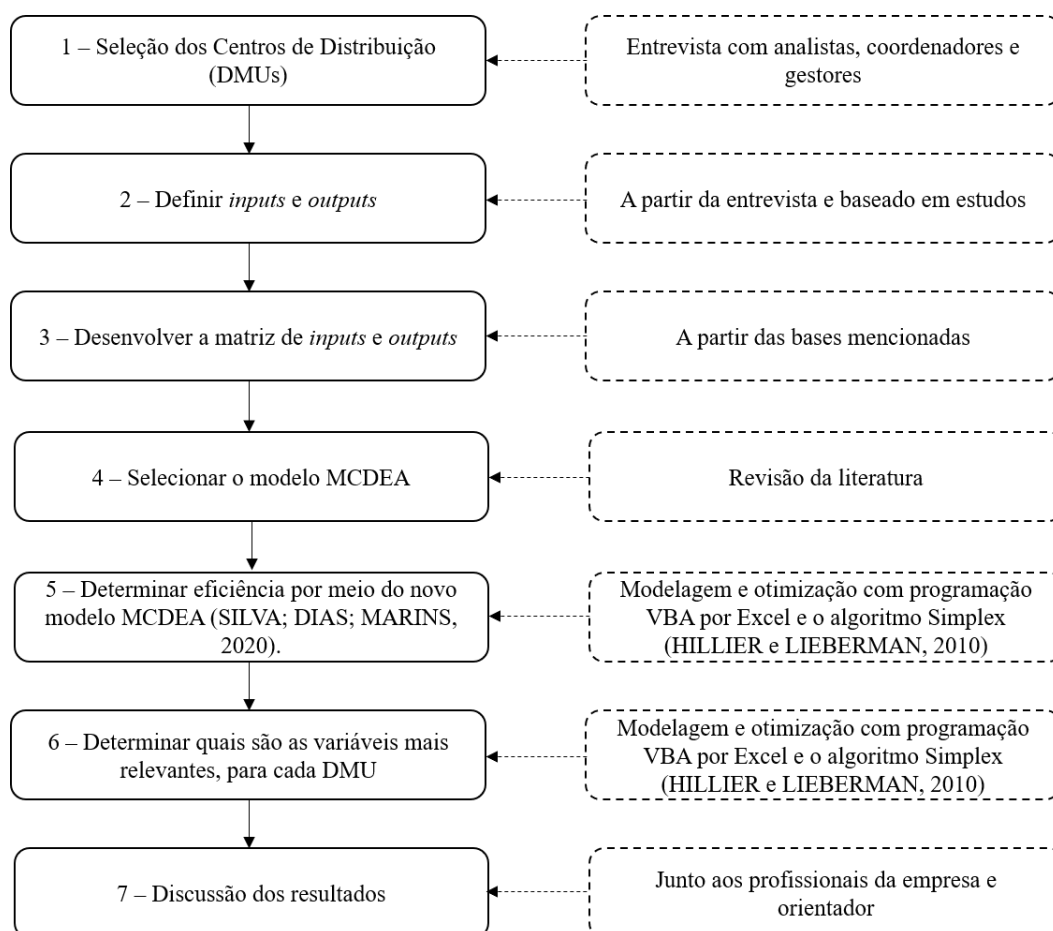
Para desenvolver essa pesquisa foi selecionado uma empresa multinacional de grande porte do ramo de bens de consumo. A escolha da empresa foi pela maior facilidade em conseguir os dados, esses são referentes a operação secundária de transporte dos produtos, entrega de produtos dos CDs aos clientes (pontos de vendas), e originam-se de duas bases que agregam essas informações, que são coletadas de dois softwares e um terceiro software foi utilizado para modelagem e simulação dos dados:

1. Programa de simulação de dados.
2. *Dashboard Power BI*.
3. Microsoft Excel 365: no qual a programação VBA, *Visual Basic for Applications*, foi utilizada para modelar o algoritmo *Simplex* (HILLIER; LIEBERMAN, 2010) para o novo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020).

Os passos e métodos que irão compor esse estudo, assim como os materiais considerados estão descritos na Figura 8.

1. Escolha dos centros de distribuição mais adequados para análise junto aos especialistas.
2. Levantamento dos *inputs* e *outputs* para a análise das DMUs, junto aos profissionais da empresa.
3. Busca dos valores das variáveis nas bases anteriormente mencionadas.
4. Selecionar o modelo mais atualizado, proposto até o primeiro semestre de 2020.
5. Modelagem e simulação do novo modelo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) por meio de VBA e algoritmo *simplex* (HILLIER; LIEBERMAN, 2010) para determinar os CDs eficientes.
6. Modelagem e simulação do novo modelo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) por meio de VBA e algoritmo *simplex* (HILLIER; LIEBERMAN, 2010) para determinar as variáveis mais importantes à análise.
7. Discussões junto aos profissionais a empresa, referente aos resultados do modelo.

Figura 8 – Abordagem metodológica



Fonte: O autor (2020).

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do primeiro Capítulo, neste estudo existem outros três. No Capítulo 2 está a fundamentação teórica com temas essenciais para o entendimento desta pesquisa, sendo Logística, Distribuição e Supply Chain; Análise Envoltória de Dados (DEA); Análise Envoltória de dados multicritério (MCDEA) e os modelos derivados tanto do DEA como MCDEA.

No Capítulo 3 estão a descrição e modelagem do problema, os resultados e suas análises, por fim o Capítulo 4 apresenta as conclusões, as verificações de objetivo e recomendações para futuras pesquisas. Além dos Capítulos, existem seções de referência bibliográfica e Apêndice.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais para o estudo.

2.1 LOGÍSTICA, DISTRIBUIÇÃO E SUPPLY CHAIN

O gerenciamento logístico de acordo com *Council of Supply Chain Management Professionals*, CSCMP (2013) faz parte do gerenciamento da cadeia de suprimento com os objetivos de planejar, implementar e controlar a eficiência e eficácia de todo fluxo de armazenamento e entrega dos bens até o consumidor. Também atuando na logística reversa dos resíduos dos produtos utilizados para destina-los para reuso, reparo, remanufatura, reciclagem ou mesmo o descarte adequado desse material (AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2015).

Para Ballou (2006) logística está associada a criação de valor para o cliente e o fornecedor e cita duas variáveis importantes, tempo e lugar, relacionadas no seguinte contexto, “Produtos e serviços não têm valor a menos que estejam em poder dos clientes quando (tempo) e onde (lugar) eles pretendem consumi-los” (BALLOU, 2006).

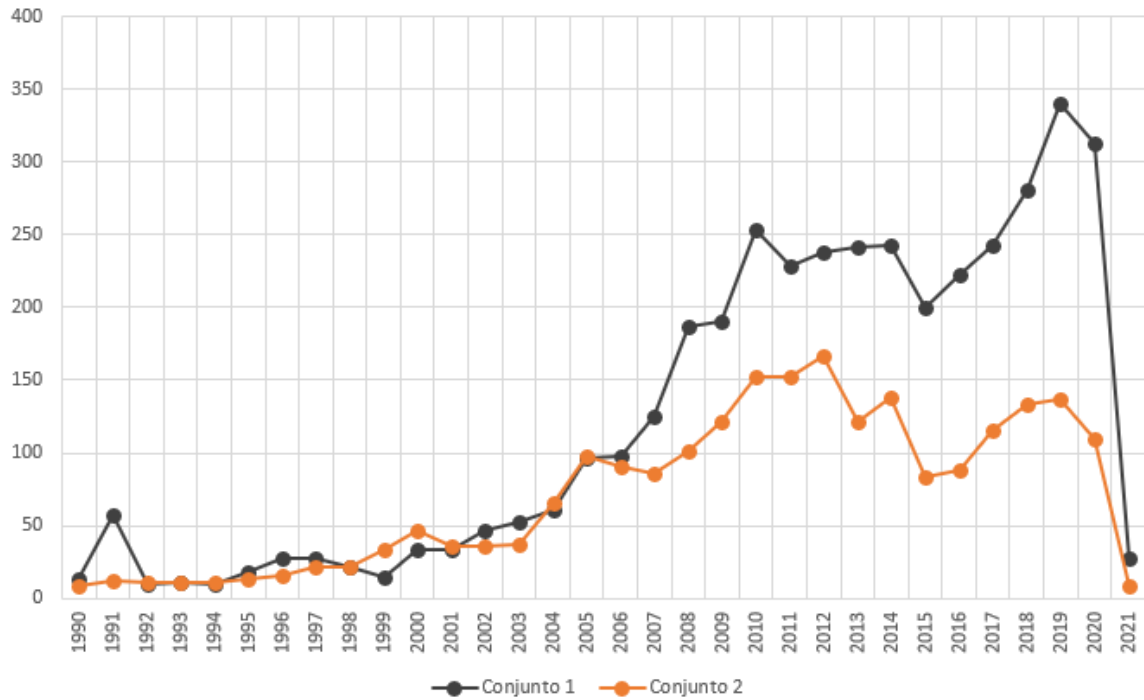
De acordo com Grawe (2009), o que viabiliza com que matéria prima e produtos sejam transportados para locais diferentes do mundo para atender a demanda de uma fábrica (onde) pontualmente (tempo) são as inovações no âmbito da logística, neste contexto, a Figura 9 mostra o aumento na quantidade de estudos publicados no período de 1990 a 2021, na qual foi estruturada a partir de dois conjuntos de palavras-chave associadas ao tema, como apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 – Relatório de publicações da Scopus para o período de 1963-2021

Conjunto	Palavras-Chave	Quantidade de publicações
1	<i>“Logistics Management” ou “Logistics Operation”</i>	4.029
2	<i>“Enterprise Logistics” ou “Distribution management”</i>	2.373

Fonte: Scopus (2021).

Figura 9 – Publicações por ano para os conjuntos 1 e 2 de palavras-chave (1990 – 2021)



Fonte: O autor (2020).

Os investimentos associados com logística representam uma porcentagem expressiva no produto interno bruto (PIB), *Gross Domestic Product* (GDP), de vários países, como o Brasil e o México que usam cerca de 14% do seu PIB com custos logísticos (RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2014).

O Banco Mundial, *The World Bank*, no relatório *Logistics Performance Index* (LPI) (ARVIS et al., 2018) apontam que o setor logístico efetivo é reconhecido como essencial para o desenvolvimento econômico do país. O LPI (ARVIS et al., 2018) classifica os países por um score construído a partir de indicadores relacionados a eficiência do sistema logístico de cada país. A Tabela 3 traz os 10 melhores classificados de acordo com o *rank* e a evolução de seus scores desde 2012.

Tabela 3 – As 10 melhores economias segundo o relatório *LPI*

Economia	2018		2016		2014		2012	
	Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score
Alemanha	1	4,20	1	4,23	1	4,12	4	4,03
Suécia	2	4,05	3	4,20	6	3,96	13	3,85
Bélgica	3	4,04	6	4,11	3	4,04	7	3,98
Áustria	4	4,03	7	4,10	22	3,65	11	3,89
Japão	5	4,03	12	3,97	10	3,91	8	3,93
Países Baixos	6	4,02	4	4,19	2	4,05	5	4,02
Singapura	7	4,00	5	4,14	5	4,00	1	4,13
Dinamarca	8	3,99	17	3,82	17	3,78	6	4,02
Reino Unido	9	3,99	8	4,07	4	4,01	10	3,90
Finlândia	10	3,97	15	3,92	24	3,62	3	4,05

Fonte: Adaptado Logistics Performance Index (2018).

2.1.1 *Supply Chain Management*

De acordo com Cooper, Lambert e Pagh (1997) o termo *Supply Chain Management* vai além do campo da logística, integrando os processos de negócios desde o usuário final até os fornecedores de matéria prima, serviços e informação para adicionar valor para os consumidores (COOPER; LAMBERT; PAGH, 1997).

Além de cuidar do fluxo de materiais e produtos entre fornecedores, fábricas, centros de distribuição, consumidores e pós consumo, *supply chain* tem atividades de desenvolvimento de produto, compra de matéria prima e manufatura do produto (MABERT; VENKATARAMANAN, 1998). Esse fluxo é representado pela Figura 10 com a adaptação realizada por Mabert e Venkataramanan (1998) do livro publicado por Gopal e Cahill (1991) no qual os componentes tradicionais de uma cadeia de suprimento, *supply chain*, é composta por:

- **Abastecimento (*Sourcing*):** Este tem como principal ação planejar o fluxo de abastecimento das instalações e fábricas selecionando os fornecedores com o objetivo de atender a demanda da empresa por matéria prima com o menor custo operacional (GUTIERREZ; KOUVELIS, 1995).
- **Logística de entrada (*Inbound logistics*):** Processo responsável pela operação de abastecimento e distribuição de bens e materiais que serão utilizados para a manufatura dos produtos (ERNST; KAMRAD, 2000).
- **Manufatura (*Manufacturing*):** O processo no qual as matérias – primas (*inputs*) são transformadas em produtos (*output*) a partir de um fluxo operacional

composto de operadores e equipamentos (RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2014).

- **Logística de saída (*Outbound logistics*):** Já o processo de *outbound logistics* está associado a distribuição dos produtos finalizados da fábrica para os CDs e clientes (pontos de venda e consumidores) (ERNST; KAMRAD, 2000).
- **Serviço pós-venda (*After Market service*):** é o serviço especializado em garantir o cumprimento rápido do alto valor pós-venda ou no suporte aos clientes, e para esse serviço estão associados: suporte técnico e análise de falhas (RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2014)

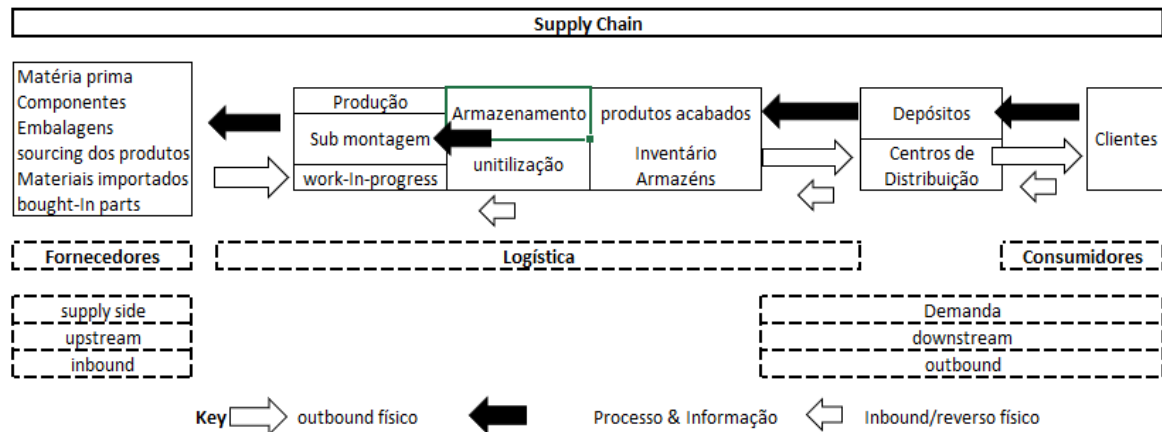
Figura 10 – Configuração de elementos que compõem a cadeia de suprimento



Fonte: Mabert; Venkataramanan (1998) adaptado de Gopal e Cahill (1991).

Rushton, Croucher e Baker (2014) trazem um fluxo com as principais partes da cadeia de suprimento e complementa com os fluxos de materiais e produtos físicos, processo/informação e o fluxo de retorno/reverso de produtos físicos, ainda faz parte desse framework a divisão dos componentes em três clusters fornecedores, logística e clientes agrupando os componentes e os fluxos mencionados, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Cadeia de distribuição: principais componentes, fluxos e terminologias



Fonte: Adaptado Rushton, Croucher e Baker (2014).

Assim, nota-se a similaridade entre os fluxos estruturados por Rushton, Croucher e Baker (2014) e a adaptação de Mabert e Venkataramanan (1998) do fluxo proposto por Gopal e Cahill (1991).

2.1.2 Processo de distribuição e centros de distribuição

A logística de transporte é um intermediário do fluxo físico de bens de consumo entre o expedidor e o consignatário, que tem como objetivo satisfazer a demanda do cliente com mais eficiência e eficácia do que seus concorrentes (LAI; NGAI; CHENG, 2002).

No processo para alcançar altos níveis de produtividade e consequentemente eficiência e eficácia muitas empresas sofrem com as pressões exercidas pelo mercado com a redução anual de seus custos de operação (LI et al., 2013).

Parte do fluxo físico de bens (LAI; NGAI; CHENG, 2002) que está relacionado a distribuição/transporte de produtos acabados dos centros de distribuição para os clientes, relaciona-se com o processo de *outsourcing* (ERNST; KAMRAD, 2000; RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2014).

Nessa etapa, a principal preocupação dos profissionais é conectar as fontes (centros de distribuição) aos clientes com o menor custo total, levando em consideração diversas variáveis, como custos de frete, combustível, mão de obra, taxas, manutenção e frota para alcançar a solução ótima (FRAZELLE, 2002).

O autor Frazelle (2002), aponta que 44% dos investimentos feitos em logística está associado a operação de transporte e é seguida pelo processo de armazenamento (*warehousing*) com 26% de participação.

Parte da responsabilidade do processo de distribuição e armazenamento está sob o centro de distribuição, como mostra as Figuras 10 e 11. Os centros de distribuição são sistemas complexos que operam com a finalidade de conectar os produtores com outros participantes da cadeia de suprimento, incluindo os usuários finais (ANDREJIĆ; BOJOVIĆ; KILIBARDA, 2013).

As principais funcionalidades dos centros de distribuição (*distribution centers*) e armazéns (*warehouses*) estão associadas ao armazenamento da produção de longas corridas de produtos, garantir que haverá produtos suficientes para atender as demandas em momentos favoráveis da sazonalidade, permite *trade-offs* de custo alocando cargas a fim de garantir máxima ocupação da frota, maior facilidade em sub dividir cargas em pedidos menores e com maior variação de produto para atender a demanda e necessidade de diferentes clientes (RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2014).

O processo de distribuição é estruturado a partir de problemas de roteirização de veículos, esses levam em considerações um grupo de restrições, como características inerentes de cada veículo, restrições relacionadas a janela de operação dos clientes, jornada de trabalho, entre outras para conseguir atender a demanda dos clientes pelo menor custo total (BAKER; AYECHHEW, 2003).

Parte desse custo está relacionado a frota exigida para a operação, logo para os modelos de distribuição é necessário considerar informações como os modelos de veículos utilizados, suas capacidades (caixa e quilos) e janelas em que esses podem operar em determinadas regiões (PISINGER; ROPKE, 2007), logo o correto dimensionamento da frota resulta em redução dos custos fixos dos carros que serão contratados e ficarão ociosos, melhoria na produtividade dos veículos com aumento da ocupação e redução em índices de retorno de mercadoria (VIS; DE KOSTER; SAVELSBERGH, 2005).

2.2 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

A análise envoltória de dados é uma metodologia para determinar a eficiência das unidades tomadoras de decisão, DMUs (*Decision Making Units*), que são os objetos de análise do DEA, podendo ser centros de distribuição, como no estudo de Ross e Droge (2002) até programas públicos (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978) para definir quais são eficientes ou não, a partir de uma análise realizada sob os mesmos *inputs* e *outputs* (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978).

Para determinar a eficiência das DMUs, as expressões (2) – (5) devem ser consideradas (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978):

$$\max \theta = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (2)$$

s.a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$u_r \geq 0; \quad r = 1, \dots, s \quad (4)$$

$$v_i \geq 0; \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

Sendo y_{rj} a r -ésima das s saídas da j -ésima DMU; x_{ij} é a i -ésima das m entradas da j -ésima DMU; $u_r \geq 0$ e $v_i \geq 0$ são as variáveis peso das saídas e das entradas, respectivamente, a serem definidas pela solução do problema. As saídas y_{r0} e as entradas x_{i0} representam os parâmetros das DMUs sob avaliação (em análise).

A eficiência θ da DMU em análise (DMU₀) é avaliada em relação aos dados das demais $j \in (1, \dots, n)$, em seguida a função de maximização irá conceder a esta DMU₀ os pesos u_r , $r \in (1, \dots, s)$ e v_i , $i \in (1, \dots, m)$ mais favoráveis permitidos pelas restrições (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978).

Desde de sua criação o DEA (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978) evoluiu tanto no âmbito teórico, como prático na aplicação de diferentes modelos em operações e ambientes distintos (COOK; SEIFORD, 2009). No artigo de Seiford (1996), o autor faz o levantamento dos artigos mais relevantes relacionados ao estudo do DEA, nos quais os três mais relevantes são: (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), (CHARNES; COOPER; RHODES, 1981) e (BANKER; CHARNES; COOPER, 1984).

Os estudos ranqueados por Seiford (1996) tratam sobre os temas: DEA CRS (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), aplicação do *DEA CRS* (CHARNES; COOPER; RHODES, 1981) e DEA VRS (BANKER; CHARNES; COOPER, 1984).

2.2.1 DEA – CRS ou DEA – CCR

O DEA – CRS, *Constant Returns to Scale*, foi o modelo inicial proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) que consiste em um modelo não linear e não convexo para análise da eficiência de DMUs apresentado nas expressões de (2) a (5).

Charnes, Cooper e Rhodes (1978) propuseram uma extensão do modelo CRS, no qual o modelo foi reduzido de não linear para linear, adaptando-o assim para computadores e possibilitando a tratativa de um conjunto de dados muito maior, como mostram as equações (6) – (10).

$$\max \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (6)$$

s.a.:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

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

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

O DEA – CRS (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978) é conhecido também como *DEA-CCR*, a sigla refere-se aos criadores do modelo CRS Charnes, Cooper e Rhodes (COOK; SEIFORD, 2009).

Cook e Seiford (2009) exemplificam a utilização do modelo DEA CCR orientado para *input* por meio de um exemplo simples composto por um *input* e um *output* para análise de sete DMUs, como mostra a Tabela 4.

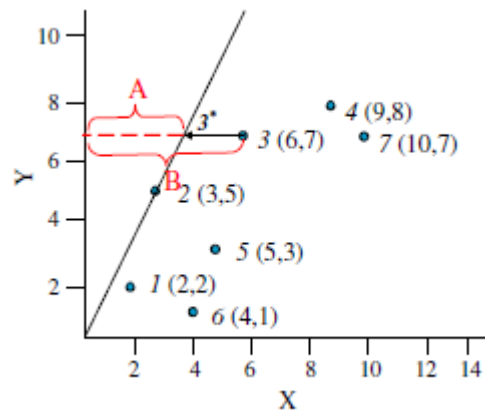
Tabela 4 – *Input, Output* e eficiência para as DMUs do exemplo proposto

DMU	1	2	3	4	5	6	7
Inputs (X)	2	3	6	9	5	4	10
Outputs (Y)	2	5	7	8	3	1	7
Eficiência DEA	60%	100%	70%	53%	36%	15%	42%

Fonte: Adaptado Cook e Seiford (2009).

Assim, ao aplicar o método, o resultado indica que a segunda DMU é eficiente, $h_0 = 1$ ou 100%, como mostra a Tabela 4 e por meio da Figura 12 é possível ver a fronteira de eficiência e a posição relativa de cada DMU.

Figura 12 – Projeção dos *inputs* e *outputs* para o exemplo de DEA CCR



Fonte: Cook e Seiford (2009).

2.2.2 DEA – VRS ou DEA – BCC

O DEA – VRS (BANKER; CHARNES; COOPER, 1984) é a uma extensão do modelo CRS proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) no qual é possível determinar se a operação foi conduzida em regiões de crescimento, constante ou decrescimento ao considerar uma variável irrestrita C_0 na equação do modelo CCR (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), devido a esse retorno variável de escala, o modelo é nomeado como *Variable Return to Scale*, DEA – VRS (BANKER; CHARNES; COOPER, 1984). As expressões (11) – (16), mostram o modelo linear do DEA-VRS:

$$\max \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + C_0 \quad (11)$$

s.a.:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + C_0 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (14)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$C_0 \in \mathbb{R} \quad (16)$$

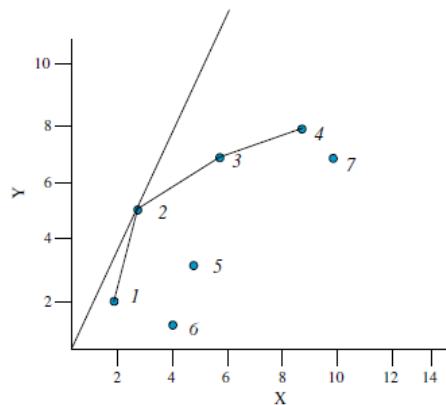
Os resultados do modelo apresentado na Tabela 4, solucionado com o método DEA – VRS, encontram-se na Tabela 5, no qual múltiplas DMUs foram consideradas eficientes, sendo elas 1, 2, 3 e 4 e na Figura 13 está a projeção da fronteira de eficiência para o problema proposto.

Tabela 5 – *Input, Output* e eficiência para as DMUs do exemplo proposto – DEA VRS

DMU	1	2	3	4	5	6	7
Inputs (X)	2	3	6	9	5	4	10
Outputs (Y)	2	5	7	8	3	1	7
Eficiência DEA	100%	100%	100%	100%	47%	50%	60%

Fonte: Adaptado Cook e Seiford (2009).

Figura 13 – Projeção dos *inputs* e *outputs* para o exemplo de DEA-VRS



Fonte: Cook e Seiford (2009).

2.2.3 MCDEA – *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*

Os modelos de Análise Envoltória de Dados Multiobjetivo são criados a partir da necessidade de preencher uma lacuna deixada pelo método DEA (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978), quando a regra de ouro proposta por Banker (1989) não é respeitada. A regra de ouro (BANKER et al., 1989) comede uma relação entre a quantidade de *inputs* e *outputs* e um mínimo de DMUs. Define o critério, no qual a quantidade de DMUs deve ser maior ou igual, a três vezes a soma da quantidade de *inputs* e *outputs* considerados na análise, ou o produto dos *inputs* e *outputs*, considerando o critério que resulta no maior número DMUs, como mostra a expressão (17).

$$j \geq \max\{3 \cdot (m + s), m \cdot s\} \quad (17)$$

Sendo o índice j vinculada as DMUs, m a quantidade de variáveis *inputs* e s a quantidade de variáveis *outputs*.

De acordo com Tolo e Tichý (2015), quando os critérios não são atendidos, a maioria das DMUs observadas serão consideradas eficientes e isso impede a obtenção de resultados confiáveis. Para solucionar o baixo poder de discriminação, quando os critérios da regra de ouro (BANKER et al., 1989) não forem atendidos e para corrigir a distribuição de pesos irreal, Li e Reeves (1999) propõem o modelo de DEA com múltiplos critérios, do termo em inglês *Multiple Criteria Data Envelopment Analysis model* (MCDEA), descrito nas equações (18) – (26).

$$\min d_0 \text{ or } \max \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (18)$$

$$\min M \quad (19)$$

$$\min \sum_{j=1}^n d_j \quad (20)$$

s.a.:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (21)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$M - d_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (24)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (25)$$

$$d_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

Sendo que d_j mede a ineficiência para j -ésima DMU e $M = \text{Max} \{d_j\}$, ou seja, a variável M é o máximo valor de ineficiência e d_0 contempla a ineficiência para a DMU que está sob análise. Os outros parâmetros e variáveis são análogos ao modelo apresentado em (2) a (5).

Diversos pesquisadores criaram modelos derivados do MCDEA proposto inicialmente por Li e Reeves (1999), como:

- Ghasemi, Ignatius e Emrouznejad (2014) propuseram o BIO-MCDEA.
- Hatami-Marbini e Toloo (2017) propuseram um modelo, a partir do BIO-MCDEA (GHASEMI; IGNATIUS; EMROUZNEJAD, 2014), propondo modificações no modelo.
- Rubem, Mello e Meza (2017) criam um modelo WGP-MCDEA que utiliza no método MCDEA a programação por meta ponderada e tratam sobre inconsistências sobre o modelo GPDEA (BAL; ÖRKCÜ; ÇELEBIOĞLU, 2010), que não foram consideradas por Hatami-Marbini e Toloo (2017), além de corrigir os erros de formulação e aplicação do GPDEA por Bal, Örkücü e Çelebioğlu (2010).
- Já Silva, Marins e Dias (2020) criam um novo modelo MCDEA fundamentado no modelo de Rubem, Mello e Meza (2017) que resulta em melhor discriminação das DMUs, distribuição de pesos estatisticamente igual aos outros modelos MCDEA e detecta os *inputs* e *outputs* mais importantes para o problema.
- Silva et al. (2021) fizeram uma aplicação prática do modelo proposto por Silva, Marins e Dias (2020), sendo feita em problemas de *Lean e Green Manufacturing*.

2.2.4 Modelo ponderado Bi-Objetivo (BiO – MCDEA)

O modelo BIO-MCDEA (GHASEMI; IGNATIUS; EMROUZNEJAD, 2014) apresenta uma única função objetivo equivalente as três funções do modelo de Li e Reeves (1999), na qual o peso w_1 não é considerado, uma vez que, este apresenta baixo poder de discriminação quando comparado com os outros pesos da função objetivo w_2 e w_3 . O modelo BIO-MCDEA (GHASEMI; IGNATIUS; EMROUZNEJAD, 2014) está estruturado nas equações (27) – (33):

$$\text{Min } w_2 M + w_3 \sum_{j=1}^n d_j \quad (27)$$

s.a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (28)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

$$M - d_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

$$u_r \geq \varepsilon, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (31)$$

$$v_i \geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (32)$$

$$d_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (33)$$

Sendo M o desvio máximo, w_2 e w_3 os pesos na função objetivo estruturada na equação (27) e ε é o parâmetro infinitesimal não arquimediano, que impedem que o valor da otimização das variáveis u_r e v_i sejam zero.

2.2.5 Modelo Ponderado Bi-Objetivo Estendido

O modelo ponderado Bi-Objetivo estendido proposto por Hatami-Marbini e Toloo (2017), está estruturado nas equações (34) a (40).

O modelo proposto preenche lacunas deixadas pelo modelo ponderado Bi-Objetivo de Ghasemi, Ignatius e Emrouznejad (2014), que assumem um épsilon não arquimediano, como limite inferior para os pesos dos *inputs* e *outputs*, afirmar que os resultados do modelo não são afetados pela substituição do baixo limite inferior por zero, não definir claramente a atribuição de pesos para cada função objetiva e pôr fim a ausência de alternativa para lidar com o problema do modelo de Bal, Örkücü e Çelebioğlu (2010), citados pelos autores Ghasemi, Ignatius e Emrouznejad (2014) em seus estudos (HATAMI-MARBINI; TOLOO, 2017).

$$\text{Min} \quad w_1(2d_0) + w_2M + w_3 \sum_{j=1}^n d_j \quad (34)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (35)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (36)$$

$$M - d_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (37)$$

$$d_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (38)$$

$$u_r \geq \varepsilon, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (39)$$

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

O máximo valor de ε é formulado nas equações (41) – (45) (AMIN; TOLOO, 2007; HATAMI-MARBINI; TOLOO, 2017)

$$\varepsilon^* = \max \varepsilon \quad (41)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (43)$$

$$\varepsilon - u_r \leq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (44)$$

$$\varepsilon - v_i \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (45)$$

2.2.6 Modelo de Programação por Meta ponderada (WGP – MCDEA – CCR)

Rubem, Mello e Meza (2017) propuseram o modelo de programação por Meta ponderada (WGP-MCDEA-CCR), dando continuidade ao trabalho de Ghasemi, Ignatius e Emrouznejad (2014) que identificam inconsistências no modelo de Bal, Örcü e Çelebioğlu (2010).

Para isso, foram corrigidas inconsistência não tratadas por Ghasemi, Ignatius e Emrouznejad (2014) e foi proposto uma formulação para resolver apropriadamente o modelo de Programação por Meta ponderada (RUBEM; MELLO; MEZA, 2017), como formulado de (46) – (55):

$$\text{Min } \lambda_1 d_1^+ + \lambda_2 d_2^+ + \lambda_3 d_3^+ \quad (46)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (47)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (48)$$

$$M - d_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (49)$$

$$d_0 + d_1^- - d_1^+ \leq g_1 \quad (50)$$

$$M + d_2^- - d_2^+ \leq g_2, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (51)$$

$$\sum_{j=1}^n d_j + d_3^- - d_3^+ \leq g_3, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (52)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (53)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (54)$$

$$d_j, d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+, d_3^-, d_3^+ \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (55)$$

Sendo λ_1, λ_2 e λ_3 são os pesos atribuídos a cada termo da função objetivo e g_1, g_2 e g_3 são os valores das metas. Já $d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+, d_3^-$ e d_3^+ são os desvios negativos e positivos indesejados para as metas (RUBEM; MELLO; MEZA, 2017).

2.2.7 Novo modelo MCDEA

O novo modelo MCDEA proposto por Silva, Marins e Dias (2020), além de preencher a lacuna dos modelos DEA, quando a regra de ouro (BANKER et al., 1989) não é atendida, também traz resultados, como melhores discriminações das DMUs, distribuição de peso estatisticamente igual aos outros modelos MCDEA e identificação das variáveis mais importantes para o problema.

O novo MCDEA é estruturado a partir do modelo de programação por metas de Rubem, Mello e Meza (2017) e é formulado nas expressões (56) – (64):

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n d_j^- + d_0^+ + M + \theta \quad (56)$$

s.a.:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (57)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j^- - d_0^+ = 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (58)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} - d_0^+ \leq \theta \quad (59)$$

$$M - d_j^- \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \quad (60)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (61)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s, \quad (62)$$

$$d_j^- \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \quad (63)$$

$$d_0^+, \theta \geq 0 \quad (64)$$

No qual, θ é a meta de eficiência, d_0^+ é variável de desvio superior a meta de eficiência, d_j^- é a variável de desvio inferior do valor de ineficiência para a DMU_j e $M = \max\{d_j^-\}$ (SILVA; MARINS; DIAS, 2020).

2.2.8 Novo modelo MCDEA com supereficiência

A supereficiência ou validação cruzada, *cross-evaluation* (ANDERSON; HOLLINGSWORTH; INMAN, 2002), é uma extensão para os modelos DEA que permite ordenar as DMUs pelo critério de eficiência e elimina esquemas não realistas de distribuição de pesos (ANDERSON; HOLLINGSWORTH; INMAN, 2002).

O modelo proposto por Silva, Marins e Dias (2020) considerando a supereficiência é estruturado nas expressões (65) – (74):

$$\text{Min} \left(\sum_{j=1(j \neq 0)}^n d_j^- + d_0^+ - \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \right) + M + \theta \quad (65)$$

$$\text{s.a.:} \quad (66)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (67)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j^- - d_0^+ = 0, j = 1, 2, \dots, n; j \neq 0 \quad (68)$$

$$M - d_j^- \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; j \neq 0 \quad (69)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} - d_0^+ \leq 0 \quad (70)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (71)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s, \quad (72)$$

$$d_j^- \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; j \neq 0 \quad (73)$$

$$d_0^+, \theta \geq 0 \quad (74)$$

3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste capítulo é apresentada a aplicação do novo modelo MCDEA em um problema real.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A cadeia de suprimentos é composta de muitos processos complexos e faz parte desse fluxo a distribuição dos produtos dos CDs para os clientes (logística *outbound*). Manter sob

análise os CDs e como eles desempenham essa atividade permite identificar quais operam eficientemente e aqueles que precisam de melhorias.

Para isso é necessário utilizar um modelo capaz de considerar parâmetros relevantes para a análise da eficiência dos CDs. Assim, o objetivo é classificar se essas operações são eficientes, considerando recursos e a produtividade (*inputs*) para concluir as atividades com o menor custo (*outputs*).

Neste contexto, o objetivo principal desse trabalho é determinar quais são os centros de distribuição eficientes no processo de entrega de produtos para os clientes (pontos de venda) por meio da utilização do novo MCDEA, considerando também as operações em diferentes meses para incluir o impacto da sazonalidade na análise.

3.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

3.2.1 Seleção dos centros de distribuição (DMUs)

Para a seleção das DMUs foram consultados os especialistas da área de distribuição que são responsáveis pelo gerenciamento dos CDs e elaboração e aplicação de projetos na operação. Além do mais, relatórios e bases relacionadas aos CDs foram utilizadas para analisá-los e ajudar na seleção das DMUs.

As DMUs do estudo foram estruturadas de acordo com o CD e o mês de análise. Optou-se pela escolha de 5 CDs com diferentes perfis de operação (a empresa solicitou sigilo com relação aos CDs) e 4 meses distribuídos ao longo do ano para abranger a sazonalidade da operação.

O primeiro índice da DMU representa o CD e o segundo índice o mês, nos quais 1 e 4 são meses de verão e 2 e 3 meses de inverno.

3.2.2 Definir os *Inputs* e *Outputs*

Os *inputs* e *outputs* selecionados junto aos especialistas encontram-se no Quadro 1. Os parâmetros escolhidos foram considerados como essências para análise das DMUs e também já são utilizados pela empresa como indicadores para o monitoramento desses CDs.

O Quadro 1 está organizado da maneira a seguir:

- Os parâmetros X_1 à X_{14} estão relacionados aos *inputs*
- Os parâmetros Y_1 e Y_2 estão relacionados aos *outputs*

Quadro 1 – *Inputs e Outputs* selecionados como parâmetros

Parâmetros	Descrição do parâmetro	[UM]
X ₁	Total de entregas	[entregas]
X ₂	Total de caixas	[caixas]
X ₃	Volume	[kl]
X ₄	Quantidade de veículos	[veículos]
X ₅	Quantidade de rotas	[rotas]
X ₆	Distância total percorrida	[Mm]
X ₇	Ocupação	[%]
X ₈	Entregas por rota	[entregas/rota]
X ₉	Jornada média	[horas]
X ₁₀	Distância por rota	[km/rota]
X ₁₁	Caixas por rota	[caixas/rota]
X ₁₂	Volume por rota	[volume/rota]
X ₁₃	Custo fixo médio por veículo	[R\$/veículo]
X ₁₄	Custo variável médio por quilometro por veículo	[R\$ /km· veículo]
Y ₁	Custo fixo total	[kR\$]
Y ₂	Custo variável total	[kR\$]

Fonte: O autor (2021).

3.2.3 Desenvolver a matriz de *Inputs e Outputs*

A matriz de *inputs e outputs* foi construída a partir dos parâmetros disponibilizados pela empresa para cada uma das DMUs do estudo como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - *Inputs e Outputs* coletados para cada DMU

DMU	<i>Inputs</i>														<i>Outputs</i>	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	Y1	Y2
1.1	3.472	48.785	222	16	287	21	36%	12	7,78	72	170	775	9.672	1,12	155	22
1.2	2.841	35.920	157	14	245	18	37%	12	8,18	72	147	640	9.619	1,11	135	19
1.3	2.652	33.635	143	17	223	16	36%	12	7,95	74	151	642	9.694	1,12	165	18
1.4	3.287	79.037	350	19	323	23	51%	10	8,20	72	245	1.085	9.731	1,12	185	25
2.1	4.171	48.553	208	19	304	64	30%	14	12,15	212	160	686	12.130	0,79	230	50
2.2	3.672	36.404	147	18	267	57	26%	14	12,85	214	136	551	12.130	0,79	218	44
2.3	3.802	54.091	224	19	271	58	37%	14	13,80	213	200	828	12.130	0,79	230	45
2.4	4.181	64.908	245	24	324	72	37%	13	14,17	221	200	757	12.162	0,79	292	56
3.1	5.399	64.326	266	20	373	52	53%	14	8,47	140	172	713	9.866	0,85	197	43
3.2	4.395	38.612	148	20	301	42	43%	15	8,33	140	128	490	9.866	0,85	197	35
3.3	5.028	68.323	270	26	325	47	57%	15	11,62	146	210	831	9.999	0,85	260	40
3.4	4.908	90.829	365	25	384	54	61%	13	8,33	140	237	951	9.981	0,85	250	45
4.1	4.227	43.482	176	19	325	48	42%	13	7,93	147	134	540	9.141	0,75	174	33
4.2	4.016	44.840	158	17	324	51	35%	12	9,42	159	138	489	9.119	0,75	155	36
4.3	4.683	61.247	229	26	378	60	45%	12	8,88	158	162	605	9.191	0,77	239	42
4.4	5.960	136.117	506	32	497	80	55%	12	10,02	161	274	1.018	9.217	0,77	295	57
5.1	22.953	293.052	1.190	64	1.434	84	68%	16	7,48	58	204	830	9.663	0,71	618	59
5.2	16.991	181.529	698	51	1.178	70	56%	14	7,57	59	154	592	9.505	0,71	485	48
5.3	17.085	278.759	1.194	73	1.374	76	70%	12	7,23	56	203	869	9.645	0,71	704	54
5.4	16.752	453.052	1.929	88	1.516	88	70%	11	6,88	58	299	1.272	9.880	0,72	869	62

Fonte: O autor (2021).

3.2.4 Seleção do modelo MCDEA

Dos modelos tratados na revisão da literatura, optou-se pela utilização do novo Modelo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) por apresentar resultados com melhores discriminações das DMUs, distribuição de peso estatisticamente igual aos outros modelos MCDEA e identificação das variáveis mais importantes para o problema, além de preencher a lacuna dos modelos DEA.

3.2.5 Determinar a eficiência por meio do novo modelo MCDEA

Para determinar a eficiência de cada DMU utilizando o novo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) os *inputs* e *outputs* da Tabela 5 foram incluídos no Microsoft Excel. A função objetivo, restrições e variáveis foram adicionadas no Solver do programa e utilizou-se o método de resolução SIMPLEX (HILLIER; LIEBERMAN, 2010) para a simulação dos cenários.

A programação em VBA foi utilizada para automatizar o cálculo da eficiência para mais de uma DMU (Apêndice A). O tempo computacional para o cálculo da eficiência das DMUs e identificação dos *inputs* e *outputs* relevantes durou 19 segundos utilizando um processador Intel Core i5 vPro e 12 Gb de memória RAM.

A Tabela 7 apresenta a solução do problema com a eficiência para cada uma das 20 DMUs utilizando o novo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020).

Tabela 7 – Eficiência das DMUs

DMU	NOVO MCDEA	DMU	NOVO MCDEA
1.1	100%	3.3	96%
1.2	93%	3.4	99%
1.3	95%	4.1	86%
1.4	96%	4.2	88%
2.1	98%	4.3	90%
2.2	97%	4.4	91%
2.3	94%	5.1	98%
2.4	100%	5.2	97%
3.1	100%	5.3	100%
3.2	98%	5.4	94%

Fonte: O autor (2021).

Com os resultados apresentados na Tabela 7, é possível observar que:

- Das 20 DMUs analisadas apenas 4 são eficientes de acordo com o novo MCDEA, sendo elas 1.1, 2.4, 3.1 e 5.3.
- As DMUs eficientes são de CDs distintos, mas em sua maioria para os meses de verão

Incorporando o conceito de supereficiência na análise das DMUs do novo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020), formulado nas equações (65) – (74), obteve-se os resultados mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação das DMUs pelo método de Supereficiência

Classificação	DMU	NOVO MCDEA	Classificação	DMU	NOVO MCDEA
1	5.3	103,2%	11	2.2	96,0%
2	2.4	102,8%	12	1.4	95,3%
3	3.1	102,0%	13	2.3	94,0%
4	1.1	101,8%	14	1.3	94,0%
5	3.3	99,5%	15	5.4	93,3%
6	3.4	99,0%	16	5.2	91,9%
7	3.2	98,0%	17	4.4	90,8%
8	5.1	97,9%	18	4.3	89,8%
9	2.1	97,8%	19	4.2	88,7%
10	1.2	96,4%	20	4.1	85,6%

Fonte: O autor (2021).

Pelo método da supereficiência foi possível classificar as DMUs com base na eficiência, assim a DMU 5.3 é a mais eficiente, seguida por 2.4, 3.1 e 1.1 respectivamente. Já as DMUs com a pior eficiência são aquelas relacionadas com o CD 4.

3.2.6 Determinar quais são as variáveis mais importantes para cada DMU

Com o novo MCDEA é possível identificar quais são os parâmetros mais relevantes para análise de cada DMU, sendo aqueles que os pesos v_i e u_r são diferentes de zero. A Tabela 9 apresenta os *inputs* e *outputs* relevantes para análise de cada uma das DMUs.

Para a DMU 5.3 considerada eficiente pelo novo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) e classificada como a mais eficiente pelo método de supereficiência, os parâmetros mais relevantes são: X_3 , X_4 , X_6 , X_9 , X_{10} , X_{12} , Y_1 e Y_2 .

Tabela 9 – Parâmetros (*inputs* e *outputs*) relevantes para as DMUs

DMU	<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	Y ₁	Y ₂
1.1			X	X		X			X	X		X	X		X	X
1.2			X	X		X	X		X			X			X	X
1.3			X	X		X			X	X	X				X	X
1.4			X	X		X	X		X	X		X			X	X
2.1			X			X	X		X			X	X		X	X
2.2			X			X	X		X			X	X		X	X
2.3			X		X	X	X		X			X			X	X
2.4			X	X		X	X		X			X	X		X	X
3.1			X			X	X		X			X	X		X	X
3.2			X	X		X				X		X	X		X	X
3.3			X	X		X	X		X	X		X			X	X
3.4				X		X	X		X	X		X	X		X	X
4.1			X			X	X		X			X	X		X	X
4.2			X			X	X		X			X	X	X	X	X
4.3			X	X		X			X	X		X	X		X	X
4.4			X	X		X			X			X	X		X	X
5.1			X	X		X			X			X			X	X
5.2			X	X		X			X		X	X			X	X
5.3			X	X		X			X	X		X			X	X
5.4		X	X	X		X			X	X					X	X

Fonte: O autor (2021).

3.2.7 Discussão dos resultados

Nesta etapa os resultados obtidos com o novo MCDEA (SILVA; MARINS; DIAS, 2020) serão analisados pelos especialistas da empresa e seus comentários serão transcritos a seguir.

- As DMUs eficientes são três operações nos meses de verão e uma no inverno. Historicamente, existe um pico do volume entregue pelos CDs nesses meses de verão e especificamente para o mês de inverno em análise.

- Esse volume maior resulta numa melhor ocupação da frota disponível no CD, que opera com uma maior produtividade nesses meses, litros/rota.

- Continuando, a sazonalidade tem um impacto diferente nos CDs que estão localizados em diferentes regiões do país. Relacionado a isso, as frotas são dimensionadas a fim de atender a demanda mês a mês com o menor custo possível, porém um perfil de frota que atende o verão com ocupação alta das rotas, no inverno apresenta baixa ocupação.

- Outra questão importante é o uso do VBA - Excel para aplicar o modelo MCDEA, o modelo traz informações relevantes e coerente com a operação atual da empresa, utilizando um software habilitado para todos os funcionários, além do tempo de processamento do algoritmo SIMPLEX implementando no Solver do Excel para mais de uma DMU ser rápido com a automatização proposta.

- Seguindo, com *inputs* e *outputs* relevantes, podemos chamar atenção para ocupação (X_7), que apresenta maior peso entre as DMUs ineficientes. Esse *input* conversa com projetos já propostos/em andamento a fim de adequar o melhor perfil de veículo (veículos menores) para os CDs.

- Ainda sobre os veículos, vale destacar o *input* X_{13} (custo fixo médio por veículo) que é relevante para a análise de algumas DMUs e apresenta relação com o projeto mencionado anteriormente, uma vez que ao mudar o perfil da frota para veículos menores, o custo fixo médio por veículo diminui.

- Para as DMUs do CD 4 que foram as mais ineficientes, vemos que a produtividade de volume por rota, *input* X_{12} , são em sua maioria menor que as outras DMUs. Comparando a eficiência dos meses para o CD 4, tem-se que o de melhor eficiência 4.4 é aquele que apresenta maior produtividade de volume por rota.

- Em relação aos *inputs* irrelevantes, o parâmetro X_{14} (custo variável por carro), ele é uma parcela muito pequena do custo total (custo fixo + variável) tendo pouca interferência nos resultados dos CDs.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Nesta seção será respondido as questões da pesquisa e os objetivos geral e específicos definidos na seção 1.3.

4.1 RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DE PESQUISA E VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho de avaliar a eficiência de centros de distribuição na entrega de produtos para os clientes (pontos de venda) com a utilização de um modelo MCDEA foi concluído.

Para análise foi utilizado o novo MCDEA de Silva, Marins e Dias (2020), o modelo foi escolhido, porque os resultados apresentam melhor discriminação das DMUs, distribuição de peso estatisticamente igual aos outros modelos MCDEA e identificação das variáveis mais importantes para o problema. Além disso, preenche as lacunas do DEA quando a regra de ouro não é respeitada e conta com um modelo de supereficiência que permite classificar as DMUs com relação a sua eficiência.

Em seguida, as DMUs e os parâmetros para análise foram definidas junto aos especialistas. Foram escolhidos 5 centros de distribuição e suas operações em 4 meses diferentes para considerar a sazonalidade, logo para o presente estudo foram consideradas 20 DMUs.

Dessas DMUs 4 foram consideradas eficientes após aplicação do novo MCDEA e são elas 5.3, 2.4, 3.1 e 1.1 como mostra a Tabela 7. Assim como a questão de quais são as DMUs eficientes, o estudo também identificou os parâmetros mais relevantes para cada DMU, que estão na Tabela 8.

Dos objetivos específicos os dois primeiros foram tratados no parágrafo anterior e o terceiro refere-se a mudança de eficiência dos CDs na virada de plano verão – inverno. Nota-se que três das 4 DMUs eficientes são para meses de verão e de CDs distintos, o que foge a exceção é a DMU mais eficiente, 5.3, esse ponto foi analisado com os especialistas e historicamente para esse mês existe um pico no volume, o que faz com que alguns CDs sejam mais eficientes quando considerado a produtividade de volume por rota.

4.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho contribuiu no preenchimento da lacuna de pesquisa relacionada a aplicação do MCDEA para análise da eficiência de centros de distribuição. Os resultados

apresentados além de indicar os CDs eficientes e ranqueá-los, traz como informação os parâmetros mais relevantes para cada uma das DMUs, o que poderá ser utilizado pelos especialistas para tomar decisões com foco na melhoria da eficiência dos centros de distribuição.

4.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Avaliar a eficiência dos centros de distribuição, não apenas na atividade de distribuição, mas em outras frentes como armazenamento.
- Analisar mais detalhadamente as DMUs ineficientes a fim de propor melhorias para torna-las eficientes.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, S.; SINGH, R. K.; MURTAZA, Q. A literature review and perspectives in reverse logistics. **Resources, Conservation and Recycling**, Michigan, v. 97, p. 76–92, abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- AMIN, G. R.; TOLOO, M. Finding the most efficient DMUs in DEA: an improved integrated model. **Computers and Industrial Engineering**, California, v. 52, n. 1, p. 71–77, fev. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.10.003>. Acesso em: 05 mar. 2020.
- AMIRI, A. Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 171, n. 2, p. 567–576, jun. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.018>. Acesso em: 08 ago. 2020.
- ANDERSON, T. R.; HOLLINGSWORTH, K.; INMAN, L. The fixed weighting nature of a cross-evaluation model. **Journal of Productivity Analysis**, New York, v. 17, n. 3, p. 249–255, maio 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1015012121760>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- ANDREJIĆ, M.; BOJOVIĆ, N.; KILIBARDA, M. Benchmarking distribution centres using principal component analysis and data envelopment analysis: a case study of Serbia. **Expert Systems with Applications**, Condado de Prince George's, v. 40, n. 10, p. 3926–3933, ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.085>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- ARVIS, J.-F.; OJALA, L.; WIEDERER, C.; SHEPHERD, B.; RAJ, A.; DAIRABAYEVA, K.; KIISKI, T. **Logistics performance index**. Washington: The World Bank, jul. 2018. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2018/07/24/logistics-performance-index-2018>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- BAKER, B. M.; AYECHIEW, M. A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. **Computers and Operations Research**, Montreal, v. 30, n. 5, p. 787–800, abr. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00051-5). Acesso em: 12 dez. 2020.
- BAL, H.; ÖRKÇÜ, H. H.; ÇELEBIOĞLU, S. Improving the discrimination power and weights dispersion in the data envelopment analysis. **Computers and Operations Research**, Montreal, v. 37, n. 1, p. 99–107, jan. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.028>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, Catonsville, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, set. 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>. Acesso em: 10 nov. 2020.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W.; SWARTS, J.; THOMAS, D. An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. **Research in governmental and non-profit accounting**, Somerville, v. 5, p. 125–163, dez. 1989. Disponível em: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10021314443/>. Acesso em: 12 abr. 2020

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 2, n. 6, p. 429–444, nov. 1978. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8). Acesso em: 13 abr. 2020.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Evaluating program and managerial efficiency: an application of data envelopment analysis to program follow through. **Management Science**, Catonsville, v. 27, n. 6, p. 668–697, jun. 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/mnsc.27.6.668>. Acesso em: 13 abr. 2020.

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA): thirty years on. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 192, n. 1, p. 1–17, jan. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.032>. Acesso em: 13 abr. 2020.

COOPER, M. C.; LAMBERT, D. M.; PAGH, J. D. Supply chain management: more than a new name for logistics. **The International Journal of Logistics Management**, Somerville, v. 8, n. 1, p. 1–14, jan. 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/09574099710805556>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ERNST, R.; KAMRAD, B. Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 124, n. 3, p. 495–510, ago. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00184-8). Acesso em: 04 out. 2020.

FRAZELLE, E. **Supply chain strategy: the logistics of supply chain management**. Toronto: McGraw-Hill, 2002. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32893345/book_-_Supply_Chain_Strategy_-_The_Logistics_of_Supply_Chain_Management.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1512498029&Signature=WWC%2Bkieq8sVqPydmESnKSmZWUj8%3D&response-content-disposi. Acesso em: 06 out. 2020.

GHASEMI, M. R.; IGNATIUS, J.; EMROUZNEJAD, A. A bi-objective weighted model for improving the discrimination power in MCDEA. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 233, n. 3, p. 640–650, mar. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.041>. Acesso em: 05 dez. 2020.

GOPAL, C.; CAHILL, G. **Logistics in manufacturing**. Burr Ridge: Irwin, 1992. v. 29

GRAWE, S. J. Logistics innovation: a literature-based conceptual framework. **The International Journal of Logistics Management**, Somerville, v. 20, n. 3, p. 360–377, nov. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/09574090911002823>. Acesso em: 23 jul. 2020.

GUTIERREZ, G. J.; KOUVELIS, P. A robustness approach to international sourcing. **Annals of Operations Research**, Cham, v. 59, n. 1, p. 165–193, dez. 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02031747>. Acesso em: 17 jul. 2020.

HATAMI-MARBINI, A.; TOLOO, M. An extended multiple criteria data envelopment analysis model. **Expert Systems with Applications**, Shreveport, v. 73, p. 201–219, maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.030>. Acesso em: 13 nov. 2020.

HILLIER, F. .; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

JOHNSON, R. B.; ONWUEGBUZIE, A. J. Mixed methods research: a research paradigm whose time has come. **Educational Researcher**, Washington, v. 33, n. 7, p. 14–26, out. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.3102/0013189X033007014>. Acessado em: 24 mar. 2020.

LAI, K. H.; NGAI, E. W. T.; CHENG, T. C. E. Measures for evaluating supply chain performance in transport logistics. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Norfolk, v. 38, n. 6, p. 439–456, nov. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(02\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00019-4). Acesso em: 16 out. 2020.

LI, H.; RU, Y.; HAN, J. What makes a difference? an evaluation and identification approach to distribution center productivity using DEA. **Information Technology Journal**, Faisalabad, v. 12, n. 24, p. 8308–8312, dez. 2013. Disponível em: [10.3923/itj.2013.8308.8312](https://doi.org/10.3923/itj.2013.8308.8312). Acesso em: 6 mar. 2020.

LI, X. B.; REEVES, G. R. Multiple criteria approach to data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 115, n. 3, p. 507–517, jun. 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00130-1). Acesso em: 13 mar. 2020.

COBO, M.J.; LÓPEZ-HERRERA, A.G.; HERRERA-VIEDMA, E.; HERRERA, F. SciMAT: a new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, Silver Spring, v. 64, n. July, p. 1852–1863, jul. 2013. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asi.22883/abstract>. Acesso em: 24 ago. 2020.

MABERT, V. A.; VENKATARAMANAN, M. A. Special research focus on supply chain linkages: challenges for design and management in the 21st century. **Decision Sciences**, Houston, v. 29, n. 3, p. 537–552, jun. 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1998.tb01353.x>. Acesso em: 13 ago. 2020.

MIGUEL, P. A. C.; MORABITO, R.; PUREZA, V.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; DE LIMA, E. P.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; COSTA, S. E. G.; MARTINS, R. A.; OTHERS. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=JO1oDwAAQBAJ>. Acesso em: 13 dez. 2020.

PISINGER, D.; ROPKE, S. A general heuristic for vehicle routing problems. **Computers and Operations Research**, Montreal, v. 34, n. 8, p. 2403–2435, ago. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012>. Acesso em: 16 out. 2020.

ROSS, A.; DROGE, C. An integrated benchmarking approach to distribution center performance using DEA modeling. **Journal of Operations Management**, Chicago, v. 20, n. 1, p. 19–32, dez. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(01\)00087-0](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(01)00087-0). Acesso em: 02 abr. 2020.

RUBEM, A. P. S.; MELLO, J. C. C. B. S.; MEZA, L. A. A goal programming approach to solve the multiple criteria DEA model. **European Journal of Operational Research**, Leeds, v. 260, n. 1, p. 134–139, jul. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.049>. Acesso em: 26 mar. 2020.

RUSHTON, A.; CROUCHER, P.; BAKER, P. **The handbook of logistics & distribution management**. 5. ed. Londres: KoganPage, 2014.

SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978-1995). **Journal of Productivity Analysis**, Cham, v. 7, n. 2–3, p. 99–137, jul. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00157037>. Acesso em: 19 mar. 2020.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; DIAS, E. X. Improving the discrimination power with a new multi-criteria data envelopment model. **Annals of Operations Research**, Cham, v. 287, n. 1, p. 127–159, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03446-1>. Acesso em: 14 set. 2020.

SILVA, A. F. ; MARINS, F. A. S.; DIAS, E. X.; USHIZIMA, C. A. Improving manufacturing cycle efficiency through new multiple criteria data envelopment analysis models: an application in green and lean manufacturing processes. **Production Planning and Control**, Londres, v. 32, n. 2, p. 104–120, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1713413>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SYARIF, A.; YUN, Y.; GEN, M. Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach. **Computers and Industrial Engineering**, v. 43, n. 1–2, p. 299–314, jul. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00076-1). Acesso em: 05 ago. 2020.

TOLOO, M.; TICHÝ, T. Two alternative approaches for selecting performance measures in data envelopment analysis. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Perugia, v. 65, p. 29–40, abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.043>. Acesso em: 09 abr. 2020.

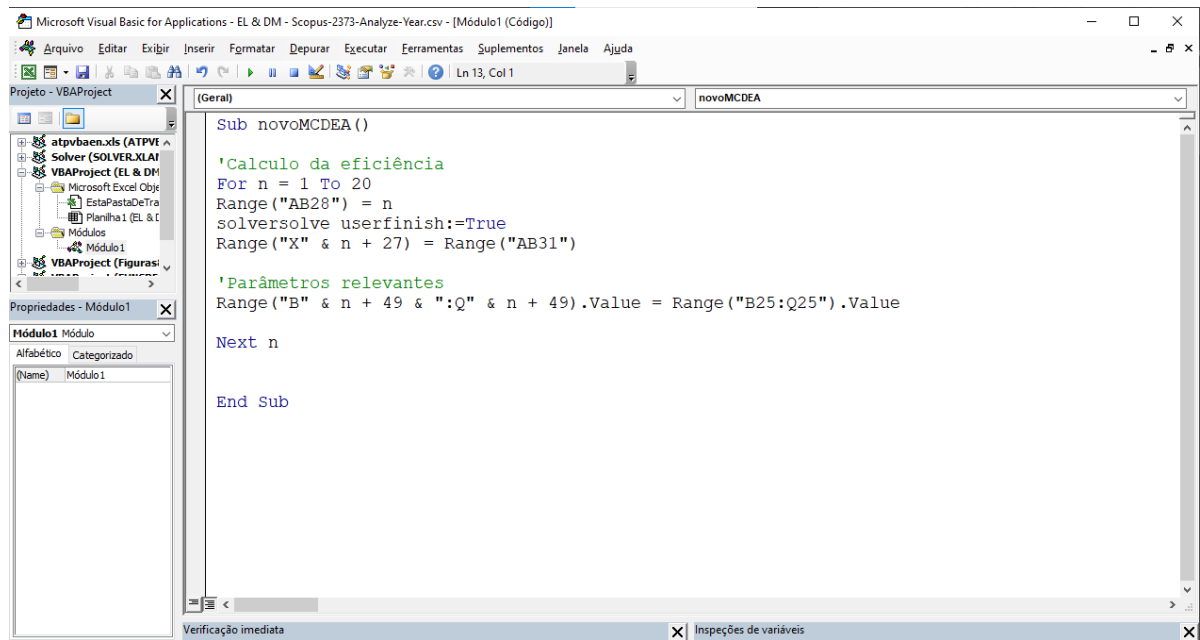
TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação: o positivismo, a fenomenologia, o marxismo**. São Paulo: Atlas, 1987. v. 1

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, Budapeste, v. 84, n. 2, p. 523–538, dez. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>. Acesso em: 26 jul. 2020.

VIS, I. F. A.; KOSTER, R. B. M.; SAVELSBERGH, M. W. P. Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal. **Transportation Science**, Catonsville, v. 39, n. 2, p. 249–260, maio 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0063>. Acesso em: 13 ago. 2020.

APÊNDICE A – Programa em VBA

Código utilizado para o cálculo da eficiência das DMUs utilizando o novo modelo MCDEA.



The screenshot displays the Microsoft Visual Basic for Applications editor. The title bar indicates the file path: "Microsoft Visual Basic for Applications - EL & DM - Scopus-2373-Analyze-Year.csv - [Módulo1 (Código)]". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Exibir", "Inserir", "Formatar", "Depurar", "Executar", "Ferramentas", "Suplementos", "Janela", and "Ajuda". The status bar shows "Ln 13, Col 1".

The left-hand side of the editor shows the "Projeto - VBAProject" window with a tree view containing "atpvbaen.xls (ATPV)", "Solver (SOLVER.XLAI)", "VBAProject (EL & DM)", "Microsoft Excel Objeto", "Esta Pasta De Trabalho", "Planilha1 (EL & DM)", "Módulos", and "Módulo1". Below this is the "Propriedades - Módulo1" window, which is currently empty.

The main code window, titled "novoMCDEA", contains the following VBA code:

```
Sub novoMCDEA ()  
  
    'Calculo da eficiência  
    For n = 1 To 20  
        Range("AB28") = n  
        solversolve userfinish:=True  
        Range("X" & n + 27) = Range("AB31")  
  
        'Parâmetros relevantes  
        Range("B" & n + 49 & ":Q" & n + 49).Value = Range("B25:Q25").Value  
  
    Next n  
  
End Sub
```

At the bottom of the editor, there are two status bars: "Verificação imediata" and "Inspeções de variáveis".