

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA AVALIAÇÃO DA  
ECOEFIÊNCIA EM PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA**

**MARIA JÚLIA XAVIER BELÉM**

**ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR**

PIRACICABA

2023

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA AVALIAÇÃO DA  
ECOEFIÊNCIA EM PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA**

**MARIA JÚLIA XAVIER BELÉM**

**ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

PIRACICABA

2023

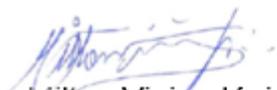
Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP  
Bibliotecária: Joyce Rodrigues de Freitas - CRB-8/10115.

B428p	<p>Belém, Maria Júlia Xavier</p> <p>Proposta de um modelo conceitual para a avaliação da ecoeficiência em processos de aspersão térmica / Maria Júlia Xavier Belém- 2023. 131f. ; 30 cm.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Milton Vieira Junior. Dissertação (Doutorado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de produção, Piracicaba, 2023.</p> <p>1. Sustentabilidade. 2. Ecoeficiência. 3. Aspersão térmica. I. Belém, Maria Júlia Xavier . II. Título.</p> <p>CDD – 620.82</p>
-------	---

# PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA AVALIAÇÃO DA ECOEFIÊNCIA EM PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

**MARIA JÚLIA XAVIER BELÉM**

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 08 de fevereiro de 2023, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



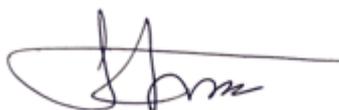
Prof. Dr. Milton Vieira Júnior - PPGE/UNIMEP  
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon - PPGE/UNIMEP



Prof. Dr. Daniel Luis Garrido Monaro - PPGE/UNIMEP



Prof. Dr. Jan Vatauvuk - Mackenzie

*Fabio Sartori Piran*

Prof. Dr. Fábio Antonio Sartori Piran - Unisinos

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria, por me conceder a oportunidade de cursar o doutorado, mais uma conquista ao longo dessa trajetória acadêmica.

Ao professor Dr. Milton Vieira Júnior, por sempre me manter motivada, por toda compreensão, por confiar no trabalho realizado e por todo o processo de orientação, que iniciou de forma turbulenta, mas finalizando com a leveza de quem teve uma missão cumprida.

À empresa OPT Brasil, por toda parceria ao longo desses anos, em especial ao Sr. Flávio Camargo, pelos conselhos e toda a ajuda para que este trabalho fosse concluído.

Aos meus pais, Ivete e Júlio, um agradecimento especial, por me deixar livre para seguir o meu caminho, por serem minha fonte de força e inspiração. Assim como minha irmã Natália e meu sobrinho Oliver, pelas palavras de carinho e amor incondicional.

Aos meus amigos de longa data, Amadeus, Monyce, Sieli, Bruno, Kelly, Lucielly, Simone e Luisa, comadre Zinza, afilhado Bernardo e Thiago Luís, pelas palavras de incentivo e por me mostrarem amizades raras e valiosas que tenho a sorte de ter na minha vida.

Aos meus amigos que conheci na faculdade e que fazem parte da minha vida, Everton e Mayra, por dividir as dores, pela empatia e companheirismo. Vocês me inspiram!

Aos professores do PPGEF, por todo ensinamento, conselhos ao longo desses anos. Apesar da impossibilidade de estarmos na universidade que nos conhecemos, agradeço por todos os momentos ali vivenciados.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse finalizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Brasil.

BELÉM, Maria Júlia Xavier. **PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA EM PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA**. 2023. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, SP.

## RESUMO

A aspersão térmica (AT) é um dos principais processos para a obtenção de revestimentos protetores. Porém, esse processo apresenta consumo de energia e geração de resíduos que devem ser avaliados a fim de se desenvolver estratégias sustentáveis de operações. Nesse contexto, pode-se aplicar a avaliação da ecoeficiência (EE) como uma estratégia ligada à sustentabilidade que relaciona a produção, expressa por valores econômicos, e o impacto ambiental ocasionado pelo consumo de materiais e pela geração de resíduos. A EE, uma vez integrada ao processo de AT, passa a ser uma forma de avaliar o processo em estudo, tanto em relação a sua condição ambiental como a econômica. Diante do exposto, identificou-se a lacuna deste estudo, a falta de um modelo de EE para avaliar os processos de AT no que tange aspectos relacionados com a sustentabilidade. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um modelo conceitual de avaliação de EE dos processos de aspersão térmica, que tenha como parâmetros indicadores ambientais e econômicos resultantes do processo. Para atingir o objetivo, a metodologia desta pesquisa foi dividida em três fases: i. Identificação dos Modelos de EE - por meio da Revisão Sistemática da Literatura, visando a identificação dos indicadores de ecoeficiência; fase ii. Desenvolvimento do modelo de EE - iniciando com aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), para selecionar os indicadores mais alinhados com o processo de AT, finalizando essa fase com a construção do modelo de avaliação da EE e definição do limite do sistema; e, por fim, a fase iii, Aplicação do modelo de EE para AT, realizando a coleta de dados para os *inputs* e *outputs* envolvidos nos processos de AT de uma empresa que se utiliza desse processo. Para tanto, foi realizada a aplicação do modelo, de modo não paramétrico, a análise envoltória de dados (DEA), e a análise da EE para os processos de aspersão. Foram coletados os dados dos indicadores de EE para 33 combinações de processos de aspersão (aqui chamados DMUs), variando em três tipos (HVOF, *Arc spray* e *Flame spray*). Esses dados foram coletados junto uma empresa que atua exclusivamente na aplicação de revestimentos por AT. Das 33 DMUs analisadas, 14 foram consideradas ecoeficientes. Na análise de *benchmarking*, foram analisadas como cada uma dessas DMUs que são *benchmarks* podem servir de referência para as 19 DMUs que não se mostraram ecoeficientes. Ainda, foram obtidos como resultados, as folgas que representam as oportunidades de melhoria para cada indicador analisado das 19 DMUs que devem ser otimizadas para se tornarem ecoeficientes. Por fim, este estudo focou em mostrar que uma análise de EE dos processos de AT, considerando a relação ótima entre *inputs* e *outputs*, bem como possíveis otimizações operacionais dos processos de aspersão investigados, é uma oportunidade para assegurar que as indústrias se tornem, cada vez mais, conscientes dos impactos ambientais relacionados com os aspectos econômicos que as suas operações causam.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade; Ecoeficiência; Aspersão Térmica; Revestimentos; AHP; DEA.

BELÉM, Maria Júlia Xavier. **PROPOSAL OF A CONCEPTUAL MODEL FOR ECO-EFFICIENCY EVALUATION IN THERMAL SPRAY PROCESSES**. 2023. 131 p. Thesis (PhD in Production Engineering), Methodist University of Piracicaba, Piracicaba, SP.

## **ABSTRACT**

Thermal spraying (TS) is one of the main processes for obtaining protective coatings. However, this process presents energy consumption and waste generation that must be evaluated to develop sustainable strategies for operations. In this context, one can apply eco-efficiency evaluation (EE) as a sustainability strategy that relates production, expressed by economic values, and the environmental impact caused by material consumption and waste generation. EE, once integrated into the TS process, becomes a way to evaluate the process under study, both in relation to its environmental and economic condition. Given the above, the gap in this study was identified, the lack of an EE model to evaluate TS processes regarding aspects related to sustainability. Thus, the general objective of this work was to develop a conceptual model for evaluating the EE of thermal spray processes, which has as parameters environmental and economic indicators resulting from the process. To achieve the objective, the methodology of this research was divided into three phases: i. Identification of EE models - through a Systematic Literature Review, aiming at the identification of eco-efficiency indicators; phase ii. Development of the EE model - beginning with the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, to select the indicators most aligned with the TS process, finalizing this phase with the construction of the EE evaluation model and definition of the system boundary; and finally, phase iii, Application of the EE model for TS, carrying out data collection for the inputs and outputs involved in the TS processes of a company that uses this process. To do so, the model was applied, in a non-parametric way, using data envelopment analysis (DEA), and the EE analysis for the aspersion processes. EE indicator data were collected for 33 combinations of spraying processes (here called DMUs), varying in three types (HVOF, Arc spray and Flame spray). These data were collected from a company engaged exclusively in the application of TS coatings. Of the 33 DMUs analyzed, 14 were considered eco-efficient. In the benchmarking analysis, we analyzed how each of these DMUs that are benchmarks can serve as a reference for the 19 DMUs that were not eco-efficient. Also, the results obtained were the gaps that represent the opportunities for improvement for each indicator analyzed for the 19 DMUs that should be optimized to become eco-efficient. Finally, this study focused on showing that an EE analysis of TS processes, considering the optimal relationship between inputs and outputs, as well as possible operational optimizations of the investigated sprinkler processes, is an opportunity to ensure that industries become increasingly aware of the environmental impacts related to the economic aspects that their operations cause.

**KEYWORDS:** Sustainability; Eco-efficiency; Thermal Spraying; Coatings; AHP; DEA.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	6
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	6
1.4. METODOLOGIA DA PESQUISA .....	11
1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	13
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1. ECOEFICIÊNCIA.....	15
2.2. MODELOS DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA .....	17
2.3. ASPERSÃO TÉRMICA .....	36
2.4. MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO: AHP ( <i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS</i> ) .....	41
2.5. DEA ( <i>DATA ENVELOPMENT ANALYSIS</i> ) – ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS .....	44
<b>3. ABORDAGEM METODOLÓGICA</b> .....	<b>50</b>
3.1. FASE 1: IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS DE EE - RSL .....	51
3.2. FASE 2: DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE EE.....	56
3.2.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP .....	57
3.2.2. SELEÇÃO DOS INDICADORES PARA O MODELO .....	61
3.2.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE DA AT .....	62
3.3. FASE 3: APLICAÇÃO DO MODELO DE EE .....	64
3.3.1. EXECUÇÃO DO MODELO DEA .....	65
<b>4. MODELO PROPOSTO PARA AVALIAÇÃO DA EE PARA ASPERSÃO TÉRMICA</b> .....	<b>70</b>
4.1. SELEÇÃO DOS INDICADORES ECONÔMICOS E AMBIENTAIS (INPUTS E OUTPUTS) ....	70

4.2. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO MODELO DE AVALIAÇÃO.....	77
4.3. AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS – SOFTWARE DEA.....	82
<b>5. APLICAÇÃO DO MODELO: ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA.....</b>	<b>87</b>
5.1. BENCHMARKING .....	92
5.2. ANÁLISE DAS FOLGAS .....	95
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>98</b>
6.1. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	99
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>118</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. <i>OUTLINE</i> DA PESQUISA .....	13
FIGURA 2. ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA.....	36
FIGURA 3. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA .....	37
FIGURA 4. APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COMBINAÇÃO DA T (°C) X V (M/S) PARA OS DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA .....	38
FIGURA 5. RELAÇÕES AMBIENTAIS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA .....	38
FIGURA 6. FRONTEIRA DE EFICIÊNCIA DEA: MODELOS CCR E BCC.....	48
FIGURA 7. FASES DA METODOLOGIA UTILIZADA .....	51
FIGURA 8. DESCRIÇÃO DA FASE I DA METODOLOGIA .....	52
FIGURA 9. PESQUISA DE LITERATURA E AVALIAÇÃO PARA INCLUSÃO DE ARTIGOS PARA RSL .....	54
FIGURA 10. PUBLICAÇÃO POR RAMO DE ATIVIDADE .....	55
FIGURA 11. DESCRIÇÃO DA FASE II DA METODOLOGIA .....	56
FIGURA 12. ESTRUTURA DA AHP PARA SELEÇÃO DOS INDICADORES DE EE.....	58
FIGURA 13. PROCEDIMENTO PARA LEVANTAMENTO DOS INDICADORES DE EE .....	61
FIGURA 14. LIMITE DO SISTEMA: DESCRIÇÃO DOS <i>INPUTS</i> E <i>OUTPUTS</i> .....	63
FIGURA 15. DESCRIÇÃO DA FASE III DA METODOLOGIA.....	65
FIGURA 16. ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA MODELAGEM EM DEA .....	66
FIGURA 17. ENTRADAS E SAÍDAS DO MODELO DEA, COM APLICAÇÃO DE UM <i>SOFTWARE</i> ....	69
FIGURA 18. ETAPAS PARA O MODELO CONCEITUAL DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA.....	70
FIGURA 19. INDICADORES SELECIONADOS PARA AVALIAR A EE DOS PROCESSOS DE AT ....	76
FIGURA 20. PRIMEIRA PARTE DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE .....	77
FIGURA 21. SEGUNDA PARTE DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE .....	82
FIGURA 22. TERCEIRA PARTE DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE.....	85
FIGURA 23. MODELO CONCEITUAL DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA.....	85
FIGURA 24. APLICATIVO WEB SAGEPE PARA MODELOS DEA .....	87
FIGURA 25. ESCORES DE EE PARA AS DMUS ANALISADAS.....	90

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	11
QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL .....	29
QUADRO 3. PROTOCOLO DA PESQUISA .....	53
QUADRO 4. ALTERNATIVAS E CRITÉRIOS PARA SEREM AVALIADO NO AHP PARA O SETOR DE MANUFATURA .....	71
QUADRO 5. INDICADORES (CRITÉRIOS) PARA AVALIAR NO AHP, EXTRAÍDOS DO SETOR DE MANUFATURA .....	72
QUADRO 6. VARIÁVEIS UTILIZADOS NO MODELO DEA .....	80

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. ESCALA DE COMPARAÇÃO DE PARES DE SAATY .....	59
TABELA 2. ÍNDICE RANDÔMICO OU ÍNDICE ALEATÓRIO (RI) MÉDIO DO AHP .....	60
TABELA 3. RESULTADO DO JULGAMENTO DOS INDICADORES DE EE POR MEIO DO MÉTODO AHP .....	74
TABELA 4. ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DOS CRITÉRIOS (INDICADORES DE EE).....	75
TABELA 5. DISTRIBUIÇÃO DAS DMUs E RESPECTIVOS INDICADORES DE EE .....	83
TABELA 6. DADOS DOS INDICADORES IMPORTADOS NO SAGEPE .....	88
TABELA 7. RESULTADOS DOS ESCORES: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT.....	89
TABELA 8. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE EE .....	90
TABELA 9. RESULTADOS DO BENCHMARKING: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT.....	93
TABELA 10. RESULTADOS DAS FOLGAS: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT .....	95
TABELA 11. DADOS COLETADOS DOS INDICADORES DO PROCESSO HVOF.....	118
TABELA 12. DADOS COLETADOS DOS INDICADORES DO PROCESSO ARC SPRAY .....	119
TABELA 13. DADOS COLETADOS DOS INDICADORES DO PROCESSO FLAME SPRAY .....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

AT – Aspersão Térmica

BCC – Banker; Charnes; Cooper

CA – Consumo de água

CCR – Charnes; Cooper; Rhodes

CE – Consumo de energia

CFT – *Carbon Footprint*

CF – Custo de fabricação

CFP – Pegada de carbono

CGR – Custo de gestão de resíduos

CM – *Conventional Method*

CMP – Custo da matéria prima

CP-RH – Custo da produção -recursos humanos

CT – Custo de transporte

CTP – Custo total do produto

CVD – *Chemical Vapor Deposition*

DEA – *Data Envelopment Analysis*

DMU – *Decision Making Unit*

EC – Emissão de CO<sub>2</sub>

EE – Ecoeficiência

EIO-LCA – Avaliação do Ciclo de Vida de Entrada-Saída Econômica

ETAR – Estações de Tratamento de Águas Residuais

GEE – Gases de Efeito Estufa

GR – Geração de resíduos

GWP – *Global Warming Potential*

HVAF – *High Velocity Air Fuel*

HVOF – *High-Velocity Oxy-Fuel Coating*

LCA – *Life Cycle Assessment*

LCC – *Life Cycle Cost*

LTCCB – *Low Temperature Copper to Copper Bonding*

MLT - *Multiplicative Inverse*

MPI – *Malmquist Productivity Index*

ODS – *Objetivos do Desenvolvimento Sustentável*

PET – *Produção Econômica Total*

PVD – *Physical Vapor Deposition*

QPR – *Quantidade de peça revestida*

REACH – *Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals*

RMC – *Recursos materiais consumidos do equipamento*

RSL – *Revisão Sistemática da Literatura*

RST – *Rough Set Theory*

SBM – *Slacks-Based Measure*

SFA – *Stochastic Frontier Approach*

SMED – *Single Minute Exchange of Die*

Super-SBM – *Super-Slack-Based Measure*

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

WF – *Water Footprint*

WRDDM – *Weighted Russell Directional Distance Model*

## 1. INTRODUÇÃO

Empresas de manufatura enfrentam desafios econômicos e ambientais, especialmente devido ao aquecimento global, ao esgotamento de recursos, e aumento dos preços de energia e de matéria-prima que são utilizados em seus processos (TAHERI; GADOW; KILLINGER, 2014). Nos processos de fabricação, um dos principais fatores a ser analisado é a disponibilidade da matéria-prima e a questão energética (THIEDE, 2012). Nesse contexto, abordagens de eficiência energética e aplicações de estratégias de desenvolvimento sustentável em processos manufatureiros são desenvolvidas para reduzir os impactos do desperdício de energia e de emissões atmosféricas, além dos resíduos sólidos que são gerados (POISSON-DE HARO; BITEKTINE, 2015; TAHERI; GADOW; KILLINGER, 2014).

Indústrias dos mais variados setores buscam utilizar tecnologias menos poluentes e mais eficientes para substituir as tecnologias que foram desenvolvidas focando somente para atender às necessidades, mas que são responsáveis por apresentar significativos impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana (WIDENER; ELLINGSEN; CARTER, 2018). As chamadas tecnologias verdes, relacionadas à conservação de energia, gestão de resíduos, além de outros aspectos operacionais (LUO; SALMAN; LU, 2021), tendem a oferecer benefícios ao meio ambiente, mas devem ser avaliadas em relação às características de interesse coletivo, se são eficientes, eficazes e econômicas, quando comparadas às outras tecnologias existentes (WIDENER; ELLINGSEN; CARTER, 2018).

Em indústrias que extraem e produzem recursos necessários para a fabricação de peças metálicas, há um consumo de uma grande quantidade de energia com elevada liberação de carbono (PIMENOV *et al.*, 2022). Dessa forma, é preferível, quando possível, reparar uma peça em vez de refazê-la, reduzindo processos que necessitam de alta quantidade de energia para reciclar, fundir, reprocessar e usinar, possibilitando uma redução no impacto ambiental (WIDENER; ELLINGSEN; CARTER, 2018).

Considerando esse cenário, é observada a crescente utilização de revestimentos protetores sobre a superfície de peças, por serem capazes de prolongar a vida dos equipamentos com a aplicação de materiais especiais, apresentando melhorias das propriedades mecânicas e químico-físicas (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014; FOTOVVATI; NAMDARI; DEHGHANGHADIKOLAEI, 2019). Esse aumento na

utilização de revestimentos nas diversas indústrias pode ser considerado uma opção de baixo custo e de investimento sustentável, principalmente naquelas empresas focadas para o reparo e fabricação de componentes, pois, além de melhorar as propriedades superficiais, o revestimento aumenta a resistência mecânica às solicitações expostas (PATHAK; SAHA, 2017).

Nesse contexto, a engenharia de superfície se apresenta como um campo em constante avanço na pesquisa e desenvolvimento tecnológico de modificação de superfícies, na busca por novos materiais de revestimentos e processos de aplicação (VATAVUK; VENDRAMIN; CANALE, 2021), que atendam aos requisitos de operação aliados ao conceito sustentável (MAKHLOUF; TIGINYANU, 2011). Os setores industriais que utilizam de processos para obtenção de camadas protetoras, conscientes dos impactos que suas atividades causam ao meio ambiente, tendem a utilizar métodos e estratégias de aplicação de revestimentos ligados à gestão ambiental, melhorando seu desempenho e garantindo resistência às solicitações mecânicas que os componentes e equipamentos estão sujeitos (HOUDKOVÁ *et al.*, 2011).

Revestimentos de cromo duro são mais conhecidos e utilizados para resistência ao desgaste e corrosão. Porém, materiais contendo o cromo duro apresentam efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, o que pode ser visto no regulamento europeu REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*), pois o elemento cromo gera resíduos considerados prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL, 2000), devendo ser substituído por outros materiais.

Uma alternativa apresentada é a aplicação de revestimentos obtidos por outros processos e que ocasionam o menor impacto possível ao meio ambiente e sociedade. Tais revestimentos protetores podem ser obtidos por meio de processos como o sol-gel, o PVD (*Physical Vapor Deposition*), o CVD (*Chemical Vapour Deposition*), a soldagem (*Cladding Overlay*), a deposição a laser e a Aspersão Térmica (AT) (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). Tecnologias de deposição como PVD e CVD requerem um ambiente controlado da pressão, visando a obtenção de filmes finos e altamente resistentes. Geralmente, esses processos são caros e possuem limites em relação ao tamanho e à forma da peça a ser revestida (BOULOS; FAUCHAIS; HEBERLEIN, 2021).

A aspersão térmica apresenta diversas vantagens sobre a maioria dos processos de aplicação de revestimentos, como o PVD, CVD e galvanoplastia (processos eletrolíticos de cromo duro): menor custo, maior taxa de produção e menor impacto ambiental, em relação aos processos de deposição citados, que são mais prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (DAVIS, 2004; FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). Ainda, esse processo de aspersão oferece a maior variedade de materiais que podem ser aplicados, de espessuras e de possíveis características protetoras do revestimento (JAZI, 2012; FOTOVVATI; NAMDARI; DEGHANGHADIKOLAEI, 2019).

Os processos de aspersão apresentam diferentes temperaturas e velocidades de deposição, sendo os processos de maior velocidade, também chamados de supersônicos, o HVOF (*High-Velocity Oxy-Fuel Coating*), o HVOF (*High Velocity Air Fuel*), o *D-Gun (Detonation Gun)* e o *Cold Spray*, e os processos com menor velocidade, o *Flame Spray* e o Arco Elétrico (DAVIS, 2004; FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). A aspersão apresenta diversas variáveis, como tamanho e velocidade das partículas, temperatura do processo, taxa de alimentação do pó, distância de aspersão, entre outros. O controle dessas variáveis garante a estrutura ideal do revestimento aplicado. A escolha do processo de aspersão é determinada pelas características do material de aplicação, pelos requisitos de desempenho do revestimento, pela economia e pelo tamanho da peça a ser revestida (DAVIS, 2004; CINCA; GUILMANY, 2012).

Mesmo a AT sendo considerada um processo de baixo custo, quando comparado aos demais processos de aplicação de revestimentos (WIJWARDANE, 2015), a aspersão se constitui por um intensivo uso de energia, necessária para aquecer o material de aplicação até que esse esteja em estado fundido e, posteriormente, utilizam-se gases e jatos de atomização para acelerar essas partículas fundidas ou semifundidas para que impactem no metal base e formem a camada protetora (DAVIS, 2004; FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014).

Por consequência, a indústria que utiliza esses revestimentos enfrenta pressão dos ambientalistas devido ao alto consumo de produtos químicos aliado à grande emissão de gases para a atmosfera, além dos resíduos provenientes do material particulado que não aderiu à superfície da peça (DAVIS, 2004; TAHERI; GADOW; KILLINGER, 2014). Um processo de deposição de camadas que apresente uma ineficiência

qualquer, como na conversão de energia, por exemplo, pode apresentar impactos significativos sobre o meio ambiente, como emissões de substâncias prejudiciais ou a utilização não sustentável dos recursos, tanto materiais como energéticos (DAVIS, 2004; TAHERI *et al.*, 2016).

Visando analisar o aspecto ambiental de um processo de fabricação, como é o caso da aplicação de revestimentos superficiais, torna-se necessário integrar uma abordagem que avalie os impactos ambientais envolvidos em cada etapa do processo, podendo ser feito por meio de ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (SERRES *et al.*, 2010). A ACV é conhecida e aplicada internacionalmente na identificação, comparação e redução dos impactos ambientais dos processos, produtos e serviços, como é o caso dos processos de acabamento dos metais, que apresentam impactos na saúde humana, nos ecossistemas e no uso dos recursos materiais (MOIGN *et al.* 2009).

Entretanto, além de avaliar o impacto ambiental, é fundamental integrar a essa avaliação as questões econômicas, ou seja, associar as questões ambientais às econômicas mensurando o impacto ambiental dos processos em relação às unidades monetárias produzidas e consumidas (KICHERER *et al.*, 2007), no que pode ser considerado como a base da ecoeficiência.

A ecoeficiência, conforme Bidoki *et al.* (2006), é definida como uma relação entre a produção, expressa por valores econômicos, e o impacto ambiental ocasionado pelo consumo de materiais ou pela geração de resíduos nas atividades envolvidas na operação de fabricação. Segundo esses mesmos autores, o fator ambiental está relacionado com o volume físico dos materiais consumidos, desde a quantidade dos recursos utilizados para obtenção do produto, e com questões oriundas das propriedades químicas originadas dos processos e produtos, visando a redução das emissões de gases, como o dióxido de carbono. Ainda, promove a ideia de minimizar os custos da operação de bens e serviços, maximizando a eficiência, ao mesmo tempo em que é otimizada a utilização dos recursos necessários, reduzindo o desperdício e a poluição ambiental.

Existem diferentes ferramentas e métodos que podem ser combinados para avaliar a ecoeficiência dos produtos e processos; são estabelecidos para a comparação, no que diz respeito aos dados do ciclo de vida, da avaliação do impacto ambiental e dos

custos do processo, ou seja, tais análises fornecem apenas informações comparativas, sem um valor absoluto (BIDOKI *et al.*, 2006).

Além disso, a ecoeficiência pode ainda ser utilizada como ferramenta de tomada de decisão, proporcionando a melhor escolha entre processos de transformação, combinando questões operacionais com questões econômicas fornecendo um critério de avaliação explícito e eficaz, com a utilização de indicadores baseados na avaliação do ciclo de vida, e que pode ser aplicada em diversos setores, em um produto específico, nos negócios ou nos processos industriais (LOZANO; LOZANO, 2017).

Nesse sentido, o desenvolvimento de indicadores para compor a ecoeficiência é uma estratégia fundamental para avaliar e monitorar o processo de forma simples, sistemática e consistente, possibilitando uma melhor compreensão do problema, facilitando a tomada de decisão e direcionando para a qualidade de vida e preservação dos recursos naturais (VAN CANEGHEM *et al.*, 2010a).

Caiado *et al.* (2017) observaram que há uma escassez de artigos científicos publicados que tratam de forma abrangente as práticas, modelos e indicadores de ecoeficiência e que foquem o desenvolvimento sustentável em indústrias, empresas, projetos e processos. Segundo Robaina-Alves; Moutinho; Macedo (2015), há várias maneiras de mensurar a ecoeficiência, dependendo do objetivo e escopo do estudo. A literatura científica disponibiliza uma grande variedade de modelos de avaliação da EE, e a escolha de um modelo adequado depende de vários fatores, incluindo a área de aplicação e o objetivo da avaliação (BELEM *et al.*, 2021). No entanto, especificamente para o campo da aspersão térmica, em uma revisão sistemática de literatura inicial, utilizando uma combinação das palavras-chave “*eco-efficiency model*” AND “*thermal spray*”, não foram encontrados trabalhos científicos que apresentassem um modelo de avaliação da ecoeficiência do processo, sendo aí percebida uma oportunidade para se aprofundar neste estudo.

Para entender quais medidas as empresas que utilizam os processos de AT podem adotar para seguir um caminho rumo a sustentabilidade, é necessária a realização de estudos mais aprofundados que permitam facilitar a adoção das práticas de ecoeficiência. Para validar tais práticas, a utilização dos indicadores de ecoeficiência pode mensurar os dados do processo e apresentar resultados para serem discutidos e analisados pela empresa. Nesse sentido, este estudo apresenta a seguinte questão de pesquisa:

Como avaliar o processo de aspersão térmica sob o ponto de vista da ecoeficiência e quais indicadores podem ser utilizados para essa avaliação?

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um modelo conceitual de avaliação de ecoeficiência dos processos de aspersão térmica, que tenha como parâmetros indicadores ambientais e econômicos resultantes do processo.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

A fim de atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os modelos existentes para avaliação de ecoeficiência de processos e os indicadores presentes em cada modelo;
- Identificar os parâmetros e componentes do processo de aspersão que devam ser considerados em análises de ecoeficiência;
- Identificar, caso existam, e propor, caso não existam, indicadores que retratem a ecoeficiência no processo de aplicação de revestimento por aspersão térmica;
- Propor a composição do modelo de avaliação do processo de aspersão térmica sob a ótica da ecoeficiência, a partir dos indicadores identificados/propostos;
- Aplicar o modelo de avaliação da ecoeficiência de aspersão térmica proposto, com base em processos industriais de aspersão térmica de uma empresa prestadora de serviços de aplicação de revestimentos, a fim de verificar sua pertinência.

### **1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

O setor de manufatura é a fonte de todos os bens e recursos necessários para a produção, segurança, saúde, entre outros fatores importantes para a sociedade. Mas, a manufatura tem um impacto considerável no consumo de energia, na utilização de recursos físicos e emissões para o meio ambiente. Diante disso, a introdução da sustentabilidade na fabricação é fundamental para minimizar as ameaças ambientais e sociais presentes nos processos de fabricação. Por isso, diversos setores

manufatureiros apresentam um interesse crescente no desenvolvimento de práticas e abordagens sustentáveis que possam ser agregadas em todos os seus processos (GARETTI; TAISCH, 2011).

Nas indústrias que utilizam revestimentos protetores o foco deve ser dado em utilizar meios que empregam menor uso de recursos materiais, menor consumo de energia e maior eficiência no aspecto operacional. Os revestimentos devem garantir uma maior resistência aos fenômenos destrutivos, como a corrosão e o desgaste, presentes em materiais que compõem peças e componentes de equipamentos, avaliando em conjunto as questões econômicas e ambientais envolvidas em todo o processo. O uso de revestimentos deve causar o mínimo impacto possível ao meio ambiente, tanto ao longo do ciclo de vida do produto quanto no processo de obtenção da camada protetora (JAMES *et al.*, 2005).

O processo de aplicação de revestimento é uma etapa adicional ao processo de fabricação, que envolve a utilização de diversos recursos materiais e energéticos necessários para garantir que os revestimentos apresentem benefícios que superem os custos da sua aplicação. Isso justifica a importância de ser utilizado um processo de deposição de revestimento que atenda às condições de qualidade e resistência desejadas. Fedrizzi *et al.* (2004) afirmaram que a aplicação de revestimentos está relacionada com 80% dos custos totais para proteção de metais. Dessa forma, devem ser avaliados o consumo de energia utilizado, o uso de consumíveis, as emissões e resíduos, os problemas de qualidade e outros aspectos fundamentais do processo (JAMES *et al.*, 2005).

Estudos sobre a utilização de processos de aplicação de revestimentos considerados sustentáveis são constantemente realizados, indicando uma maior consciência ambiental das organizações, além da necessidade de seguir atentamente as leis que foram formuladas e implementadas para analisar materiais e processos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (WANG *et al.*, 2019). Diante disso, surgem diferentes conceitos que integram a sustentabilidade nos processos industriais, motivados pela preocupação com os danos ambientais que são causados pela operação, pela eficiência energética, pelo cumprimento das leis ambientais e outros fatores associados ao custo dos recursos materiais e energéticos envolvidos (HAUSCHILD *et al.*, 2005).

Na literatura, a análise da relevância ambiental dos processos de obtenção de revestimentos superficiais é realizada, em geral, utilizando abordagens que focam nos impactos ambientais de cada etapa, por exemplo, por meio da ACV (SERRES *et al.*, 2010). Essa abordagem é capaz de quantificar os impactos ao meio ambiente para avaliar e comparar o desempenho ambiental dos processos e apontar a alternativa que melhor atenda aos aspectos ambientais requeridos (SERRES *et al.*, 2009; MOIGN *et al.*, 2009).

No entanto, notou-se que a maioria dos estudos que abordam de alguma forma conceitos de sustentabilidade na AT (SERRES *et al.*, 2009; SERRES *et al.*, 2010; MOIGN *et al.*, 2009) têm como foco a quantificação dos impactos ambientais e não tratam dos custos associados ao processo, uma parte a ser considerada no tripé da sustentabilidade. Isso justifica a proposta deste trabalho, pois, pretendeu-se analisar as questões econômicas e ambientais em uma única abordagem, que seja capaz de oferecer uma análise comparativa para avaliação dos processos de revestimentos por aspersão térmica.

Para Simboli; Taddeo; Morgante (2014), a sustentabilidade é uma questão crucial para as gerações presentes e futuras. Ao longo dos anos, a gestão e quantificação da sustentabilidade passou a fazer parte das decisões técnico-econômicas, estratégicas e gerenciais das empresas. As preocupações com as questões sustentáveis ganharam força entre as organizações, alinhado ao conceito de desenvolvimento sustentável como um caminho para melhorar a qualidade de vida das gerações futuras.

O desenvolvimento sustentável destaca a ideia de atender às necessidades do presente sem que comprometa que as gerações futuras atendam às suas próprias necessidades. Diante disso, governos, indústrias e instituições de pesquisa e ensino se amparam nos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (17 ODS) (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2022). Para este estudo, foram considerados os objetivos 12 e 13, definidos, respectivamente, como: “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”; e “Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”.

Para o consumo e produção responsáveis (objetivo 12), é necessário assegurar a gestão de resíduos provenientes do processo e reduzir significativamente a liberação desses resíduos para o meio, visando minimizar os impactos para a saúde humana e meio ambiente. Para o objetivo 13, de ação contra a mudança global do clima, é necessário integrar medidas que atinjam essa finalidade nas estratégias e planejamentos (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2022). Nesse contexto, a proposta de avaliar a ecoeficiência da AT é sustentada por esses dois ODS, visando consolidar a cultura da sustentabilidade dentro de empresas desse setor, tornando as operações mais responsáveis, eficientes e competitivas.

A maioria das organizações busca alcançar o desenvolvimento sustentável, integrando os conceitos “verdes” em seus negócios. Para Rashidi; Farzipoor Saen (2015), a ecoeficiência é um dos principais critérios utilizados para avaliar o desempenho verde, sendo considerada como uma forma aprimorada de avaliação da sustentabilidade por relacionar os impactos ambientais com algum tipo de desempenho econômico, conforme bem destacam Müller *et al.* (2014), tornando-se assim uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento sustentável (CHARMONDUSIT *et al.*, 2013).

Neste contexto da EE, tem-se que um processo que apresenta um baixo impacto ambiental pode não ser economicamente viável, ou seja, não ser ecoeficiente; do mesmo modo que um processo pode ser economicamente viável, mas apresenta um alto impacto ambiental, o que também o torna não ecoeficiente (NG *et al.*, 2015). Portanto, é necessário medir a ecoeficiência do processo, serviço ou produto utilizando as duas dimensões da sustentabilidade, possibilitando compreender o valor do processo em relação à sua influência ambiental, conforme aponta o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2000).

Como os impactos ambientais são avaliados com base em indicadores de ecoeficiência que são integrados à atividade econômica, em uma relação de consumo e produção, a utilização dos ecoindicadores passa a ser uma estratégia importante para avaliar a ecoeficiência de uma forma simples e, ao mesmo tempo, sistemática e consistente (VAN CANEGHEM *et al.*, 2010). Esses ecoindicadores podem ser utilizados em um modelo especificamente desenvolvido para avaliar a ecoeficiência na área desejada, podendo também serem utilizados nos processos de tomada de

decisão, na parte gerencial e estratégica da empresa, por exemplo. Além disso, podem estimular melhorias ao longo da cadeia de valor, visando a sustentabilidade de produtos, processos e serviços (CARVALHO *et al.*, 2017).

Assim, modelos de avaliação com indicadores de ecoeficiência podem proporcionar às empresas tomadas de decisão que as tornem mais competitivas, voltadas para inovação e para sustentabilidade. O desenvolvimento e aplicação de modelos de EE pode garantir melhorias no processo analisado, reduzindo cargas ambientais e efeitos negativos no meio ambiente e na saúde humana, ao mesmo tempo em que aumenta a eficiência do processo. A partir da avaliação da ecoeficiência, o modelo aplicado pode auxiliar a empresa em determinar a melhor estratégia para garantir eficiência e desenvolvimento sustentável (HSIEH *et al.*, 2013).

Empresas que utilizam a aspersão térmica devem compreender as características desse processo, o qual apresenta um alto índice de consumo de energia e de geração de resíduos, demandando o desenvolvimento de estratégias sustentáveis (TAHERI; GADOW; KILLINGER, 2014).

A crescente preocupação com o meio ambiente e com o uso dos recursos materiais e energéticos, faz com que os processos da aspersão térmica sejam otimizados para que mais se aproximem da chamada “tecnologia verde”. Essa tipologia para a AT é caracterizada por um processo que consuma menos energia, requerendo o uso mínimo de combustíveis ou gases combustíveis, e tendo um maior controle da matéria-prima utilizada para depositar e obter o revestimento (PATHAK; SAHA, 2017). Dessa forma, aponta-se importante avaliar aspectos da sustentabilidade na AT por meio da aplicação de modelos e abordagens, capazes de fornecer uma visão desse cenário.

Por fim, a revisão sistemática da literatura realizada neste trabalho, confirmou a inexistência de um modelo de ecoeficiência para o processo de aspersão, a qual mostra a originalidade deste estudo. Dispor de um modelo com indicadores de EE para processos de AT pode possibilitar uma avaliação mais assertiva para a empresa, em relação a utilização dos recursos materiais, energéticos e redução de custos, visando maior eficiência e maior responsabilidade para com o meio ambiente, como já discutido anteriormente.

Para este trabalho, teve-se ainda a oportunidade de analisar a EE em processos de AT em uma empresa especializada na aplicação de revestimentos por meio desse processo. A empresa conta com um amplo mercado interessado em seus serviços; e considerou-se que uma avaliação integrando fatores econômicos e ambientais em uma única abordagem, como o caso da EE, pode proporcionar uma visão mais ampla sobre os impactos de suas técnicas industriais em relação ao meio ambiente.

#### 1.4. METODOLOGIA DA PESQUISA

Esta pesquisa foi classificada quanto à sua natureza, quanto à abordagem ao problema, quanto aos seus objetivos e quanto aos métodos de pesquisa utilizados para o desenvolvimento do trabalho, seguindo as definições estabelecidas por Gil (2017) e Miguel (2012). O Quadro 1 apresenta um resumo das características da presente pesquisa, percorridas a seguir.

QUADRO 1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

<b>Classificação</b>	<b>Característica</b>
Quanto à natureza	<b>Aplicada</b>
Quanto à abordagem	<b>Qualitativa Quantitativa</b>
Quanto aos objetivos	<b>Exploratória</b>
Quanto aos procedimentos técnicos utilizados	<b>Modelagem Teórico-Conceitual</b>

Quanto à sua natureza, esta pesquisa foi classificada como aplicada por propor um modelo que seja utilizado para avaliação de um processo prático de aplicação de revestimentos, o que torna um estudo voltado para geração de conhecimentos direcionado para aplicações práticas (GIL, 2017).

Quanto à forma que foi abordado o problema, esta pesquisa foi classificada como qualitativa e quantitativa, conhecida como abordagem combinada. Segundo Miguel (2012), a combinação de abordagens proporciona vantagens relacionadas a uma complementar a outra, ou seja, enquanto a qualitativa é forte em entender o contexto do fenômeno, a abordagem quantitativa é menos suscetível a vieses na coleta de

dados. Assim, é possível fortalecer as abordagens combinando-as, como feito neste trabalho.

Para a coleta de dados realizada nesta pesquisa, a abordagem combinada refere-se à relação dos indicadores obtidos por meio de revisões da literatura, para dispor em um único modelo conceitual de ecoeficiência; e os resultados obtidos desses indicadores descritos em números que foram, posteriormente, analisados e classificados, o que representa uma abordagem quali-quantitativa.

Quanto aos objetivos, este trabalho foi classificado como uma pesquisa exploratória. Nesse tipo de pesquisa, o objetivo é proporcionar uma maior familiaridade com o problema analisado, visando construir hipóteses (GIL, 2017). Pelo fato de propor um modelo baseado em outros estudos publicados, esse tipo de pesquisa é caracterizado por explorar e aprimorar as ideias sobre o tema em questão.

Por fim, quanto ao método de pesquisa, que se refere à maneira pela qual foram obtidos os dados utilizados, este estudo é classificado como teórico-conceitual, associado com modelagem. Uma pesquisa teórica-conceitual refere-se a realizar uma discussão teórica, a partir de revisão bibliográfica, pesquisa na literatura, além de modelagens conceituais. Já a modelagem está associada com a aplicação de técnicas matemáticas visando apresentar o desempenho de um sistema ou parte deste, conforme a área desejada (MIGUEL, 2012).

Para este estudo, para seguir a abordagem metodológica, foram realizadas pesquisas em bases de dados para obter fontes bibliográficas sobre conceitos de ecoeficiência, seus indicadores e modelos existentes, necessários para discussões e modelagens conceituais. E, posteriormente, utilizadas abordagens matemáticas para propor um modelo que fosse possível quantificar a EE dos processos de AT.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi realizada uma pesquisa teórica, baseada em uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a fim de fundamentar e nivelar os conhecimentos sobre os assuntos envolvidos na proposta, bem como para demonstrar a lacuna da pesquisa existente. Essa pesquisa utilizou as bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*. Para a RSL abranger a lacuna existente, foram utilizados como termos de busca as palavras Ecoeficiência, Modelo, Revestimento e Aspersão Térmica (*Eco-efficiency, Model, Coating, Thermal Spray*).

Para a formulação da proposta de modelo, após a identificação da lacuna, foram analisados os modelos existentes para outros processos de fabricação, a fim de compreender as estruturas desenvolvidas e posterior desenvolvimento da proposta. A Figura 1 apresenta o *outline* da pesquisa desenvolvida, na qual constam as principais características investigadas no presente trabalho.

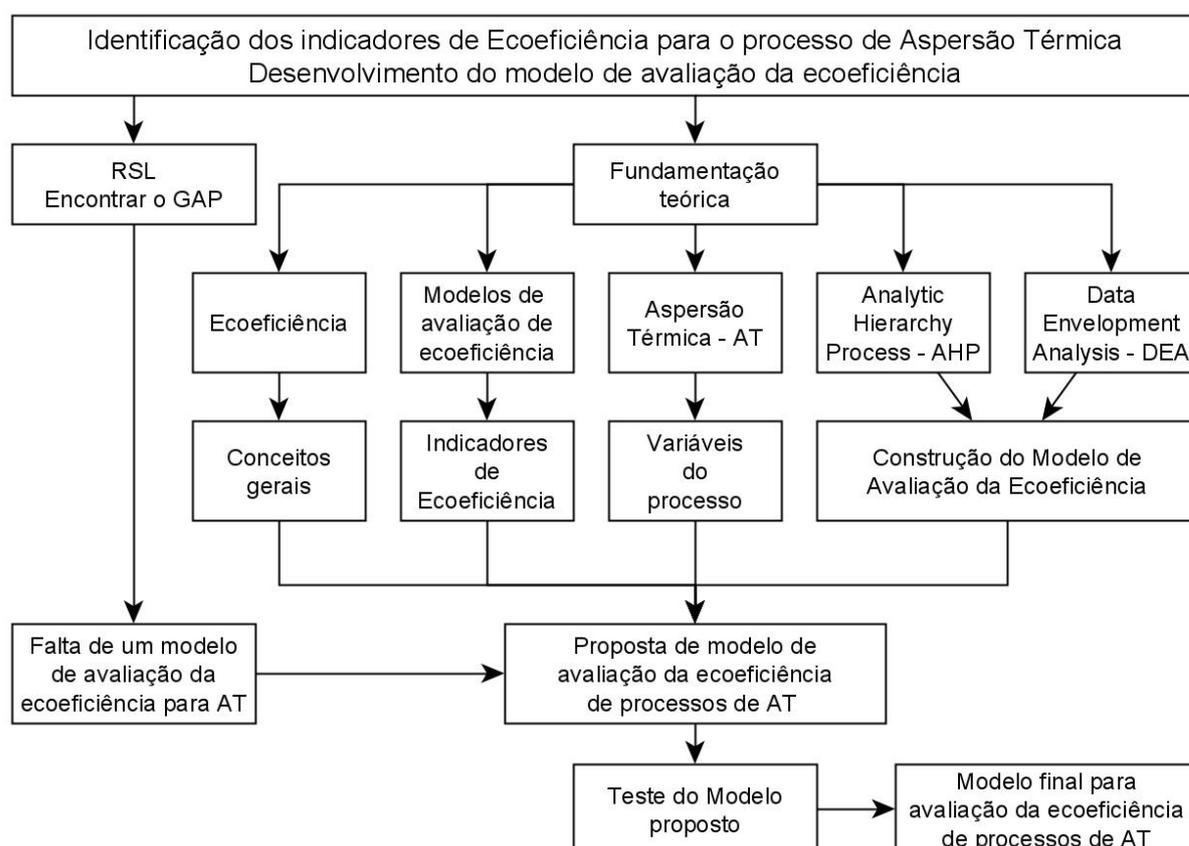


FIGURA 1. OUTLINE DA PESQUISA

### 1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O modelo conceitual proposto de avaliação da ecoeficiência dos processos de aspersão térmica aponta uma indicação para a avaliação da ecoeficiência, mas não fornece uma orientação à empresa sobre a melhoria da ecoeficiência.

Outra limitação da pesquisa é em relação à quantidade de processos de AT a serem avaliados no *software* para análise da ecoeficiência. Foram considerados três processos de AT disponíveis em uma empresa que se dispôs a fornecer todos os dados necessários para execução do modelo proposto. Apesar de haver mais

processos de aspersão a serem avaliados, essa pesquisa se limitou nesses três processos pela disponibilidade.

## **1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, construídos com a finalidade de atender aos objetivos propostos:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta uma contextualização do tema, seguida do problema da pesquisa, dos objetivos do trabalho, da justificativa e relevância, da metodologia utilizada e as limitações da pesquisa.

Capítulo 2 – Referencial Teórico: apresenta uma visão geral com base na revisão bibliográfica e sistemática, sobre os temas abordados no trabalho: ecoeficiência, aspersão térmica, modelos de avaliação e métodos de tomada de decisão.

Capítulo 3 – Abordagem Metodológica: apresenta a proposta do modelo conceitual da EE; descreve as fases utilizadas no trabalho para elaboração da proposta do modelo de ecoeficiência. São apresentadas as etapas utilizadas para os parâmetros dos processos de aspersão térmica (limites do sistema), o levantamento e seleção dos ecoindicadores, e o desenvolvimento do modelo de avaliação da ecoeficiência.

Capítulo 4 – Modelo Proposto para Avaliação da EE: apresenta e discute a proposta do modelo, exibindo os *inputs* e *outputs* necessários para aplicação no modelo e a estrutura final necessária para analisar os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Aplicação do Modelo Conceitual: relata os resultados obtidos com a aplicação do modelo para avaliar a EE nos três processos de AT considerados (HVOF, *Arc Spray* e *Flame Spray*).

Capítulo 6 – Conclusão: são relatadas as conclusões do estudo, com uma reflexão sobre os objetivos iniciais do trabalho, das hipóteses levantadas e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um referencial teórico sobre os principais temas propostos para este trabalho.

Inicialmente, o texto aborda os conceitos e premissas da Ecoeficiência. Foi realizado uma RSL sobre modelos de avaliação de ecoeficiência a fim de apresentar os modelos existentes e confirmar a lacuna do modelo para AT.

Ainda, foram abordados os temas sobre Aspersão Térmica, as técnicas e os processos envolvidos, e os aspectos ambientais que permeiam o uso desse processo.

Para finalizar o capítulo, são apresentados conceitos teóricos sobre métodos de tomada de decisão, especificamente sobre o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e DEA (*Data Envelopment Analysis*), os quais são propostas suas integrações no desenvolvimento do modelo de avaliação da ecoeficiência.

### 2.1. ECOEFICIÊNCIA

O termo de ecoeficiência foi inicialmente proposto em 1990 por Schaltegger e Sturm (1990). Porém, foi em 1992 que o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) ou Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, foi o responsável por apresentar mundialmente um dos principais conceitos de ecoeficiência. O termo foi definido como a entrega de bens e serviços competitivos, do ponto de vista econômico, que atendam às necessidades da sociedade em termo de qualidade de vida, sendo que todo esse processo de fabricação e disponibilidade para o consumo, ou seja, ao longo do seu ciclo de vida, deve apresentar o menor impacto possível ao meio ambiente (WBCSD, 2000).

A ecoeficiência é apresentada como uma combinação do desempenho econômico e ambiental de um determinado sistema, avaliada por meio de uma estrutura amplamente aplicada e facilmente interpretada, que pode ser empregada nos mais variados setores empresariais, ao mesmo tempo que fornece um conjunto comum de indicadores. Assim, a ecoeficiência em forma de equação (1) é apresentada como (WBCSD, 2006):

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor do produto ou serviço}}{\text{Impacto ambiental}} \quad \text{eq. (1)}$$

A equação básica possui um indicador do valor dos produtos e serviços produzidos e um indicador do impacto ambiental causado pelas atividades realizadas. Utilizando esta equação, as empresas podem calcular a ecoeficiência de várias maneiras, sendo que a escolha dos parâmetros que irão compor o indicador econômico e ambiental dependerão das necessidades dos tomadores de decisão individuais (WBCSD, 2006).

Esse conceito de ecoeficiência é amplamente aplicado, como mencionado anteriormente, para obter uma forma que combine o desempenho ambiental e econômico, para os mais diversos sistemas de produtos, processos e/ou empresas. Para Huppés e Ishikawa (2005), a ecoeficiência é um instrumento para analisar a sustentabilidade, de modo que indique uma relação empírica das atividades econômicas (custos envolvidos) com o valor ambiental (impactos ao meio ambiente).

Ainda, pode-se apontar que a ecoeficiência apresenta um papel de incentivar oportunidades de negócios, permitindo que as empresas passem a ser responsáveis em relação ao meio ambiente, ao mesmo tempo que apresentem lucros (WBCSD, 2000). Desse modo, espera-se que as organizações industriais produzam bens e serviços utilizando a menor quantidade de recursos e gerando menor quantidade de resíduos e outros poluentes (WBCSD, 2006).

O WBCSD identificou seis características que podem ser consideradas como uma guia para que empresas se tornem mais ecoeficientes, sendo-os: reduzir a intensidade/quantidade do material; reduzir a intensidade de energia; aumentar a reciclabilidade; maximizar a utilização dos recursos renováveis; aumentar a durabilidade do produto; e aumentar a intensidade do serviço (SCHMIDHEINY; TIMBERLAKE, 1992; WBCSD, 2000).

No contexto empresarial, a ecoeficiência pode ser aplicada em nível de produto, processo, corporação ou setorial (LOZANO; ADENSO-DÍAZ; BARBA-GUTIÉRREZ, 2011); LUCATO; VIEIRA JR.; SANTOS, 2013), além de poder ser avaliada em relação a um serviço específico (ZHANG *et al.*, 2008). Porém, a aplicação desse termo vai muito além de ser introduzida como um conceito de negócio, podendo ainda ser utilizada em nível regional, nacional e global, por meio da avaliação da ecoeficiência de cidades, de regiões e de países (XU *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2018; MASTERNAK-JANUS; RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA, 2016; WANG *et al.*, 2020).

Uma metodologia de ecoeficiência conhecida e aplicada em estudos dispostos na literatura científica foi desenvolvida em 1996, pela *BASF Corporation*, voltada para avaliar os impactos econômicos e ambientais de produtos químicos, processos e produtos em seu ciclo de vida (SALING *et al.*, 2002). Essa metodologia foi adaptada e segue os padrões ISO 14040 e ISO 14044 para ACV (UHLMAN; SALING, 2010) e ISO 14045 para avaliação de Ecoeficiência (BRADLEE *et al.*, 2009). Essa metodologia da BASF pode ser utilizada para a tomada de decisões sustentáveis em todos os níveis da cadeia de consumo, da indústria ao consumidor (WALL-MARKOWSKI *et al.*, 2005).

Koskela e Vehmas (2012) verificou em seu trabalho que a ecoeficiência pode ser vista tanto como um indicador de desempenho ambiental, quanto como uma estratégia de negócios para o desenvolvimento sustentável. No seu estudo, os autores apontaram que as definições e aplicações de ecoeficiência estão associadas a alguns aspectos, como: alta produção, mas com menor uso de recursos naturais (produzir mais com menos); produzir mais valor agregado com menor impacto ambiental (razão entre valor econômico e impacto ambiental); utilizar a ecoeficiência como uma estratégia de gestão (oferecer às empresas a possibilidade de obter uma nova visão de seus processos e aumentar sua capacidade de inovação); e pode ser considerada como orientação para melhorar a ecoeficiência de uma organização.

A partir de uma melhor compreensão da ecoeficiência é importante mencionar que existem diferentes métodos, técnicas, instrumentos e modelos que podem ser aplicados para a avaliação da ecoeficiência (KORTELAINEN, 2008). A obtenção dos resultados quanto à medida da ecoeficiência depende de ponderações e considerações que devem ser estabelecidas e aplicadas da melhor forma possível, para que sejam apresentados os indicadores, e, posteriormente, sejam interpretados. Torna-se importante conhecer os modelos existentes de avaliação de ecoeficiência, bem como em quais sistemas foram aplicados, no sentido de motivar a adoção dos princípios e práticas de ecoeficiência.

## **2.2. MODELOS DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA**

A avaliação da ecoeficiência (EE) de produtos, serviços ou processos é realizada por meio de abordagens, métodos e modelos propostos, que devem apresentar uma

fronteira bem definida do sistema analisado para garantir a forma mais adequada de medir a ecoeficiência, com indicadores e índices concretos.

Para Yang e Zhang (2018), a avaliação da ecoeficiência pode ser realizada por meio da razão entre o valor econômico dos bens ou serviços que são produzidos e os impactos ambientais que originam. Para realizar esse cálculo é necessário que o numerador e o denominador sejam integrados e normalizados para obter um determinado valor.

Ainda segundo os autores, outras abordagens podem ser utilizadas para avaliar a EE, incorporando a Análise do Ciclo de Vida (ACV) para avaliação ambiental, por exemplo, e até mesmo utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA), incorporando diferentes entradas e saídas em distintas dimensões, sendo essa apontada como a abordagem mais adotada pelos pesquisadores (KUOSMANEN; KORTELAINEEN, 2005; LORENZO-TOJA *et al.*, 2015).

Com base na revisão sistemática da literatura realizada neste trabalho, descrita nessa seção, foi investigada sobre a avaliação da ecoeficiência em diferentes áreas e setores industriais. Os estudos visam fornecer informações fundamentais que possibilitam caracterizar o objeto de estudo como ecoeficientes, ou seja, que possuem impacto ambiental mínimo em relação ao ganho econômico obtido. A seguir estão descritas as informações sobre modelos de ecoeficiência, coletadas por meio da revisão.

Em análises realizadas no campo dos equipamentos elétricos e eletrônicos, Barba-Gutierrez; Adenso-Diaz; Lozano (2009), apresentaram a avaliação da EE com o objetivo de conceder dados sobre os custos e os impactos ambientais gerados pela fabricação e até o descarte do produto, tanto para os consumidores que anseiam ter uma maior consciência do que consomem quanto para os *designers* e fabricantes, a fim de apresentar produtos de referência que possam servir de base para melhorar a ecoeficiência na produção de equipamentos elétricos e eletrônicos. Essas análises foram realizadas por meio de uma abordagem baseada em DEA, que consiste em resolver um modelo simples de programação linear que considera como saída o preço médio de varejo dos produtos e como entradas os dados da ACV para o impacto ambiental.

No trabalho realizado por Kondo e Nakamura (2006), foi possível identificar, por meio de um método proposto para análise de decisão baseada em programação linear, o máximo de ecoeficiência que pode ser obtido quando são otimizadas a gestão de resíduos e as estratégias de reciclagem desses produtos. Para Lozano; Adenso-Díaz; Barba-Gutiérrez (2011), a avaliação da ecoeficiência desses produtos, pode ajudar os fabricantes na tomada de decisão em relação ao *design* e preços, permitir que órgãos reguladores definam rótulos de ecoeficiência que correspondam aos diferentes níveis para cada produto, além de estabelecer qual o desempenho de ecoeficiência para o produto ser admitido no mercado.

A avaliação da EE também foi estudada na construção civil, visando analisar a ecoeficiência de materiais (TATARI; KUCUKVAR, 2011; TATARI; KUCUKVAR, 2012; HAMID; SHAFIQ, 2016; KIM *et al.*, 2016; PERERA *et al.*, 2017) e de outros processos envolvidos nesse setor industrial (HU; LIU, 2017; BELUCIO *et al.*, 2021). Nos estudos realizados por Tatari e Kucukvar (2011) e Tatari e Kucukvar (2012), foram apresentados modelos de avaliação de ecoeficiência com base em uma estrutura DEA para avaliar materiais de construção. Para isso, foram utilizados os conceitos de *Life Cycle Cost* (LCC), traduzido como Custo do Ciclo de Vida, e *Life Cycle Assessment* (LCA), conhecida como Análise do Ciclo de Vida (ACV), para calcular o índice de ecoeficiência. Ainda, foi utilizada DEA na modelagem, considerando a entrada de dados adquiridos na LCA e a saída como dados obtidos em LCC. Os autores afirmam que os resultados obtidos podem servir para tomada de decisão, comparando a ecoeficiência dos materiais de construção.

Perera *et al.* (2017) calcularam a ecoeficiência por meio da razão entre LCC e ACV a fim de selecionar qual o material mais ecoeficiente para ser utilizado na construção civil. Foi proposta uma ferramenta de apoio à decisão para ser utilizada por profissionais, pesquisadores e até institutos públicos e privados, a fim de selecionar combinações de materiais de construção de acordo com seu orçamento, desempenho de construção esperado e para minimizar as emissões geradas na fabricação dos materiais que são utilizados.

Hamid e Shafiq (2016) utilizaram a razão da pontuação econômica (custo do material e da mão de obra utilizada) e pontuação ambiental (dados da quantidade de emissão de carbono que é produzida pelo material utilizado) para definir o índice de ecoeficiência de estruturas de concreto armado, no qual deve ser considerado no

processo de tomada de decisão para a seleção do melhor projeto sustentável para estrutura de concreto armado. Já para Kim *et al.* (2016), para avaliar a ecoeficiência no desempenho e utilização do concreto, é necessário considerar, além da carga ambiental e dos custos de fabricação, a durabilidade do material utilizado em estrutura de concreto armado. Com esses três fatores, os autores obtiveram um índice de ecoeficiência do concreto, sendo possível analisar as técnicas que garantam que a fabricação do material analisado tenha a menor carga sobre o ambiente, menores custos de produção e um material com alta durabilidade.

Os estudos mostraram que avaliar a EE de um material requer compreender todo o contexto envolvido na fabricação, desde os recursos materiais envolvidos, que geram impactos ambientais, até os custos incorporados no material, na mão de obra envolvida, na logística etc. Todos esses fatores devem ser analisados e incorporados em um método ou modelos para que seja possível avaliar o desempenho, minimizar impactos, apoiando a tomada de decisão, que no caso dos estudos apresentados anteriormente, está relacionada em selecionar o material mais ecoeficiente.

Ainda analisando no contexto da construção civil, foram explorados dados da indústria de construção australiana entre os anos 1990 e 2013 para alimentar os modelos DEA, sendo possível identificar de forma quantitativa a ecoeficiência das indústrias da região e apontar medidas-chave para melhorar a EE, como a introdução e implementação de tecnologias de construção avançadas e ecoeficientes (HU; LIU, 2017).

As análises de ecoeficiência aplicadas na construção civil podem tanto facilitar a circulação de informações para as diferentes partes interessadas que estão envolvidas nesse setor, como ajudar na identificação e obtenção de materiais ambientalmente e economicamente eficientes (BELUCIO *et al.*, 2021). A ecoeficiência pode ser considerada um fator importante para avaliar a sustentabilidade, sendo que a aplicação e interpretação dos modelos propostos são capazes de mostrar um caminho a ser seguido que integra crescimento econômico, conservação de recursos e proteção ambiental (HU; LIU, 2017).

Para sistemas que envolvem recursos hídricos, a avaliação da EE foi realizada por Liu; Sun; Xu (2013), Mehmeti; Todorovic; Scardigno (2016), Molinos-Senante *et al.* (2016) e Gómez *et al.* (2018). Os estudos tiveram como finalidade avaliar sistemas que utilizam a água como principal recurso, analisando eficiência, desempenho

econômico, poluentes, entre outros fatores necessários para obter um índice de ecoeficiência, ambos visando melhorar a EE do sistema hídrico analisado.

Liu; Sun; Xu (2013) utilizaram um modelo com índice de entrada e saída por meio da Teoria dos conjuntos aproximados (*Rough Set Theory* - RST<sup>1</sup>) combinado com DEA e, com base nisso, analisaram a ecoeficiência de sistemas hídricos de regiões localizadas na China, sendo possível obter informações para constatar que fatores políticos, legislativos, históricos e econômicos, influenciam no resultado da ecoeficiência.

Mehmeti; Todorovic; Scardigno (2016) realizaram a avaliação da EE de um sistema de irrigação, em que foram levantados indicadores de ecoeficiência definidos como as relações entre o desempenho econômico (valor agregado total aos produtos devido ao uso da água na produção agrícola) e os impactos ambientais médios associados ao desempenho do sistema hídrico. Ao estimar um conjunto de indicadores propostos, a abordagem rendeu informações valiosas para identificar as melhores alternativas para o aprimoramento da ecoeficiência do sistema.

Nos estudos apresentados por Molinos-Senante *et al.* (2016) e Gómez *et al.* (2018), foi avaliada a ecoeficiência das estações de tratamento de águas residuais (ETARs). A ETAR é definida como uma unidade de produção que utiliza recursos materiais e energéticos para remover poluentes das águas residuais e descarregar a água que foi tratada no meio ambiente (GÓMEZ *et al.*, 2018). Com a avaliação realizada por Molinos-Senante *et al.* (2016), utilizando um modelo de distância direcional de Russell (*Weighted Russell Directional Distance Model* - WRDDM<sup>2</sup>), foi possível identificar as variáveis que têm impacto direto na EE, possibilitando focar nesses fatores para melhorar a ecoeficiência do sistema. Já na avaliação da EE apresentada por Gómez *et al.* (2018), foi utilizada a análise envoltória de dados (DEA), na qual permite integrar saídas e entradas, desejáveis ou indesejáveis. Os autores afirmaram que, com a metodologia proposta, era possível utilizá-la como uma estrutura de apoio a tomada de decisão com a finalidade de melhorar a sustentabilidade das ETARs.

---

<sup>1</sup> RST, é uma teoria matemática, proposta por Pawlak (1982), válida para lidar com informações incertas, imprecisas e vagas. Caracterizado como um método de seleção de atributos, importante e eficaz que pode preservar o significado dos atributos.

<sup>2</sup> WRDDM é um modelo matemático que foi inspirado pela equivalência da medida do gráfico de Russell aprimorada e da medida baseada em folgas (*slacks-based measure*). Pode ser aplicado a qualquer caso em que os pesos das entradas, de saídas desejáveis ou indesejáveis são conhecidos ou podem ser obtidos externamente (CHEN *et al.*, 2015).

Sanjuan *et al.* (2011) afirmaram que diferentes modelos são propostos para medir a ecoeficiência, sendo que a principal diferença entre esses é o sistema de ponderação utilizado para agregar os resultados ambientais. No estudo realizado pelos autores, foi utilizada a DEA para determinar técnicas mais ecoeficientes para a produção de queijo espanhol, avaliando diferentes cenários de produção. Para isso, primeiramente, foram avaliados os impactos ambientais, por meio da ACV, e a avaliação econômica, incorporando o valor econômico adicionado e o lucro líquido de cada cenário. Esses dois tipos de medições foram integrados em uma razão de ecoeficiência, utilizando um modelo de estimativa de peso baseado em DEA, sendo possível obter índices de ecoeficiência para cada cenário analisado, determinando um processo de produção mais ecoeficiente.

Abordagens utilizando ACV são frequentemente utilizadas para avaliar a EE, como mostram os estudos feitos por Hengen *et al.* (2016), Mendoza *et al.* (2019), Rebolledo-Leiva *et al.* (2019) e Vukelic *et al.* (2019). Com a avaliação do ciclo de vida é possível obter dados ambientais para o objeto de estudo, seja um produto ou serviço. Consiste em uma metodologia que avalia os encargos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, identificando energia e materiais utilizados e resíduos lançados ao meio ambiente, ainda avalia e implementa oportunidades para efetuar melhorias ambientais. A ACV engloba todas as diferentes etapas do ciclo de vida das mercadorias: extração e beneficiamento da matéria-prima, fabricação, transporte, distribuição, uso, reuso, manutenção, reciclagem e destinação final (ISO, 2006; FINNVEDEN *et al.*, 2009).

No trabalho feito por Hengen *et al.* (2016) foi apresentado um método de modelagem de ecoeficiência para sistemas de confinamento bovino, utilizando uma abordagem integrada, em que a ACV foi utilizada para classificar a análise de componentes principais e derivar os pesos de impacto ambiental, agregada com os custos dos recursos materiais utilizados no sistema analisado. Essa avaliação foi necessária para que os produtores se mantivessem informados adequadamente para tomar as decisões que beneficiavam tanto a si próprio, como também o meio ambiente e a saúde humana. Isso significa que, com o modelo de avaliação da ecoeficiência, os produtores passam a ter consciência dos custos de alimentação e outros gastos envolvidos para manter os animais, bem como em relação aos impactos no ambiente, com emissões entéricas, atmosféricas e na água.

Em um outro contexto, a ACV foi utilizada para o levantamento do impacto ambiental total (considerando as categorias de danos à saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos) para obter um único indicador de ecoeficiência na fabricação de luminárias (VUKELIC *et al.*, 2019). A ecoeficiência foi calculada como a razão entre o custo total do produto e o impacto ambiental total. Os resultados mostraram que, para uma melhor EE na fabricação de luminárias, assim como se espera para análises de EE, deve possuir de forma simultânea um menor impacto negativo ao meio ambiente com um menor custo.

Em outros estudos a ACV foi combinada com outras abordagens como: ACV + LCC, para obter indicadores normalizados de EE, e ser possível avaliar qual produto (fraldas descartáveis padrão e reprojctadas) era mais ecoeficiente (MENDOZA *et al.*, 2019); e ACV, com foco na pegada de carbono, em conjunto com DEA, para avaliar a ecoeficiência na produção de framboesa no Chile (REBOLLEDO-LEIVA *et al.*, 2019).

Percebe-se, com base nos estudos citados anteriormente, que para avaliar os impactos ambientais e os fatores econômicos em uma única análise, ou seja, para avaliar a ecoeficiência do objeto de estudo, pode ser utilizada uma combinação de ferramentas que envolvem coletar dados econômicos e dados ambientais, para incorporá-los em conjunto, visando um mesmo resultado, que é a obtenção da ecoeficiência. A aplicação dessas ferramentas de maneira separada pode ser realizada quando se quer obter uma única análise, o que não é o foco deste estudo.

Em pesquisas voltadas para avaliar a EE de cidades, considerando a definição comum de ecoeficiência (razão entre o valor econômico e as pressões ambientais), foram apresentados modelos baseados em DEA (abordagem fundamentada na programação linear), para avaliação da EE de cidades da China (YIN *et al.*, 2014; HE *et al.*, 2016; XU *et al.*, 2017; ZHANG, 2020), levando em consideração que a ecoeficiência para as cidades significa que as unidades de tomada de decisão devem utilizar menos recursos para produzir mais bens (ou serviços) e emitir menos poluentes. A ecoeficiência de uma cidade está em linha com seu nível de desenvolvimento econômico, com produção contínua mais limpa, economia circular, movimentos de conservação de energia e redução de emissões (YIN *et al.*, 2014). Com o modelo DEA foi possível comparar as amostras e observar as tendências de mudança em relação ao desempenho de recursos, ambiental e econômico ao longo dos anos, constatando que cidades com maiores ecoeficiências tendem a apresentar

um considerável progresso tecnológico (YANG; ZHANG, 2018). Ainda, cidades mais ecoeficientes focam na produção mais limpa, ao mesmo tempo que desenvolvem a economia da região (XU *et al.*, 2017).

Um outro estudo aplicou um modelo de *super-slack-based measure* (Super-SBM<sup>3</sup>) que, diferente dos modelos DEA clássicos, considera indicadores de produção indesejáveis, para avaliar a ecoeficiência e seus fatores influentes de cidades chinesas (ZHOU *et al.*, 2018). Em Wang *et al.* (2020) foi avaliada a ecoeficiência de alguns países europeus, por consumirem uma grande parte da energia global anualmente. Foi utilizado DEA e *Slacks-Based Measure* (SBM<sup>4</sup>) para avaliar a ecoeficiência de unidades de tomada de decisão (DMUs) e o Índice de Produtividade de Malmquist (*Malmquist Productivity Index* - MPI<sup>5</sup>) para analisar a mudança de eficiência, mudança tecnológica e mudança de produtividade total para DMUs. No modelo, como entradas de energia (fator ambiental analisado) foram utilizados dados de consumo de energia e parcela de energia renovável, e como entradas da economia, dados de produtividade do trabalho e de formação bruta de capital. Por outro lado, o Produto Interno Bruto (PIB) é usado como produto desejado, e emissões de CO<sub>2</sub> são usados como uma saída indesejada. Os resultados experimentais mostraram que os países analisados como um todo careciam de ecoeficiência em 2013–2017, o que implica que mais esforços foram necessários para melhorar sua ecoeficiência.

Masternak-Janus e Rybaczewska-Błażejowska (2016) apresentaram o método de análise de envoltório de dados para avaliação da ecoeficiência de regiões polonesas, a fim de promover a transformação sustentável das regiões, considerando o consumo de recursos naturais e emissões ambientais para avaliar o desempenho ambiental, já para o desempenho econômico foi expresso utilizando o PIB da região. Em um outro estudo realizado por esses autores, foram considerados os mesmos fatores econômicos e ambientais, porém, realizaram uma avaliação da ecoeficiência regional utilizando uma aplicação combinada de ACV e DEA – complementando com o modelo

---

<sup>3</sup> Super-SBM é um modelo matemático desenvolvido por Tone (2002) para avaliar a eficiência de uma unidade de tomada de decisão (DMU) eficiente referente ao ponto mais próximo na fronteira, exceto a si mesmo.

<sup>4</sup> SBM é um modelo matemático proposto por Tone (2001), na qual avalia a eficiência de DMUs referindo-se ao ponto mais distante da fronteira dentro de uma faixa.

<sup>5</sup> MPI foi introduzido por Caves *et al.* (1982), utilizado para calcular o desempenho relativo de uma DMU em diferentes períodos usando a tecnologia de um período base.

(BCC<sup>6</sup>), de Banker; Charnes; Cooper (1984), orientado a insumos (RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA; MASTERNAK-JANUS, 2018). Os autores esperavam que, com o método aplicado, além de ser possível medir a ecoeficiência, posteriormente, fosse possível comparar regiões e países em relação ao seu desempenho econômico e ambiental.

Métodos de avaliação da ecoeficiência também foram utilizados em outros processos, como na produção de minas de carvão (CZAPLICKA-KOLARZ *et al.*, 2015), em que o cálculo do indicador de ecoeficiência para a mina de carvão analisada foi realizado pela divisão do lucro antes de juros e impostos da mina pela avaliação do ciclo de vida ambiental da mina de carvão. Em um outro estudo foram analisadas empresas de mineração de classe mundial, em que, para quantificar a medida da ecoeficiência dessas organizações, foram incorporados ao modelo tradicional os benefícios ambientais relacionados às atividades das empresas, acreditando que isso pode ajudar na formulação de políticas para melhorar o desempenho econômico e evitar impactos indesejáveis no meio ambiente (OLIVEIRA; CAMANHO; ZANELLA, 2015); em continuação, foi realizada uma aplicação empírica de um modelo de ecoeficiência para grandes empresas de mineração, em que foram explorados indicadores econômicos e ambientais para analisar a ecoeficiência dessas organizações (OLIVEIRA; CAMANHO; ZANELLA, 2017).

Em atividades agrícolas, a avaliação da EE foi conduzida para quantificar os impactos ambientais potenciais por meio da ACV, combinados com os benefícios econômicos, utilizando DEA para calcular as pontuações de ecoeficiência de uma produção agrícola (ZHONG *et al.*, 2020). Em um outro estudo conduzido por Cheng *et al.* (2012), foi avaliada a EE da atividade agrícola na China por meio do método de análise envoltória de dados (DEA). O modelo DEA foi construído considerando material, energia e emissões como entradas e produtos como saídas, sendo que para calcular o índice de ecoeficiência foi utilizada a programação linear do modelo CCR<sup>7</sup>, desenvolvido por Charnes; Cooper; Rhodes (1978). O índice de ecoeficiência foi

---

<sup>6</sup> O modelo BCC, também conhecido como VRS (*Variable Return Scale*), foi desenvolvido por Banker; Charnes; Cooper (1984), e pressupõe que as DMUs avaliadas apresentem retornos variáveis de escala, o que substitui a premissa da proporcionalidade entre os *inputs* e *outputs* pela premissa da convexidade.

<sup>7</sup> O modelo CCR, também conhecido como CRS (*Constant Returns to Scale*), foi proposto por Charnes; Cooper; Rhodes (1978), em que utiliza retornos de escala constantes, ou seja, foi desenvolvido sob a hipótese da proporcionalidade entre os *inputs* e os *outputs*. O que significa que a variação dos *inputs* resulta uma variação proporcional dos *outputs*.

classificado em cinco classes de alta a baixa, identificando áreas geográficas com eficiência "muito baixa", "baixa", "moderada", "alta", "muito alta".

Nesse mesmo sentido, para avaliar a EE na produção agrícola, Masuda (2016) considerou no seu estudo a ecoeficiência como a receita agrícola dividida pelo potencial aquecimento global. O autor avaliou a ecoeficiência de uma fazenda, combinando resultados da programação linear (para obter os dados econômicos) e ACV (para calcular o potencial de aquecimento global total). Os indicadores de ecoeficiência (milhões de ienes por tCO<sub>2</sub>eq.) foram calculados dividindo a renda agrícola líquida maximizada (milhões de ienes) pelo potencial de aquecimento global total (GWP - *Global Warming Potential*) na fazenda.

Já em Song e Chen (2019) foi desenvolvido um método combinando a análise da pegada hídrica (WF, do inglês *Water Footprint*) como a abordagem da fronteira estocástica (SFA, do inglês *Stochastic Frontier Approach*) para estimar a ecoeficiência da produção de grãos na China. A análise WF foi empregada para quantificar o consumo de recursos e os impactos ambientais associados à produção de grãos. O modelo SFA quantificou o valor da saída de grãos que representa a única saída, e para constituir as entradas quantificou o capital, a mão de obra e as pegadas hídricas (consumo de recursos e impacto ambiental), estimando assim a ecoeficiência.

Com base nos estudos analisados, os modelos propostos para avaliação da EE em atividades agrícolas envolveram levantar dados, em relação aos recursos materiais utilizados, ambos analisando conjuntamente as questões econômicas e ambientais. Isso está atrelado em avaliar a viabilidade econômica e ambiental que uma agricultura fortemente preocupada em realizar práticas que impactam de menor forma o ambiente, mas que tenham um retorno econômico equivalente a essa política sustentável, que deve vir acompanhada de apoio governamental, para que a sociedade tenha maior consciência sobre questões agroambientais.

Em setores industriais, a avaliação da ecoeficiência é realizada para analisar o quanto esses setores afetam o meio ambiente ao mesmo tempo que proporcionam benefícios econômicos, como mostrado no estudo feito por Egilmez; Kucukvar; Tatari (2013). Nesse trabalho foram integradas a Avaliação do Ciclo de Vida de Entrada-Saída Econômica (EIO-LCA) e DEA para analisar a ecoeficiência dos setores de manufatura localizados nos Estados Unidos. Os autores consideraram a ecoeficiência como a razão entre a produção econômica total e o impacto ambiental global, que apontou o

quão era eficiente a atividade econômica em relação aos impactos ambientais. Para combinar as categorias ambientais e econômicas em um único valor de ecoeficiência, foi utilizado o DEA, sendo possível por meio de programação linear, obter como resultado o índice de ecoeficiência para todos os setores de manufatura analisados.

Já em Zheng e Peng (2019) foi avaliada a ecoeficiência de indústrias de uso intensivo de energia, cadeias e *clusters* industriais. Para isso, foram analisados dados da indústria química, indústria de materiais de construção, indústria metalúrgica e indústria de energia térmica de 2004 a 2015. Foi utilizada DEA, por meio de um modelo CCR clássico orientado a entradas, assumindo que as saídas são fixas, fazendo com que uma maior atenção seja dada às entradas.

Por fim, foram analisados estudos que apresentaram modelos para avaliar a EE em processos industriais. Ng *et al.* (2014) analisaram a ecoeficiência de tecnologias utilizadas para fazer a ligação do cobre com o cobre. Foram comparados a tecnologia de baixa temperatura para ligação de cobre (LTCCB, do inglês *Low Temperature Copper to Copper Bonding*) com o método convencional (*Conventional Method - CM*). Foi adotada uma representação gráfica para apresentar a análise da ecoeficiência realizada para ambos os processos. Segundo a interpretação que deve ser realizada, os autores afirmaram que pode acontecer a dificuldade de concluir qual a tecnologia é mais ecoeficiente, pois a análise depende das prioridades de quem irá utilizar a tecnologia. Se o objetivo é utilizar uma tecnologia que tem menor impacto no ambiente, deve ser utilizada a tecnologia LTCCB. Mas, se o foco for reduzir o custo, a melhor escolha é a tecnologia CM.

No estudo feito por Leme Jr. *et al.* (2018), foram utilizados indicadores de ecoeficiência para medir o desempenho de um sistema de produção, visando uma produção mais limpa. Para analisar a ecoeficiência de um centro de usinagem, foi proposto um modelo *Lean-Green* combinando *Single Minute Exchange of Die* (SMED) com *Carbon Footprint* (CFT). A avaliação da ecoeficiência foi realizada pela divisão do valor do produto pelo impacto ambiental, objetivando a redução do desperdício de tempo, recursos e emissões de gases de efeito estufa.

Já em um outro estudo que realizou a avaliação da ecoeficiência de um processo de manufatura, Lucato; Vieira Jr.; Santos (2013) apresentaram uma proposta conceitual, em que foram combinados indicadores para obter um único índice de ecoeficiência de um equipamento, sendo possível posteriormente expandir e avaliar a ecoeficiência

para uma área de produção. Os autores propuseram um modelo que, quando aplicado, permite avaliar por meio de um gráfico radar qual é a ecoeficiência do processo.

Com base nos artigos pesquisados na RSL sobre a avaliação de EE aplicada aos mais diferentes setores, em conjunto com a busca sistemática, especificamente sobre modelos de avaliação da EE na AT, foi possível observar que não existia um estudo que tenha seguido esse tema, o que significa uma oportunidade de preencher essa lacuna da literatura.

A partir disso, foram levantados na revisão modelos aplicados nos diferentes setores industriais, para melhor embasar a formulação conceitual da proposta. Com isso, teve-se uma base inicial, explorando como os modelos são desenvolvidos e/ou aplicados nas indústrias e quais os caminhos e estruturas utilizadas. Essa busca global contribuiu para atingir o objetivo deste trabalho, que é desenvolver o modelo para os processos de aspersão.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos artigos discutidos nos parágrafos anteriores, os quais foram obtidos por meio da revisão sistemática da literatura, a fim de extrair os modelos de avaliação da ecoeficiência aplicados nos diferentes setores industriais.

De maneira geral, além do setor de aplicação, os 40 artigos selecionados e discutidos anteriormente, foram classificados de acordo com o campo de aplicação (Produto/Processo/Serviço) e o tipo de modelo utilizado para avaliar a EE. O campo de aplicação se refere a que finalidade o modelo de avaliação de ecoeficiência foi destinado, analisado se os indicadores de EE utilizados em cada modelo teve foco em avaliar o produto, o processo, o serviço ou ambos.

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONTINUA)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Equipamentos elétricos e eletroeletrônicos	Produto	Barba-Gutierrez; Adenso-Diaz; Lozano (2009)	DEA	- preço de varejo - ACV: em Eco-Indicador 99 (saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos)
	Produto	Lozano; Adenso-Díaz; Barba-Gutiérrez (2011)	DEA	- preço do produto - ACV: LCI: em Eco-Indicador 99 (saúde humana, qualidade do ecossistema, recursos naturais)
	Processo/Serviço	Kondo; Nakamura (2006)	WIO-LP - Entrada-saída de resíduos - programação linear	- PIB - Emissão de CO <sub>2</sub>
Construção Civil	Produto	Tatari; Kucukvar (2011)	DEA	- LCC (custos de compra, instalação, operação, manutenção, reparo, substituição e custo negativo do valor residual) - ACV (acidificação, toxicidade ecológica, eutrofização, aquecimento global, esgotamento de combustível fóssil, smog, ingestão de água, saúde humana, esgotamento de ozônio e alteração de habitat)
	Produto	Tatari; Kucukvar (2012)	DEA	- LCC (custos de compra, instalação, manutenção, reparo e substituição) - ACV (acidificação, toxicidade ecológica, eutrofização, aquecimento global, esgotamento de combustível fóssil, poluição atmosférica, ingestão de água, saúde humana, destruição da camada de ozônio e alteração do habitat)

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONTINUAÇÃO)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Construção Civil	Produto/Serviço	Hu; Liu (2017)	DEA	- Trabalho de construção realizado; Pessoas empregadas; Valor agregado bruto da indústria; Emissões de CO <sub>2</sub>
	Produto	Hamid; Shafiq (2016)	Pontuação econômica/pontuação ambiental	- Custo de construção - Emissões de CO <sub>2</sub>
	Produto	Kim <i>et al.</i> (2016)	(CE + MC) /SL	- CE é o custo ambiental - MC é o custo de fabricação - SL é a vida útil do concreto
	Produto	Perera <i>et al.</i> (2017)	Pontuação econômica/pontuação ambiental	- LCC (custo de construção, custo de reparo e manutenção, custo de operação do edifício e custo de fim de vida do edifício) - ACV (potencial de aquecimento global, destruição do ozônio estratosférico, acidificação da terra e da água, eutrofização, formação de ozônio troposférico e esgotamento dos recursos de energia não renováveis)
	Produto/Serviço	Belucio <i>et al.</i> (2021)	DEA	- entradas: Categorias de impacto ambiental (mudanças climáticas, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, acidificação terrestre) e energia primária não renovável; - saída: valor presente líquido (NPV).
Recursos hídricos e tratamento de água	Processo/Serviço	Liu; Sun; Xu (2013)	DEA	- entradas (investimento de capital, força de trabalho e consumo de água) - saídas (Benefício econômico, Controle de poluição da água etc.)

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONTINUAÇÃO)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Recursos hídricos e tratamento de água	Processo/Serviço	Mehmeti; Todorovic; Scardigno (2016)	TVA/ESc	- TVA é o valor agregado total - ESc é impactos ambientais (Mudanças climáticas, Esgotamento de combustíveis fósseis, Esgotamento de água doce, Eutrofização, Toxicidade Humana, Acidificação, Ecotoxicidade aquática, Ecotoxicidade terrestre, Depleção mineral)
	Processo/Serviço	Gómez <i>et al.</i> (2018)	DEA	- Resultados desejáveis (custo de pessoal, custo de manutenção) - Resultado indesejável (emissões de GEE)
	Processo/Serviço	Molinos-Senante <i>et al.</i> (2016)	DEA	- saídas desejáveis (custo de pessoal, custo de manutenção) - saída indesejável (emissões de CO <sub>2</sub> )
Indústria alimentícia	Processo	Sanjuan <i>et al.</i> (2011)	Pontuação econômica/pontuação ambiental	- Lucro líquido - ACV (aquecimento global, eutrofização e água captada para limpeza).
Agropecuária	Produto/Processo	Hengen <i>et al.</i> (2016)	Pontuação econômica/pontuação ambiental	- Custo econômico da dieta - ACV (Emissões entéricas totais, Emissões totais de estrume, Nutrientes totais, Emissões atmosféricas totais, Emissões totais de água, Solo total / uso da terra)
	Processo/Serviço	Rebolledo-Leiva <i>et al.</i> (2019)	DEA	- ACV, com foco na pegada de carbono; LCI - entradas: fertilizantes, resíduos de poda e pesticidas; - saída: produção, pegada de C.
	Processo	Zhong <i>et al.</i> (2020)	DEA	- ACV, LCI, (Consumo de energia, Consumo de água, aquecimento global, acidificação ambiental e eutrofização).
	Processo/Serviço	Cheng <i>et al.</i> (2012)	DEA	- valor econômico dos produtos e serviços - impactos ambientais envolvidos no processo de cultivo

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONTINUAÇÃO)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Agropecuária	Serviço	Song; Chen (2019)	SFA - abordagem da fronteira estocástica	- pegada hídrica (WF); - valor do grão
	Processo/Serviço	Masuda (2016)	LP - programação linear	- renda agrícola líquida; - ACV (aquecimento global total)
Usinas termelétricas e térmicas	Processo/Serviço	Guo <i>et al.</i> (2017)	DEA	- entradas (consumo de carvão, consumo de água doce, depreciação de capital e custo operacional); - saídas (eletricidade, calor e emissão de GEE)
Sustentabilidade das cidades e regiões	Produto/Processo/Serviço	Xu <i>et al.</i> (2017)	DEA	- entradas (consumo de recursos hídricos, terrenos para construção, população empregada e consumo de energia) - saída desejável (PIB); - saídas indesejáveis (emissões e poluição ambiental)
	Produto/Processo/Serviço	Zhou <i>et al.</i> (2018)	DEA	- entradas (capital, força de trabalho, abastecimento de água, recurso de energia, recurso de terra) - saída desejável (PIB) - saídas indesejáveis (emissões e poluição ambiental)
	Produto/Processo/Serviço	Wang <i>et al.</i> (2020)	DEA	- entradas (consumo de energia, produtividade do trabalho, participação da energia renovável no consumo total de energia, produtividade da formação bruta de capital); - saídas (PIB e emissões de CO <sub>2</sub> )
	Produto/Processo/Serviço	Tianqun; Yuepeng (2015)	DEA	- entradas (consumo de energia, consumo de água, terreno para construção) - saída (PIB, emissões e poluição ambiental)

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONTINUAÇÃO)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Sustentabilidade das cidades e regiões	Produto/Processo/Serviço	Yang; Zhang (2018)	DEA	- entradas (capital, mão de obra, área de terreno para construção, consumo de energia, consumo de água) - saída desejável (PIB) - saída indesejável (poluentes ambientais)
	Produto/Processo/Serviço	Yin <i>et al.</i> (2014)	DEA	- entradas (consumo de água, consumo de energia, área de terreno para construção, investimento em ativos fixos, número de pessoas empregadas) - saída desejável (PIB) - saídas indesejáveis (emissões e poluição ambiental)
	Produto/Processo/Serviço	He <i>et al.</i> (2016)	DEA-EEF (análise da pegada ecológica emergética)	- entradas (investimento de capital fixo, pessoa empregada, EEF do consumo) - saída desejável (PIB) - saídas indesejáveis (EED de emissão de poluentes)
	Produto/Processo/Serviço	Zhang (2020)	DEA	razão do PIB e a pressão ambiental (consumo de recursos e poluição ambiental)
	Produto/Processo/Serviço	Masternak-Janus; Rybczewska-Błażejowska (2016)	DEA	- entrada (indicadores de consumo de recursos naturais, indicadores de pressão ambiental) - saída (PIB, valor adicionado bruto (VAB))
	Produto/Processo/Serviço	Rybczewska-Błażejowska; Masternak-Janus (2018)	DEA	- ACV – LCI (saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos) - PIB

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONTINUAÇÃO)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Mineração	Processo	Czaplicka-Kolarz <i>et al.</i> (2015)	EBIT/ACV	- ACV (influência na saúde humana, qualidade do ecossistema, uso de recursos, emissão de gases de efeito estufa, demanda cumulativa de energia, esgotamento de combustíveis fósseis) - EBIT é o lucro antes de juros e impostos da mina
	Serviço	Oliveira; Camanho; Zanella (2017)	DEA	- dimensão econômica (valor agregado) - dimensão ambiental (uso de recursos renováveis, uso de recursos não renováveis, conservação, dispersão ambiental)
	Serviço	Oliveira; Camanho; Zanella (2015)	DEA	- dimensão econômica (valor agregado) - dimensão ambiental (uso de energia renovável, uso de materiais reciclados, uso de energia não renovável, emissões e poluentes ambientais)
Manufatura	Processo	Ng <i>et al.</i> (2014)	C/CFP	- C é o Custo da produção - CFP é a pegada de carbono
	Processo	Egilmez; Kucukvar; Tatari (2013)	EIO-ACV + DEA	- EIO é Entrada-Saída Econômica (produção econômica total) - ACV (emissões de GEE, uso de energia, consumo de água, geração de resíduos perigosos e emissões tóxicas)
	Processo/Serviço	Zheng; Peng (2019)	DEA	- Eficiência de recursos (consumo de energia abrangente, produção unitária de trabalho, entrada de capital de produto unitário) - eficiência ambiental (emissão de gases e resíduos)

QUADRO 2. RESUMO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA OBTIDOS POR MEIO DA RSL

(CONCLUSÃO)

Setor de aplicação	Campo de Aplicação	Autor/ano	Modelo para avaliação da EE	Composição dos indicadores de EE
Manufatura	Processo	Leme Jr. <i>et al.</i> (2018)	Modelo Lean-Green: Valor do produto (total de tempo de produção – SMED) /impacto ambiental (emissão de carbono – CF)	- SMED é Single Minute Exchange of Die (troca rápida de ferramenta) - CF é a pegada de carbono
	Produto/Processo	Lucato; Vieira Jr.; Santos (2013)	Modelo conceitual: valor do produto/influência ecológica	- quantidade de peças - energia consumida - recursos materiais do equipamento consumidos
	Produto/Processo	Mendoza <i>et al.</i> (2019)	Pontuação econômica/pontuação ambiental	- LCC (custo da matéria prima, custo de fabricação, custo de transporte e custo de gestão de resíduos) - ACV (potencial de esgotamento abiótico de elementos (ADP), potencial de esgotamento abiótico de combustíveis fósseis (ADP), potencial de acidificação (AP), potencial de eutrofização (EP), potencial de ecotoxicidade aquática de água doce (FAETP), potencial de aquecimento global (GWP), potencial de toxicidade humana (HTP), potencial de ecotoxicidade aquática marinha (MAETP), potencial de destruição da camada de ozônio (ODP), potencial de criação de oxidantes fotoquímicos (POCP) e potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP).
	Processo	Vukelic <i>et al.</i> (2019)	TFC/TEI	- TFC é o custo total do produto - TEI é o impacto ambiental total (ACV: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos).

### 2.3. ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica consiste em um processo de manufatura, especificamente para fabricação de revestimentos resistentes a diferentes meios agressivos. Os materiais de aspersão podem ser utilizados na forma de arame, pó, cordões, sendo possível utilizar ligas metálicas, cerâmicas e polímeros para aplicar e formar revestimentos.

Pawlowski (2008) define a Aspersão Térmica como um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não metálicos são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato previamente preparado, formando um revestimento. Os revestimentos aplicados por aspersão podem apresentar poros, partículas não fundidas, óxidos e estruturas distintas, que são geradas dependendo do tipo de material a ser aplicado e do processo utilizado para deposição, pois podem variar parâmetros como a temperatura do processo e a velocidade das partículas, por exemplo (MENDES, 2010). A Figura 2 apresenta um esquema do processo de aspersão térmica.

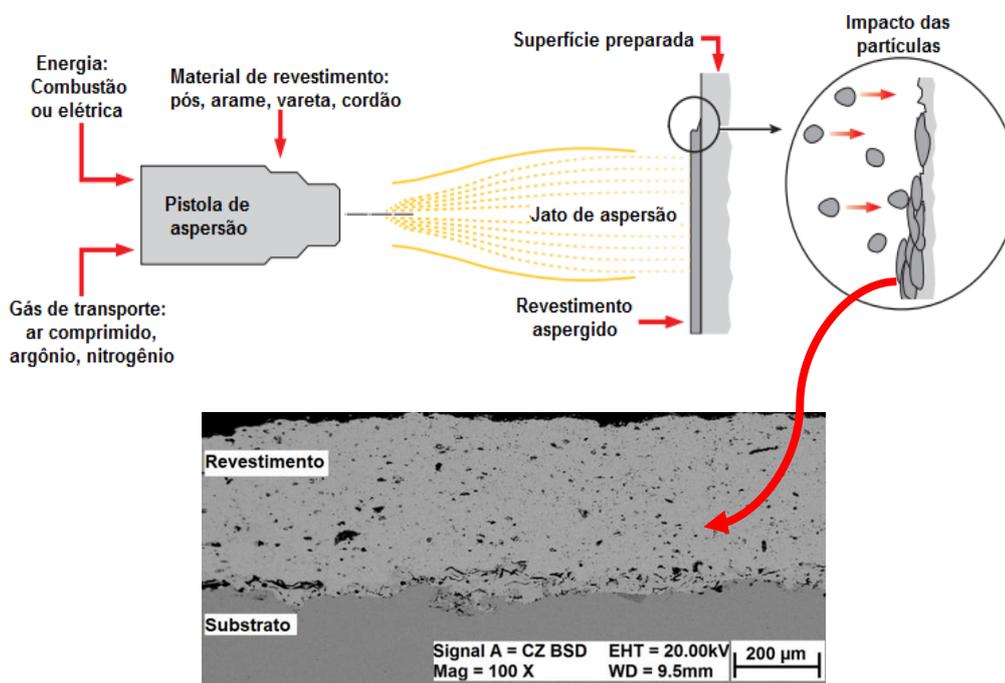


FIGURA 2. ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA

FONTE: ADAPTADO DE METCO (2016)

O avanço tecnológico trouxe o desenvolvimento de novos e melhores equipamentos e materiais para aspersão térmica, criando inúmeras oportunidades dentro da

engenharia de superfície. É um método eficaz, em termos de custo, para preparar revestimentos amplamente utilizados em diversos setores, como aeroespacial, automotivo, indústria elétrica e eletrônica, aplicações médicas, papel e celulose, petróleo e indústrias químicas, fabricação de cerâmica e vidro e outros processos para proteção contra corrosão e desgaste (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). A *Grand View Research* (GVR, 2022), aponta que o mercado mundial de revestimentos aplicados por aspersão térmica foi avaliado em US\$ 10,73 bilhões em 2021, e deve ter um crescimento de 4,8% entre os anos 2022 a 2030.

Existem diferentes técnicas de aspersão térmica, as quais podem ser diferenciadas a partir da forma de geração de energia no equipamento de aspersão para aquecimento das partículas, o que pode ocorrer por meio de gases de combustão ou por arco elétrico (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014; PAWLOWSKI, 2008), conforme classificação apresentada na Figura 3. Além disso, cada processo consome um tipo de material que pode estar na forma de pó, arame ou cordão. A quantidade de matéria-prima consumida varia para cada processo, o que impacta em um fator na avaliação sustentável dos processos (SERRES *et al.*, 2010).

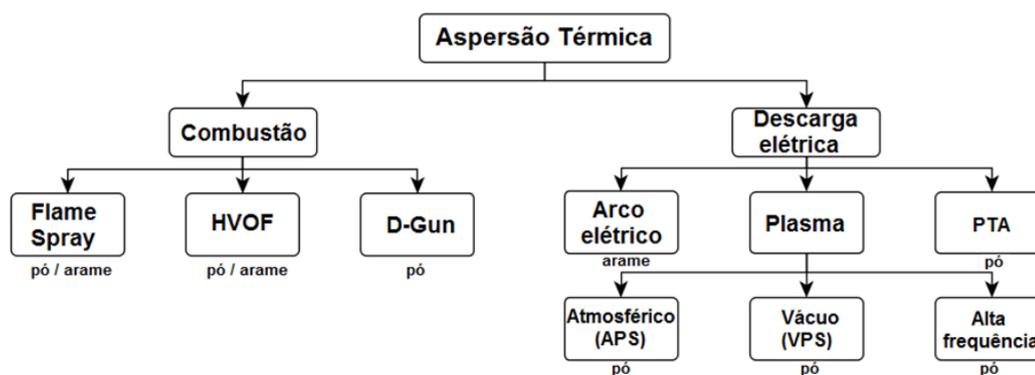


FIGURA 3. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

FONTE: ADAPTADO DE FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS (2014)

Tais processos de aspersão apresentam diferentes temperaturas e velocidades, como mostra a Figura 4. Para Berger (2015), a velocidade das partículas na aplicação é um fator importante para obtenção de camadas com estrutura densa, em que processos de maior velocidade, chamados supersônicos, como HVOF e *Cold Spray* possibilitam a obtenção de revestimentos com maior densidade e melhores características microestruturais e mecânicas.

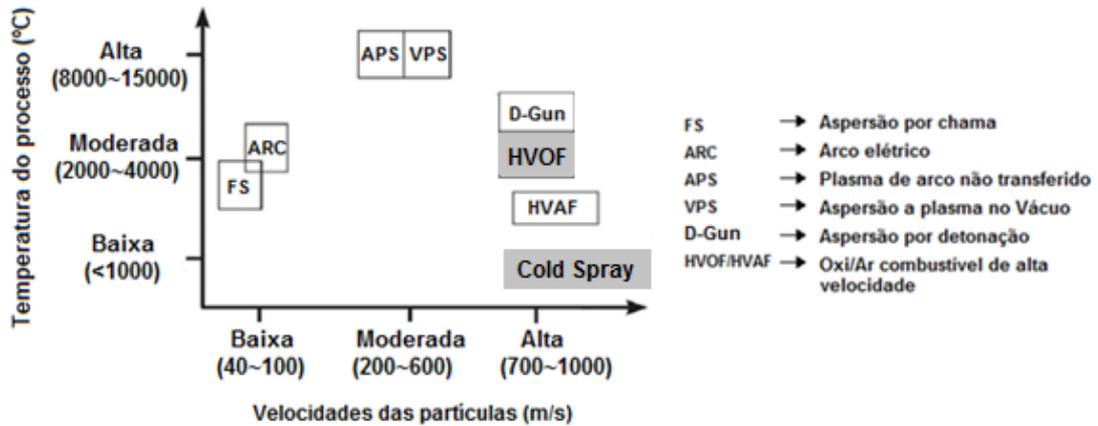


FIGURA 4. APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COMBINAÇÃO DA T (°C) X V (M/S) PARA OS DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

FONTE: ADAPTADO DE BERGER (2015)

É importante considerar na AT a combinação ideal do material a ser utilizado com a seleção da pistola de aspersão e o seu equipamento para uma aplicação específica, pois a otimização dessa combinação pode economizar energia, matéria-prima e tempo de aplicação na obtenção de peças revestidas (VISWANATHAN *et al.*, 2021).

Em cada etapa do processo de aspersão, assim como em qualquer outra tecnologia de aplicação de revestimento superficial, existem 'pontos de contato' com o meio ambiente, como mostrado na Figura 5.

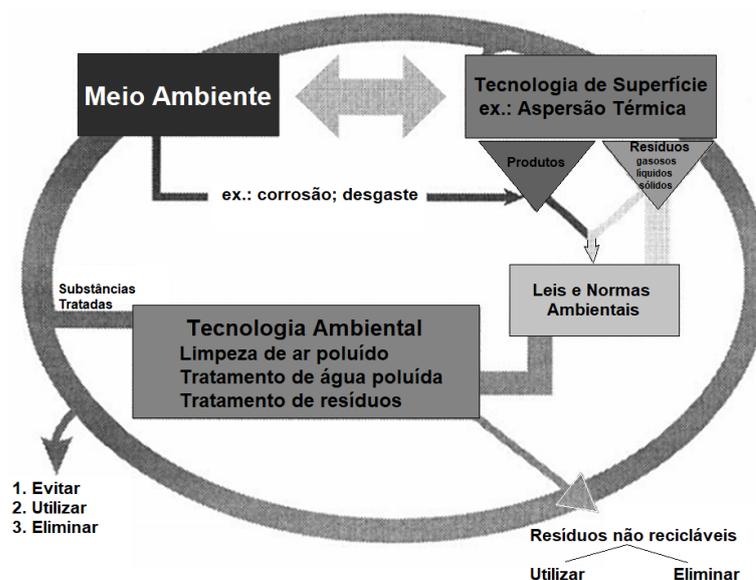


FIGURA 5. RELAÇÕES AMBIENTAIS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

FONTE: ADAPTADO DE STEINHÄUSER *ET AL.* (2000)

Os 'pontos de contato' mencionados por Steinhäuser et al. (2000), se referem às interações que existem entre materiais (metálicos, cerâmicos, poliméricos) com o meio ambiente, necessitando da utilização de uma tecnologia, capaz de proteger materiais contra corrosão e desgaste, originados pelo contato com o meio ambiente. As técnicas de superfície, como a aspersão térmica, é uma alternativa viável de produzir revestimentos protetores, gerando inúmeros contatos com o meio, fornecendo produtos, ao mesmo tempo que gera resíduos, provenientes do processo.

Os aspectos presentes no processo de aspersão e no revestimento (produto resultante), devem ser analisados e discutidos em relação aos impactos no meio ambiente. As técnicas de aspersão térmica devem ser aplicadas adequadamente, de forma que utilizem a menor quantidade possível dos recursos essenciais, ou seja, minimizando o consumo de energia, materiais e água. Além disso, é necessário garantir que o processo não gere danos ecológicos ou que, caso ocorram, sejam os menores possíveis; isso significa evitar ou reduzir os resíduos de poeira, a radiação e os ruídos, por exemplo, sendo que esses requisitos devem estar de acordo com a legislação vigente. O revestimento aspergido não deve apresentar materiais que sejam prejudiciais à saúde e segurança ambiental e humana (STEINHÄUSER *et al.*, 2000).

Dentre os processos de AT, o HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) é considerado uma das principais técnicas, sendo reconhecido pelo depósito de revestimentos com baixa porosidade, alta adesão e alta resistência ao desgaste (JACOBS; HYLAND; DE BONTE, 1998; MATTEN *et al.*, 2011) e como um processo limpo, considerado a melhor possibilidade de substituir a técnica que utiliza cromo duro (PICAS; FORN; MATTHÄUS, 2006; HAZRA; SABIRUDDIN; BANDYOPADHYAY, 2012).

Outro processo de aspersão conhecido como *Cold Spray* (aspersão a frio) é a mais recente técnica dentro da AT. Segundo Villafuerte (2014), os principais benefícios desta abordagem incluem a capacidade de fabricar revestimentos superficiais com maior vida útil do que os outros processos de aspersão.

O processo de aspersão a frio (*cold spray*) é considerado uma tecnologia verde de alto desempenho para aplicação de revestimentos, pois apresenta características importantes em termo de sustentabilidade, tais como: não gera emissões prejudiciais, tendo menor impacto ao meio ambiente; permite reparar componentes em vez de substituí-los; pode ser utilizado para substituir outros processos de deposição menos

ecológicos, como a cromagem, que produz emissões de cromo hexavalente, elemento carcinógeno humano e, portanto, com uso indesejável (WIDENER; OZDEMIR; CARTER, 2018).

Os parâmetros relacionados ao impacto ambiental presentes nos processos de aplicação de revestimentos por aspersão térmica foram levantados por Serres *et al.* (2010). Esses parâmetros devem ser considerados quando se pretende realizar um estudo dos impactos que o processo de aspersão gera ao meio ambiente. Alguns desses impactos são: emissões atmosféricas (gases), geração resíduos sólidos (particulados da matéria-prima utilizada na deposição), também relacionada à eficiência do processo, o que pode aumentar todos os consumos como gás, material de aplicação e eletricidade. A avaliação dessas fontes de impacto ambiental pode fornecer uma visão da necessidade de melhorar o processo, buscando evitar ou eliminar os efeitos negativos ao meio ambiente e à saúde humana que são gerados durante a deposição do revestimento.

Todos os processos de aplicação de revestimentos geram impactos no meio ambiente e na saúde humana. Por isso, deve-se destacar a importância de quantificar, para cada processo, os impactos ambientais decorrentes da utilização dos recursos materiais e energéticos, bem como as emissões atmosféricas e os resíduos gerados.

A comparação dos impactos ambientais de diferentes processos de revestimentos é considerada por Moign *et al.* (2009) como uma tarefa difícil devido à quantidade de parâmetros que cada técnica apresenta, o que pode influenciar no resultado. Os autores mostraram que processos de aspersão térmica podem apresentar grande efeito nos impactos ambientais quando comparados com processos de galvanoplastia, sendo esse último altamente poluente e gerador de grandes quantidades de emissões gasosas e hídricas devido à utilização de diferentes produtos químicos no processo. A partir disso, depreende-se que se torna fundamental dispor de estudos que apresentem os impactos ambientais dos diferentes processos de aplicação de revestimentos, a fim de facilitar as análises comparativas e a escolha do processo menos agressivo ao meio ambiente.

Tendo por base a visão geral sobre os processos de aspersão térmica apresentados, pode-se inferir que esse processo é importante para os diferentes setores industriais que necessitam de revestimentos protetores a fim de garantir aumento na vida útil dos seus equipamentos, máquinas ou peças industriais.

Além disso, notou-se, com base nos estudos apresentados, que tal processo de aplicação de revestimento apresenta diversas características e parâmetros a serem considerados quando são analisados os aspectos sustentáveis (considerando nesse trabalho fatores ambientais, associados com os fatores econômicos) do processo. Tais fatores estão diretamente associados aos recursos consumidos (matéria-prima e energia), às emissões no meio ambiente (gases poluentes na atmosfera e no solo), e à segurança e aos riscos associados à saúde humana.

Apresentado o conceito de aspersão térmica e compreendida a importância de analisar esse processo quanto às questões sustentáveis, foi utilizado um método de tomada de decisão para selecionar quais indicadores de Ecoeficiência podem ser empregados em um modelo de avaliação da ecoeficiência, ou seja, propor um modelo com os indicadores adequados para serem utilizados na ecoeficiência dos processos de aspersão térmica.

#### **2.4. MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO: AHP (*ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*)**

Para definir os indicadores de avaliação de ecoeficiência a serem adotados como referência inicial, dentre os apresentados Quadro 2 (pág. 29), foi utilizado um método multicritério de tomada de decisão. Por uma questão de simplicidade e objetividade, neste trabalho, foi adotado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), desenvolvido por Saaty (1980), razão pela qual considerou importante apresentar uma breve revisão teórica sobre esse método.

Inicialmente, quando se tem uma situação que pode ser analisada por diferentes fatores, é necessário decidir qual estratégia será adotada. A existência de duas ou mais alternativas para serem escolhidas, mostra a necessidade de uma decisão assertiva. Esse processo de tomada de decisão pode ser feito por meio da aplicação de diferentes métodos e ferramentas, utilizando diferentes objetivos (PENADÉS-PLÀ *et al.*, 2016). Os métodos derivados da matemática aplicada e da pesquisa operacional são considerados úteis que a tomada de decisão ocorra em um terreno sólido (BRUNELLI, 2015).

Métodos de tomada de decisão multicritério são representados por uma ampla família de métodos que tem como objetivo selecionar a melhor opção ou a alternativa disponível entre um conjunto específico de opções possíveis de serem utilizadas. Os

critérios de decisão podem ser em forma de atributos, que são representados por características ou medidas de desempenho, ou em forma de objetivos, que são as métricas nas quais representam os interesses dos tomadores de decisão (SCOTT; HO; DEY, 2012).

O AHP é um método de análise hierárquica, proposto por Saaty (1980), para ser utilizado no apoio à tomada de decisão multicritério. Considerado como um dos principais modelos matemáticos utilizados para esse apoio a tomada de decisão, o método AHP é utilizado em situações para priorizar os critérios e selecionar alternativas, obtendo como resultado uma lógica hierárquica.

Devido às características de simplicidade, facilidade de uso e grande flexibilidade, o AHP vem sendo estudado constantemente, utilizado na maioria das publicações, as aplicações relacionadas à tomada de decisão multicritérios. Em estudos que envolvem investigar questões sustentáveis em processos, produtos e/ou serviços, o AHP foi aplicado para analisar impactos ambientais (RAMANATHAN, 2001), para avaliar práticas sustentáveis em indústrias de manufatura (GUPTA *et al.*, 2015; MARIMIN *et al.*, 2018), para a seleção ideal de tecnologias limpas (PROMENTILLA *et al.*, 2018), analisar a produção e consumo sustentáveis (MANGLA *et al.*, 2017), entre outros.

Na etapa inicial da aplicação do método AHP, o problema é representado em uma estrutura hierárquica, em que os especialistas utilizam para avaliar a importância relativa dos critérios de decisão e usam comparações de pares, nas quais são atribuídas com base em uma escala pré-determinada de importância relativa, contendo valores que variam de 1 a 9 (SAATY, 1980).

Para cada nível, faz-se a comparação dos critérios, obtendo o peso de cada critério. A avaliação do próximo nível é realizada analisando os critérios de nível inferior e multiplicando por cada peso. Todo o processo é repetido até que seja alcançada a finalidade principal de decisão, na qual está no nível superior. De forma geral, o método AHP visa a obtenção de uma medida geral para cada alternativa considerada, fazendo isso por meio de uma comparação par a par de cada parte presente em um determinado nível hierárquico (BRUNELLI, 2015).

Mu e Pereyra-Rojas (2018) resumem em seis passos como deve ser conduzida uma análise de decisão (como exemplo, analisam a compra de um carro) utilizando o processo de hierarquia analítica (AHP):

- i. Desenvolvimento de um modelo para a decisão: para isso deve-se dividir a decisão em uma hierarquia de objetivos, critérios e alternativas;
- ii. Derivar as prioridades (pesos) para os critérios estabelecidos: nesse passo, a importância dos critérios é feita comparando os pares considerando a meta desejada para derivar seus pesos. É necessário verificar a consistência dos julgamentos, ou seja, deve-se revisar os julgamentos a fim de garantir que se tenha um nível razoável de consistência em relação a proporcionalidade e transitividade;
- iii. Derivar as prioridades locais (preferências) para as alternativas: nesse momento, é feita a derivação das prioridades ou das alternativas em relação a cada critério separadamente (esse processo é similar ao passo anterior, pois deve ser realizada a comparação das alternativas aos pares com relação a cada critério). Em seguida, deve-se verificar e ajustar a consistência conforme necessário;
- iv. Derivar as prioridades gerais (é a síntese do modelo): nesse passo, todas as prioridades das alternativas obtidas devem ser combinadas como uma soma ponderada, considerando o peso de cada critério e estabelecendo as prioridades gerais das alternativas. Com essa análise, a alternativa que apresentar uma maior prioridade geral é considerada a melhor escolha;
- v. Realização da análise de sensibilidade: é realizado um estudo a fim de analisar como as mudanças nos pesos dos critérios podem afetar o resultado. Com essa análise de sensibilidade é possível entender a razão que levou aos resultados obtidos;
- vi. Tomada de decisão final: nesse último passo, a decisão a ser tomada deve ser baseada nos resultados da síntese do modelo e na análise de sensibilidade.

Com base nos passos descritos previamente, pode-se observar que esse processo não determina a decisão a ser tomada, na verdade, os resultados devem ser interpretados como um projeto de preferências e alternativas que são baseadas no nível de importância obtido para os critérios definidos, nos quais devem ser levados em consideração os julgamentos comparativos do tomador de decisão. Isso significa que o método AHP permite determinar a alternativa que é mais consistente com os critérios e o nível de importância que são dados pelo indivíduo que está conduzindo o processo de tomada de decisão (SAATY; VARGAS, 2012; BRUNELLI, 2015; MU; PREREYRA-ROJAS, 2018).

Após a contextualização do AHP, este trabalho apresenta uma descrição teórica sobre um outro tipo de método que foi utilizado na construção do modelo proposto, o qual é baseado nos conceitos sobre Análise Envoltória de Dados (DEA), conforme subtópico a seguir.

## **2.5. DEA (*DATA ENVELOPMENT ANALYSIS*) – ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS**

A principal abordagem que introduziu a medição da eficiência produtiva foi apresentada inicialmente por Farrell (1957), o qual foi motivado pela necessidade de desenvolver técnicas e modelos capazes de avaliar a produtividade. O autor visou propor uma forma de obter medidas de eficiência que poderiam ser aplicáveis a qualquer organização produtiva, independentemente do tamanho e setor.

A partir do estudo de Farrell, os autores Charnes; Cooper; Rhodes (1978) desenvolveram uma técnica para avaliar a eficiência relativa de unidades de produção de múltiplas entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*), que ficou conhecida como *Data Envelopment Analysis* – DEA, em português ficou conhecida como Análise Envoltória de Dados.

A técnica DEA, apresentada no final da década de 70, ficou conhecida inicialmente como modelo CCR (**C**harnes, **C**ooper e **R**hodes) ou *Constant Returns To Scale* (CRS), tendo como finalidade apresentar uma metodologia capaz de avaliar um conjunto de unidades de tomada de decisão (DMUs) que podem ser comparáveis, sendo possível identificar as melhores práticas e, por meio disso, formar uma fronteira eficiente. Essa fronteira eficiente é formada a partir da classificação como eficiente que pode ser de mais de uma unidade. Além disso, com essa metodologia, é possível medir o nível de eficiência das unidades fora da fronteira, dispondo da possibilidade de identificar *benchmarks*, para que as unidades ineficientes que foram analisadas pudessem ser comparadas.

A DMU é definida como qualquer entidade a ser avaliada em relação a sua capacidade de converter entradas em saídas. Esse tipo de análise pode ser feito para uma variedade de atividades, desde instituições educacionais (escolas, bibliotecas públicas) até empresas de diferentes setores e portes. Desta forma, a definição de DEA é conhecida como uma abordagem de programação linear não paramétrico, capaz de avaliar a eficiência e produtividade de DMUs, permitindo que várias entradas

e saídas sejam consideradas ao mesmo tempo, sem qualquer suposição sobre a distribuição de dados (COOPER; SEIFORD; TONE, 2006).

No modelo CCR, a eficiência é definida como uma razão entre a soma ponderada dos *outputs* e a soma ponderada dos *inputs*, conforme modelo de programação fracional linear (eq. 2), estabelecido por Charnes; Cooper; Rhodes (1978).

$$\text{Máx } h_0 = \frac{\sum_{j=1}^s u_j Y_{j0}}{\sum_{i=1}^r v_i X_{i0}} \quad \text{eq. (2)}$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{j=1}^s u_j Y_{jk}}{\sum_{i=1}^r v_i X_{ik}} \leq 1 \text{ para } k = 1, 2, \dots, n \quad \text{eq. (3)}$$

$$u_j, v_i \geq 0, \forall j, i \quad \text{eq. (4)}$$

onde:

$h_0$  = eficiência da DMU 0 (zero)

$r$  = quantidade total de inputs

$s$  = quantidade total de outputs

$k$  = quantidade total de DMU

$Y_{jk}$  = quantidade de output  $j$  para a DMU  $k$

$X_{ik}$  = quantidade de input  $i$  para a DMU  $k$

$u_j$  = peso referente ao input  $j$

$v_i$  = peso referente ao input  $i$

$Y_{j0}$  = quantidade de output  $j$  para a DMU0 (DMU observada)

$X_{i0}$  = quantidade de input  $i$  para a DMU0 (DMU observada)

As variáveis são ponderadas por pesos, calculadas utilizando programação linear, visando maximizar a eficiência de cada DMU, quando comparadas ao conjunto de referência (fronteira de eficiência). Para resolver o problema de programação fracional linear, é necessário transformá-lo em um problema de programação linear, conforme modelo dos multiplicadores (eq. 5).

$$\text{Máx} h_0 = \sum_{j=1}^s u_j Y_{j0} \quad \text{eq. (5)}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^r v_i X_{i0} = 1 \quad \text{eq. (6)}$$

$$\sum_{j=1}^s u_j Y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i X_{ik} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2, \dots, n \quad \text{eq. (7)}$$

$$u_j \text{ e } v_i \geq 0 \forall j, i \quad \text{eq. (8)}$$

A eq. (6) trata-se da função objetivo do modelo de programação linear, enquanto a eq. (7) é um conjunto de restrições e a eq. (8) representa que as entradas e saídas devem ser maiores que zero. De forma geral, tem-se que o modelo CCR compara as características das DMUs de forma global, analisando e comparando umas com as outras, sem fazer distinção entre suas características, não considerando a ordem de grandeza de produção ou a complexidade quanto à geração de produtos.

Após a publicação do modelo CCR, Banker, Charnes e Cooper (1984) apresentaram um novo modelo DEA, que ficou conhecido como modelo BCC (**B**anker, **C**harnes e **C**ooper) ou *Variable Returns To Scale* (VRS), em que pressupõe retornos variáveis da escala das unidades avaliadas, o que permitiu dividir a eficiência em eficiências técnicas e de escala. Isso significa que ao utilizar esse modelo, os valores das entradas podem alterar de forma maior, menor ou constante as saídas, as quais não são necessariamente proporcionais.

Com o uso do modelo BCC é possível realizar comparações de DMUs de diferentes portes em uma mesma análise. A diferença entre os modelos CCR e BCC é que, neste último, é adicionado uma constante ( $u$ ) à soma ponderada dos produtos, a qual é responsável por indicar se os retornos de escala são decrescentes ( $u < 0$ ), crescente ( $u > 0$ ) ou constante ( $u = 0$ ). O modelo BCC primal orientado aos *inputs* está representado na eq. (9).

$$\text{Max} h_0 = \sum_{i=1}^s u_i Y_{i0} + u \quad \text{eq. (9)}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^r v_j x_{j0} = 1 \quad eq. (10)$$

$$\sum_{i=1}^s u_i Y_{jk} + u - \sum_{j=1}^r v_j x_{jk} \leq 0 \text{ para } k = 1, 2, \dots, n \quad eq. (11)$$

onde:

$u_i$  = peso referente ao output i

$v_j$  = peso referente ao input j

$X_{jk}$  = quantidade de input j para a DMU k

$Y_{ik}$  = quantidade de output i para a DMU k

$X_{j0}$  = quantidade de input j para a DMU0 (DMU observada)

$Y_{i0}$  = quantidade de output i para a DMU0 (DMU observada)

$r$  = quantidade total de inputs

$s$  = quantidade total de outputs

$n$  = quantidade total de DMU

$u$  = coeficiente de retorno a escala

$u_i$  e  $v_j \geq 0$

$u$  sem restrição de sinal

Os modelos CCR (CRS) e BCC (VRS) geram fronteiras de eficiência diferentes, bem como medidas de eficiência distintas. Ainda, um modelo DEA pode ser subdividido de acordo a orientação e projeção dos planos ineficientes da fronteira, como: modelo orientado para entradas (*inputs*), que visa minimizar as entradas enquanto os níveis de saída são obtidos de forma satisfatória; e modelo orientado para saídas (*outputs*), em que tem como finalidade maximizar as saídas, sem exigir mais de quaisquer valores de entrada observados (JI; LEE, 2010).

A DEA é capaz de identificar, para cada DMU considerada ineficiente, um conjunto de referências em que compõe uma ou mais DMUs eficientes, com a finalidade de utilizá-las como referência para melhoria (COOPER; SEIFORD; ZHU, 2011; LEE; KIM, 2014), sendo todo esse processo conhecido como *benchmarking*.

Com o *benchmarking* realizado na DEA é possível avaliar uma determinada DMU, se está perto ou não de DMUs que estão localizadas na chamada fronteira eficiente (Figura 6), ou seja, onde estão as DMUs que mais se destacam, pois essas que são capazes de fornecer informações necessárias para obtenção de melhorias, para que práticas sejam executadas pelas DMUs ineficientes.

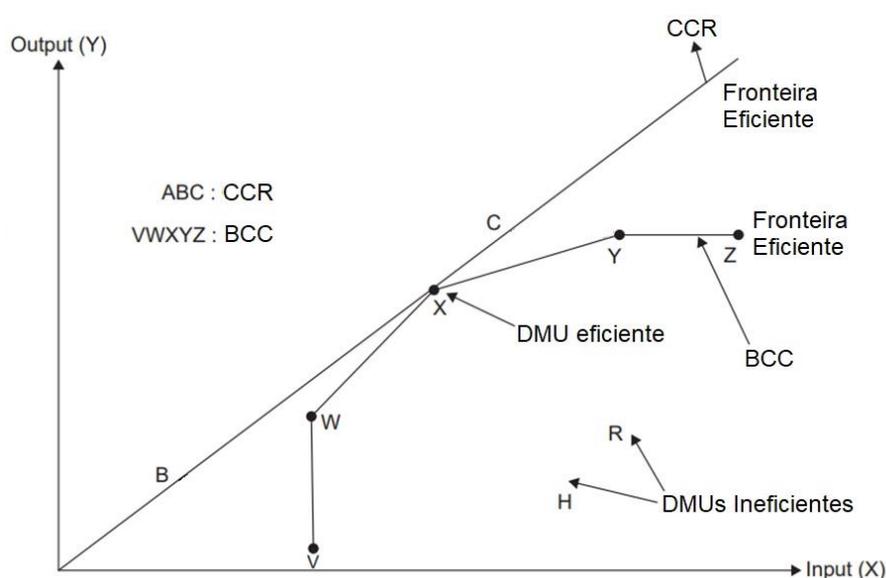


FIGURA 6. FRONTEIRA DE EFICIÊNCIA DEA: MODELOS CCR E BCC

FONTE: ADAPTADO DE CUBBIN E TZANIDAKIS (1998) E GANDHI E SHANKAR (2014)

A fronteira eficiente, mostrada na Figura 6, tanto para o modelo CCR (representado por uma reta) e BCC, representa uma relação ótima entre *input* e *output*. As DMUs consideradas eficientes estão localizadas na linha que representa a fronteira, enquanto as ineficientes estão abaixo. Com a fronteira é possível obter parâmetros necessários para que uma DMU ineficiente seja capaz de se tornar eficiente. Ainda, tem-se que as DMUs que se encontram na fronteira eficiente são vistas como *benchmarking*.

Para que uma DMU seja classificada como totalmente (100%) eficiente, tendo como base as evidências disponíveis, é fundamental que o desempenho de outras DMUs não apresentem indícios que algumas de suas entradas ou saídas podem ser melhoradas sem que piore algumas de suas outras entradas ou saídas. Essa definição evita a necessidade de recorrer a suposições de pesos, que são selecionados *a priori* e devem refletir a importância relativa dos diferentes insumos ou produtos. Além disso,

não é necessário especificar explicitamente as relações formais que supostamente existem entre as entradas e as saídas. Este tipo básico de eficiência, conhecido como “eficiência técnica” em economia, pode, entretanto, ser estendido a outros tipos de eficiência quando dados como preços, custos unitários etc., estão disponíveis para uso com DEA (COOPER; SEIFORD; ZHU, 2011).

A técnica DEA pode ser aplicada para diversos campos, como mostra a classificação feita por Mardani *et al.* (2017), em que foram levantados trabalhos que aplicaram DEA em diversas áreas, como: eficiência ambiental, economia e ecoeficiência, questões de eficiência energética, energia renovável e sustentável, eficiência hídrica, desempenho energético, economia de energia, eficiência energética integrada e outras áreas de aplicação. Isso mostra que a DEA é amplamente utilizada e estudos que estendem o campo de aplicação favorecem a utilização e desenvolvimento dessa técnica.

Para este estudo, a DEA foi utilizada para avaliar a ecoeficiência dos processos de aspersão térmica, de forma a gerar *insights*, com base nos *inputs e outputs* levantados no estudo. Devido a sua vasta aplicação e possibilidade de integrar as variáveis (indicadores de ecoeficiência) em um único modelo para gerar uma escala de ecoeficiência, optou-se por aplicar essa técnica.

Após os conceitos apresentados sobre os principais temas da pesquisa, o próximo capítulo descreve toda a abordagem metodológica utilizada para atingir o objetivo deste trabalho, de desenvolver o modelo de EE para AT, utilizando como base o método AHP, para seleção dos indicadores, e a DEA, para obtenção dos resultados numéricos da EE dos processos investigados.

### 3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Inicialmente, para validar o objetivo geral proposto, foram formuladas três hipóteses:

H1 - O levantamento de indicadores de ecoeficiência ligados diretamente ao processo de aspersão térmica poderá orientar a avaliação das suas técnicas frente às questões econômicas e ambientais;

H2 - Um modelo conceitual de avaliação da ecoeficiência do processo de aspersão, baseado em indicadores de ecoeficiência e em parâmetros do processo, permitirá analisar, sob o ponto de vista de dois aspectos da sustentabilidade (econômico e ambiental), os diferentes processos de aspersão térmica, que utilizam diferentes parâmetros, materiais e recursos tecnológicos, de acordo com o objetivo esperado da aplicação da camada protetora;

H3 - Compreender como a ecoeficiência dos processos de aspersão pode ser fundamental para as empresas atenderem aos requisitos colocados pelas demandas de desenvolvimento sustentável.

Seguindo com o desenvolvimento deste trabalho, a fim de analisar as hipóteses estabelecidas, a metodologia foi dividida em três fases, conforme mostradas na Figura 7. As fases I, II e III foram realizadas por etapas, necessárias para atingir o objetivo.

- i. Identificação dos Modelos de EE – obtida por meio da Revisão Sistemática da Literatura: em que foram realizadas buscas em bases de dados, selecionados os artigos que atendessem aos critérios estabelecidos na pesquisa, selecionados os modelos de avaliação da ecoeficiência, finalizando com a identificação dos indicadores de ecoeficiência;
- ii. Desenvolvimento do modelo de EE: após a primeira fase concluída, foi aplicado o método AHP, com a finalidade de selecionar os indicadores mais alinhados com o processo a ser analisado, finalizando a segunda fase com a construção do modelo de avaliação da EE e definição do limite do sistema;
- iii. Aplicação do modelo de EE para AT: com o modelo conceitual definido, foram identificados os ecoindicadores para a AT, feita a coleta de dados para todos os *inputs* e *outputs* em uma empresa especializada em aplicação de revestimentos, descrita na próxima seção, e realizada a aplicação do modelo não paramétrico

DEA, desde a importação dos dados, escolha do modelo DEA, execução do *software* e análise da EE para os processos de aspersão.

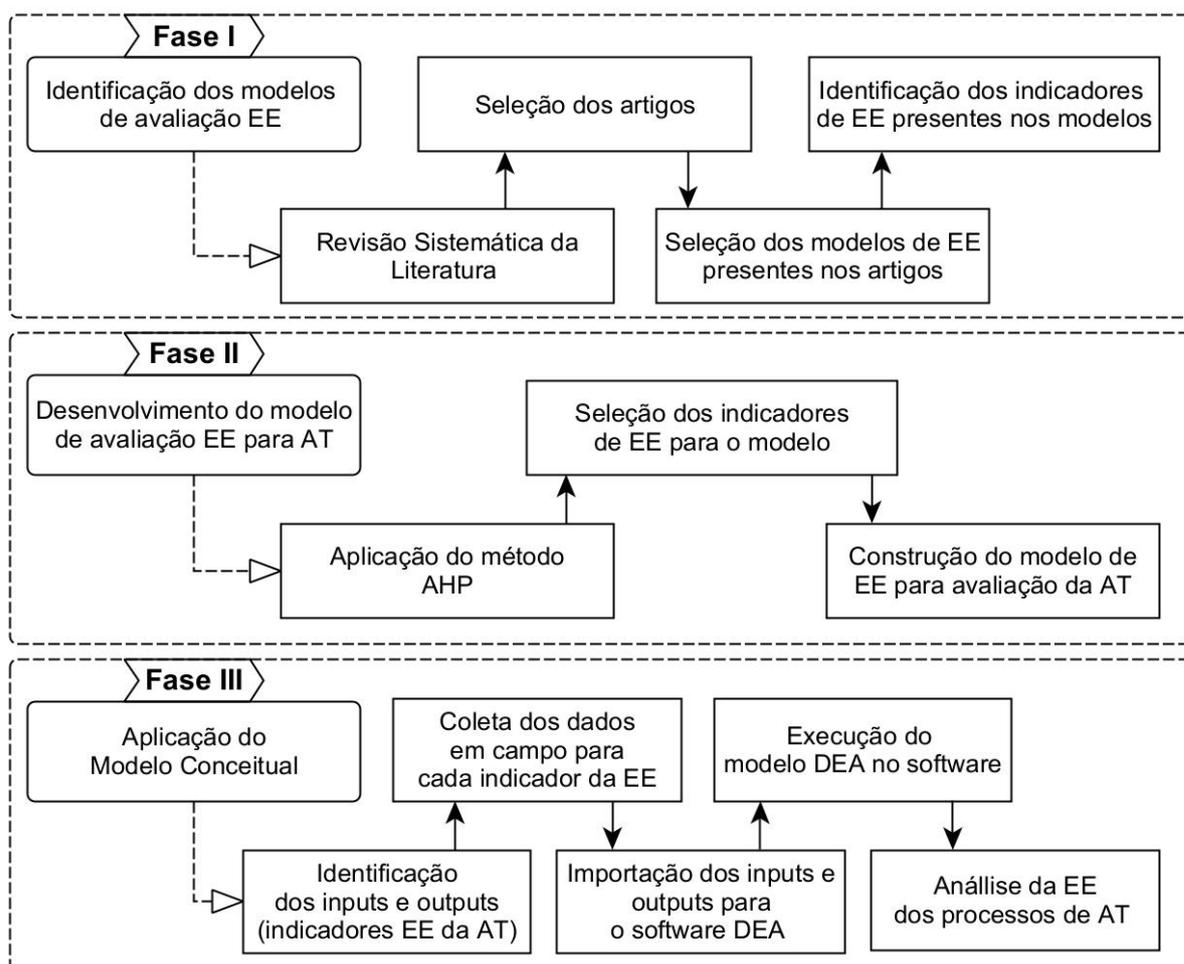


FIGURA 7. FASES DA METODOLOGIA UTILIZADA

### 3.1. FASE 1: IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS DE EE - RSL

Para o desenvolvimento inicial do trabalho, foi realizada uma pesquisa teórica, baseada em uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a fim de levantar modelos de avaliação da ecoeficiência aplicados em diferentes áreas e setores. O processo de RSL envolveu três fases principais: **planejamento da revisão, condução da revisão e relatório da revisão** (KITCHENHAM; CHARTERS 2007; BRERETONA *et al.*, 2007). Em cada fase foram estabelecidas etapas específicas que são mais bem detalhadas na sequência. A Figura 8 apresenta as etapas que foram seguidas nessa primeira fase da metodologia.

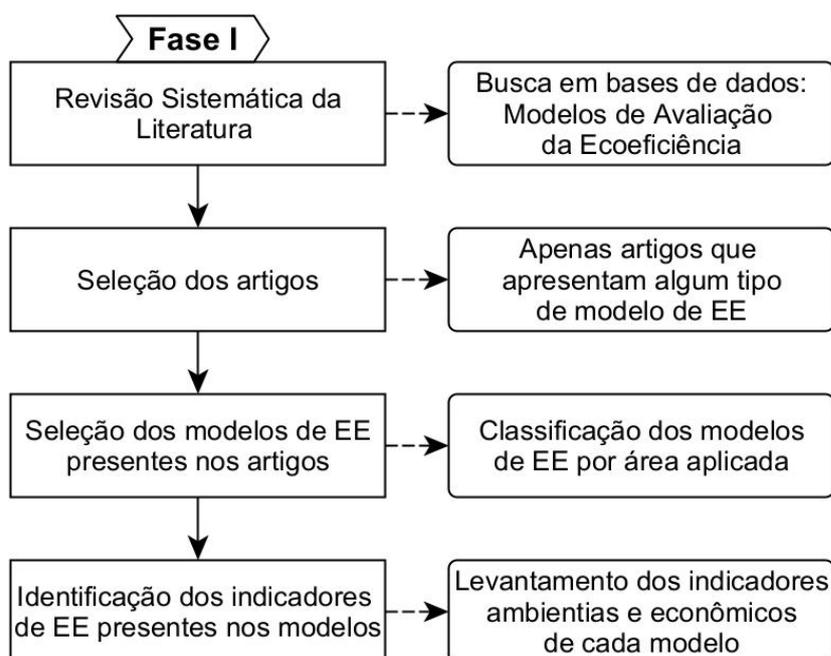


FIGURA 8. DESCRIÇÃO DA FASE I DA METODOLOGIA

No **Planejamento da Revisão** foram realizadas duas etapas: formular o problema de pesquisa e desenvolver e validar o protocolo de revisão. Assim, foi identificada a necessidade da pesquisa, especificada a questão de pesquisa e desenvolvido o protocolo de revisão, com os filtros estabelecidos e aplicados na pesquisa (Quadro 3).

Na fase da **Condução da Revisão** foram seguidas as etapas de: pesquisar a literatura (pesquisar em bases de dados e selecionar o maior número possível de estudos primários que estejam relacionados à questão de pesquisa); triagem para inclusão (avaliar a relevância dos estudos primários selecionados na etapa anterior); avaliar a qualidade (investigar se os estudos primários selecionados possuem uma ‘qualidade’, com baixo viés e com alta validade de informações), extração de dados (extrair as informações com precisão dos estudos primários selecionados); e analisar e sintetizar dados (reunir e resumir as informações extraídas dos estudos primários selecionados). Essas etapas estão descritas com maiores detalhes a seguir.

Para **pesquisar a literatura** foram utilizadas as bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*; tais bancos de dados eletrônicos são a fonte predominante de trabalhos com a literatura publicada. Para a pesquisa, utilizou as seguintes palavras-chave: “*Eco-efficiency*”, “*Assessment*” e “*Model*”, bem como *string* de busca: “*Eco-efficiency*” AND “*Assessment*” AND “*Model*”.

Na fase de **triagem para inclusão**, os artigos foram excluídos conforme os critérios de exclusão estabelecidos, seguindo a questão da pesquisa, incluindo os artigos que se encontravam no escopo da pesquisa. Inicialmente, foram lidos os títulos e posterior resumo, para excluir e selecionar os artigos. O Quadro 3 apresenta o protocolo da pesquisa, contendo os aspectos utilizados para busca e seleção dos artigos para RSL.

QUADRO 3. PROTOCOLO DA PESQUISA

<b>Aspectos para seleção dos artigos</b>	
Base de Dados	Scopus, Web of Science, Science Direct
<i>String</i> de busca utilizados	<i>“Eco-efficiency” AND “Assessment” AND “Model OR Method OR Framework”</i>
<i>Campos de pesquisa</i>	Título do artigo, resumo e palavra-chave
Idioma	Inglês e português
Intervalo de data de publicação	Não foi estabelecido limite para o intervalo de datas
Critérios de Exclusão	Não se encontra no escopo da pesquisa (em título e/ou resumo); Artigos duplicados; Artigos de conferência ou capítulo de livro Não apresenta desenvolvimento e/ou aplicação de modelos de avaliação de ecoeficiência.
Critérios de Inclusão	Artigos que estavam no escopo da pesquisa Artigos que atendiam aos filtros utilizados

Posteriormente, na etapa de **avaliar a qualidade** dos textos selecionados, foi realizada a leitura completa dos textos e considerou se os artigos apresentavam informações claras e objetivas sobre modelos de avaliação da ecoeficiência.

Assim, foram identificados e selecionados estudos primários e extraídos (etapa **extrair**), analisados e sintetizados os dados referentes ao tema (etapa **analisar**), conforme critérios estabelecidos no Quadro 3.

Os resultados obtidos da pesquisa bibliográfica triagem e avaliação da qualidade A última fase, **Relatório da Revisão**, foi composta pela etapa de **reportar as descobertas** a fim de descrever de forma sistematizada as informações obtidas da revisão da literatura.

Os resultados obtidos da pesquisa bibliográfica, após finalizadas as etapas de triagem e avaliação da qualidade, estão apresentados no diagrama de fluxo mostrado na Figura 9.

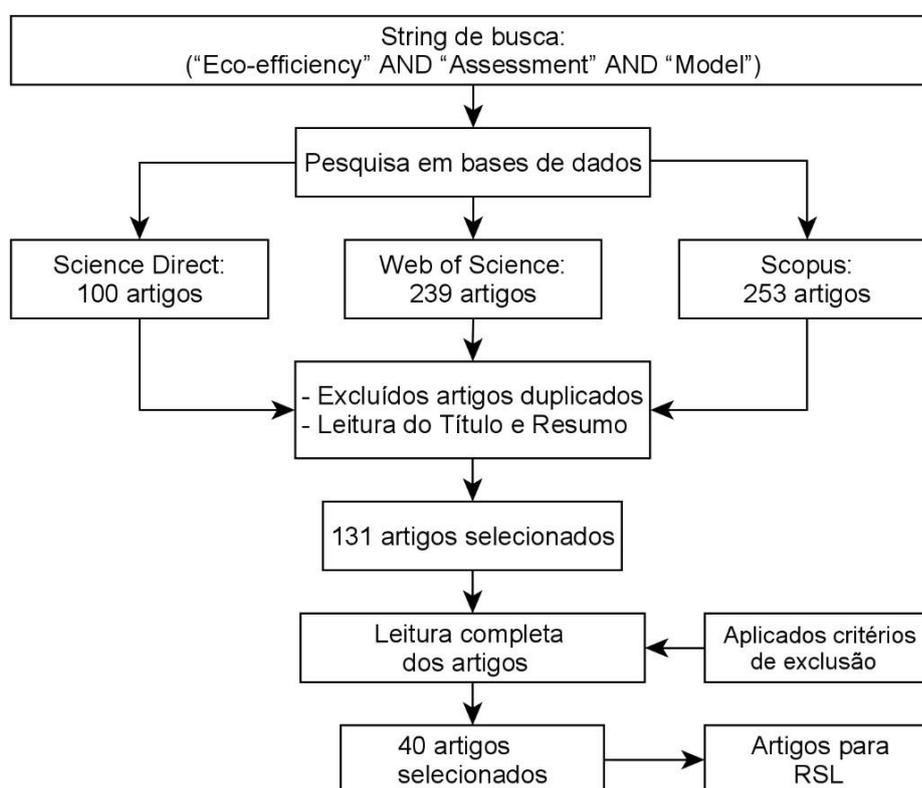


FIGURA 9. PESQUISA DE LITERATURA E AVALIAÇÃO PARA INCLUSÃO DE ARTIGOS PARA RSL

Inicialmente, com a busca nas três bases de dados, foram encontrados 592 artigos, conforme fluxograma apresentado na Figura 9. Todos os artigos obtidos foram exportados para o *software* StArt® (*State of the Art through Systematic Review*), uma ferramenta que fornece um suporte para realizar o processo de revisão sistemática, facilitando a classificação dos artigos para selecionar quais serão utilizados para RSL (FABBRI *et al.*, 2016).

Dos 592 artigos iniciais, foram excluídos 200 trabalhos por estarem duplicados. Foi realizada a leitura do título e resumos dos 392 artigos, sendo selecionados os que

estavam alinhados com o objetivo deste trabalho. 131 artigos avançaram para próxima etapa de leitura completa dos artigos. Por fim, foram incluídos para a RSL 40 artigos que apresentavam um modelo de avaliação da ecoeficiência, pois a finalidade era levantar os tipos de modelos existentes que são utilizados para avaliar processos, produtos ou serviços quanto à ecoeficiência, conforme apresentado no tópico **2.2. MODELOS DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA**. O Quadro 2 (pág. 29), apresenta o resultado obtido na RSL, em que os artigos foram analisados quanto à área em que foi aplicado o modelo de avaliação da ecoeficiência, como mostra a Figura 10. Foram identificadas 9 áreas, sendo as mais representativas: a avaliação da ecoeficiência de cidades e regiões o foco de estudo de 9 artigos (23%), seguidos da construção civil e manufatura, que apresentaram 7 artigos (18%) cada.

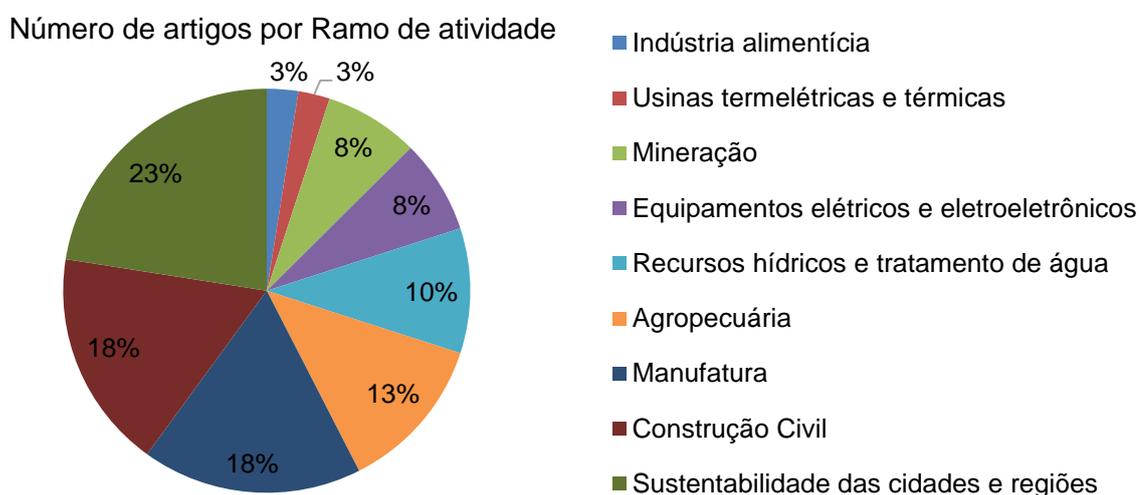


FIGURA 10. PUBLICAÇÃO POR RAMO DE ATIVIDADE

Os modelos de EE são aplicados em diferentes setores, dado que o interesse de analisar dois pilares (ambiental e econômico) do tripé da sustentabilidade e, especificamente, avaliar a ecoeficiência, é inerente para todas as áreas distintas identificadas. Com a identificação dessas áreas, foi possível agrupar os modelos quanto ao ramo de atividade, sendo um ponto importante, pois, entende-se que se o pesquisador estiver interessado em avaliar a ecoeficiência de um processo de fabricação de uma empresa o ideal é optar pela escolha de um dos modelos classificado no grupo “Manufatura”.

Além disso, caso o pesquisador tenha interesse em avaliar a EE de uma construção ou reforma, por exemplo, podem ser consultados os modelos classificados na área

“Construção Civil”. Essa análise pode ser feita para diferentes processos, produtos ou serviços que se deseja avaliar. Isso o direciona para um menor número de opções a serem analisadas, para definir qual modelo é o mais adequado para ser aplicado no seu cenário.

Feita essa análise, direcionando para qual grupo (dentre os ramos de atividades levantados) deve ser feita a avaliação da ecoeficiência para o processo, produto ou serviço desejado, sendo o próximo passo realizar um levantamento de todos os indicadores de EE (ambientais e econômicos) presentes em cada modelo.

Essa etapa garantiu que todos os indicadores fossem extraídos e, posteriormente, alinhados com o processo a ser analisado, conforme estabelecida na fase 2 deste trabalho. Ainda, devem ser eliminados os indicadores que se repetem, pois pode acontecer que dois modelos ou mais apresentem o mesmo indicador utilizado para avaliar a EE.

### 3.2. FASE 2: DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE EE

Ao finalizar a primeira fase da pesquisa, foi realizada a segunda fase da metodologia, conforme etapas seguidas e apresentadas na Figura 11.

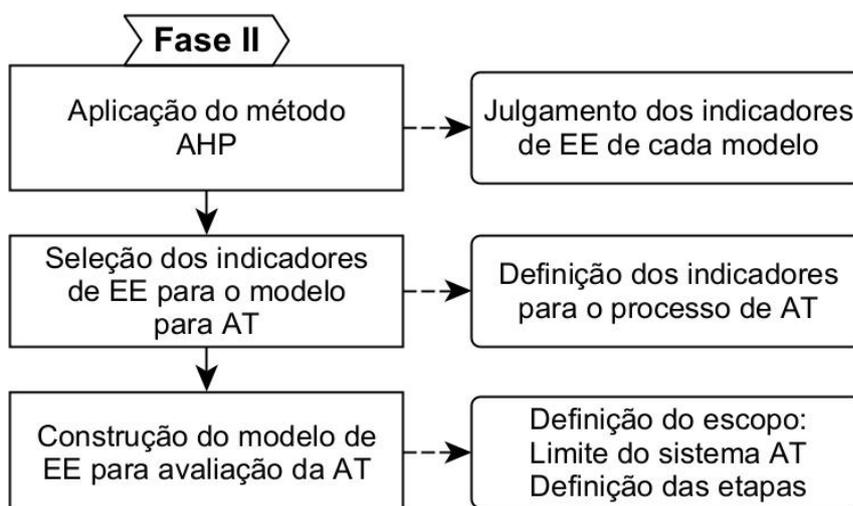


FIGURA 11. DESCRIÇÃO DA FASE II DA METODOLOGIA

A fase II foi caracterizada por resultar em um modelo conceitual de avaliação da EE, baseado nos indicadores selecionados na Fase I, o qual foi aplicado, posteriormente, para a aspersão térmica, processo em estudo. A descrição de todas as etapas dessa fase está descrita a seguir.

### 3.2.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Após a primeira fase concluída, foram obtidos resultados quanto aos tipos de modelos existentes, bem como os indicadores utilizados, os quais são aplicados para avaliar a ecoeficiência de produtos, processos e/ou serviços, conforme relatados anteriormente e mostrados no subtópico 2.2 do trabalho.

Para a fase 2 estabelecida foi esperado obter um delineamento quanto à construção do Modelo de avaliação de EE. Para isso, é necessário delimitar qual grupo deve ser considerado, dentre os classificados no Quadro 2 (pág. 29), para ser compatível com o processo que se espera avaliar a EE. Nesse caso, é pertinente optar pela escolha de um dos setores de aplicação classificados neste trabalho. Isso direciona a análise para um menor número de opções de modelos, com seus respectivos indicadores, para ser, posteriormente, analisado no método de tomada de decisão AHP.

Feito o levantamento inicial dos indicadores dos modelos extraído do grupo selecionado, deve ser aplicado o método AHP, conforme os seis passos descritos anteriormente no item **2.4 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO: AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS)**, estabelecidos por Mu e Pereyra-Rojas (2018).

O primeiro passo é definir a hierarquia do processo de tomada de decisão (Figura 12): No primeiro nível o objetivo da decisão é definido como 'Selecionar indicadores de EE para o processo'; o segundo nível da hierarquia diz respeito aos critérios identificados mais adequados para selecionar o modelo de EE, ou seja, os indicadores de EE pertencentes ao setor em questão; por fim, no terceiro nível da hierarquia estão localizados os modelos dentre os quais pertencem cada indicador.

Para este trabalho, considerou-se analisar, especificamente, o segundo nível da hierarquia observada na Figura 12, que correspondem aos critérios, pois o foco desta etapa da pesquisa foi selecionar os indicadores de EE adequados para aplicação e avaliação no modelo de EE aqui desenvolvido. Em outras palavras, as alternativas, terceiro nível da hierarquia, não foram analisadas, porque este estudo não teve como finalidade analisar os modelos levantados, e sim os indicadores de EE presentes nos trabalhos levantados da revisão sistemática.

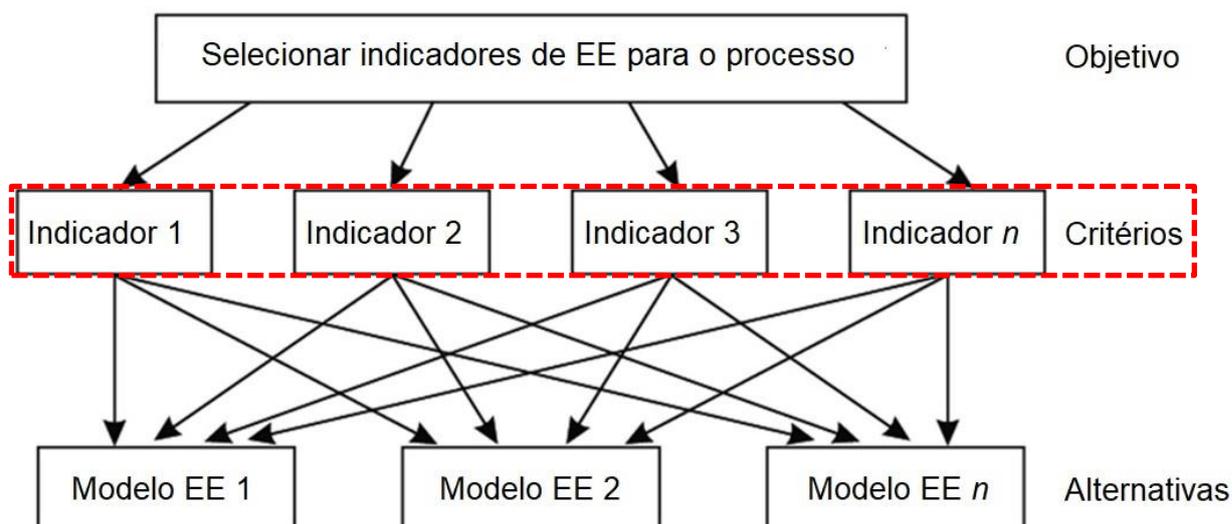


FIGURA 12. ESTRUTURA DA AHP PARA SELEÇÃO DOS INDICADORES DE EE

Na primeira etapa do AHP, foram fornecidos julgamentos sobre a importância relativa entre cada dois critérios e calculadas as prioridades (pesos normalizados). Vale ressaltar que o objetivo é escolher um grupo de indicadores de EE que sejam ideais para o cenário sob investigação.

O julgamento dos critérios deve ser realizado por especialistas da área em que se está fazendo a pesquisa, ou seja, se pretende-se avaliar a EE de um processo de fabricação, por exemplo, devem ser selecionados especialistas que conhecem desse processo. A afinidade com o tema, tende a garantir que o julgamento seja mais coerente e assertivo.

Tem-se que o julgamento de cada critério (indicadores extraídos dos modelos) deve ser realizado de acordo a importância que os especialistas consideram para o processo analisado. Para isso, a análise deve ser conduzida de forma “par a par”, considerando a escala Saaty, em que os pesos variam de 1 a 9, conforme Tabela 1.

Para melhor compreensão da escala utilizada, seguindo o julgamento “par a par”, imagine que um indicador de EE tenha maior preferência (importância) para o processo em estudo que outro indicador (nesse caso, estão sendo comparados dois indicadores), assim deve ser atribuído um peso entre 2 e 9 conforme a escala de Saaty (Tabela 1); quanto mais importante para o processo, maior será essa ponderação. Se dois indicadores têm a mesma relevância para o processo, o julgador deve colocar peso 1. Assim, são avaliados de forma precisa quais indicadores têm uma maior representatividade para o processo analisado.

TABELA 1. ESCALA DE COMPARAÇÃO DE PARES DE SAATY

Julgamento verbal	Valor numérico	Explicação
Extremamente importante	9 8	A evidência de favorecer uma atividade sobre a outra é do mais alto grau de afirmação
Muito fortemente mais importante	7 6	Experiência e julgamento favorecem muito fortemente uma atividade sobre a outra
Muito mais importante	5 4	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
Moderadamente mais importante	3 2	Experiência e julgamento favorecem levemente uma atividade sobre a outra
Igualmente importante	1	As duas atividades contribuem igual para o objetivo

FONTE: BASEADO EM SAATY (2008) E MU E PEREYRA-ROJAS (2018)

Uma vez realizado o levantamento inicial dos indicadores, os julgamentos dos critérios (indicadores extraídos dos modelos) são feitos, segundo pesos, de 1 a 9, da escala Saaty (Tabela 1). Os especialistas fornecem uma comparação em pares,  $C_{ij}$ , de cada par de critérios  $C_i$  vs.  $C_j$ ,  $i, j = 1, n$ ,  $i > j$ . Em cada caso de  $i < j$  o valor recíproco é definido para garantir a consistência entre os dois critérios comparados. Finalmente, no caso de  $i = j$ ,  $C_{ii} = 1$ ,  $i = 1, n$ .

Dessa forma, quando um indicador de EE é considerado pelos especialistas como "*muito mais importante*" do que outro indicador de EE, de acordo com a escala da Tabela 1, deve-se atribuir o peso 4 ou 5. A mesma linha de raciocínio aplica-se a cada um dos critérios (indicadores EE) considerados.

O peso normalizado  $C_i$  de cada critério é obtido com base a eq. 12:

$$C_{in} = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}} \quad \text{eq. (12)}$$

Em seguida, é calculada a Taxa de consistência (CR- *Consistency Ratio*) dos julgamentos conforme a eq. (13) (MU; PEREYRA-ROJAS, 2018):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{eq. (13)}$$

ou seja, a razão entre o índice de consistência (CI – *Consistency Index*), fornecido nos julgamentos (nível de importância atribuído pela comparação de pares), sobre o Índice

Randômico, também chamado de índice aleatório (RI- *Random Index*) que seria alcançado em um caso limite em que os julgamentos fossem fornecidos por uma geração de julgamentos puramente aleatórios; RI depende apenas da ordem da matriz de comparação e pode ser obtido por simulação numérica, em que são gerados julgamentos aleatórios na escala de Saaty.

O índice de consistência (CI) pode ser calculado conforme eq. (14) (MU; PEREYRA-ROJAS, 2018):

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad eq. (14)$$

onde:  $n$ : é a ordem da matriz de comparação;  $\lambda_{max}$ : é o valor máximo da matriz de comparação como descrito em Mu e Pereyra-Rojas (2018), que pode ser determinado conforme a média no critério  $n$  com relação do produto vetorial de cada vetor da matriz de julgamento e o vetor de pesos normalizados sobre cada componente do vetor de pesos normalizados como:

$$\lambda_{max} = \underset{\{i=1,n\}}{Average} \left\{ \frac{(\overline{D}_i * \overline{C}_{in})}{C_{in}} \right\} \quad eq. (15)$$

onde:  $\overline{D}_i$  é o vetor da linha  $n$  da matriz de julgamento;  $\overline{C}_{in}$  é o vetor de pesos normalizados;  $C_{in}$  é  $n$  componente do vetor dos pesos normalizados.

O CR tem o propósito de analisar se o julgamento foi feito de forma a assegurar um nível razoável de consistência em termos de proporcionalidade e transitividade (Mu e Pereyra-Rojas, 2018).

Para obter o valor do RI, segundo Saaty, deve-se analisar a ordem da Matriz Quadrada. Portanto, o pesquisador deve usar o valor de RI de acordo com a ordem de sua matriz (OM), conforme indicado na Tabela 2.

TABELA 2. ÍNDICE RANDÔMICO OU ÍNDICE ALEATÓRIO (RI) MÉDIO DO AHP

<b>OM</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>RI</b>	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

FONTE: MU E PEREYRA-ROJAS (2018); SAATY (1980)

A aceitação da coerência de julgamento é verificada, analisando se a CR é inferior a um valor limite aceitável (normalmente definido como 0,10). Se for superior, um novo julgamento deve ser realizado. Após a análise finalizada no AHP, devem ser selecionados os indicadores para ser utilizado no modelo de avaliação da ecoeficiência.

### 3.2.2. SELEÇÃO DOS INDICADORES PARA O MODELO

A visão geral do procedimento proposto para selecionar os indicadores de EE para o processo em estudo está apresentado no fluxograma da Figura 13, em que contém todos os passos que devem ser seguidos sequencialmente. Esse procedimento foi necessário para seguir com o desenvolvimento do modelo de avaliação da ecoeficiência, especificamente para os processos de AT, foco deste estudo.

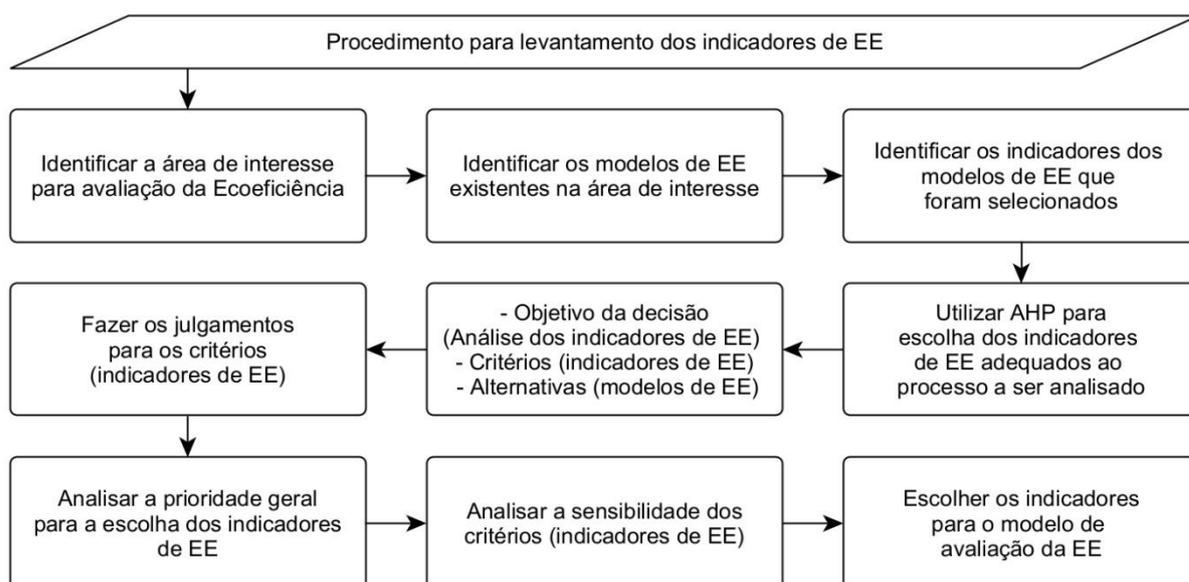


FIGURA 13. PROCEDIMENTO PARA LEVANTAMENTO DOS INDICADORES DE EE

As etapas sequenciais apresentadas na Figura 13 foram propostas para serem aplicadas de acordo a área de estudo desejada, visto que a primeira etapa é descrita como “Identificar a área de interesse para avaliação da ecoeficiência”.

A identificação dos modelos existentes é uma etapa importante, pois, a partir disso, torna-se possível justificar os indicadores selecionados, baseando-se em outros estudos publicados, para, posteriormente, aplicar o método de tomada de decisão (AHP), realizando todos os passos e aplicando as equações apresentadas no

subtópico anterior. Obtém-se como resultado, os indicadores de EE que são fundamentais para aplicação no modelo.

O tomador de decisão deve analisar a prioridade geral (desempenho global) para a escolha dos indicadores de EE mais adequados para o processo em estudo. Essa etapa deve ser realizada após realizar os julgamentos, verificar a consistência, fazer a ponderação com os pesos e determinar os pesos normalizados para os critérios. Para este estudo, os critérios que indicam um maior desempenho global foram os que apresentarem maior peso.

Para realizar uma análise de sensibilidade, o decisor deve variar o peso dos critérios (alterando os julgamentos, ou seja, alterando o peso da escala atribuído a cada critério) e ver como eles alteram o desempenho global obtido.

Por fim, após analisar o resultado da prioridade geral e da sensibilidade, a decisão final é tomada e são obtidos os indicadores a serem aplicados no modelo de avaliação de EE para avaliar o cenário desejado (determinado processo em estudo). Após descrever como deve ser realizado o levantamento dos indicadores julgados como adequados para avaliar a EE, seguiu-se para a etapa de construção do modelo, conforme descrita a seguir.

### **3.2.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE DA AT**

Para a construção do modelo, devem ser consideradas as características principais que constituem o processo de interesse, a AT. É preciso definir o que estará dentro e o que estará fora do sistema (processo) a ser analisado.

#### **LIMITE DO SISTEMA (DELIMITAÇÃO)**

Foram consideradas como limite geral do sistema, as técnicas que fazem parte da AT, o que compreende as fases de produção do revestimento, desde a preparação da superfície metálica da peça que irá receber as camadas, até a finalização, em que é obtida a superfície revestida.

No sistema, tem-se a utilização de recursos energéticos, como a energia elétrica, combustíveis, produtos químicos, quantidade de material de aplicação (em forma de pó, vareta ou cordão) e água. Como saída, tem-se as emissões de gases, resíduos sólidos ou pastosos que remanescem do material após aplicação do revestimento,

obtendo um produto semiacabado (após a aspersão, a peça revestida passa por processos de acabamento, não fazendo parte do sistema analisado).

O limite do sistema (Figura 14) foi considerado de forma geral para a aspersão térmica, mas aponta-se que há variáveis específicas a depender de qual técnica de AT será analisada. Isso porque existem técnicas que utilizam gases de combustão para aquecer as partículas que serão aplicadas no revestimento, outras utilizam a energia elétrica; ainda, cada processo consome um tipo de material que pode estar de diferentes formas; além de apresentarem diferentes temperaturas e velocidades.

Porém, para este trabalho, considerou os indicadores para o desenvolvimento do modelo sob a ótica dos limites gerais do sistema AT para, posteriormente, ser analisada a ecoeficiência de cada processo de AT (HVOF, *Flame Spray*, *Arc Spray* etc.). Possíveis ajustes dos limites gerais do sistema devem ser avaliados para cada técnica de aspersão térmica, conforme análise dos indicadores compostos na aplicação do modelo.

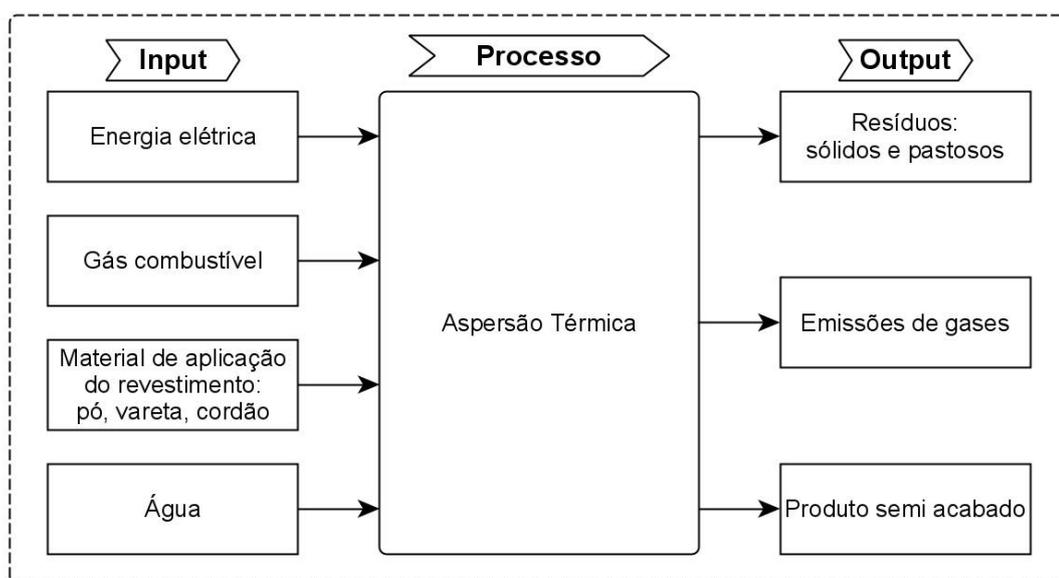


FIGURA 14. LIMITE DO SISTEMA: DESCRIÇÃO DOS *INPUTS* E *OUTPUTS*

A avaliação do produto obtido pela AT não é o foco deste estudo, pressupondo-se, então, que o produto está dentro dos requisitos de conformidade exigidos. Entende-se que a técnica de aspersão a ser utilizada depende do revestimento a ser fabricado, mas os indicadores que foram empregados para a avaliação da ecoeficiência estão diretamente relacionados ao processo e não ao produto.

O foco deste estudo está no processo realizado para obtenção do revestimento, que envolvem os recursos necessários na aspersão térmica, bem como os resíduos e resultados (produto revestido), o que exclui, conseqüentemente, a modelagem, o uso e o fim de vida dos substratos revestidos (produto semiacabado), bem como os processos de infraestrutura (equipamentos de transporte, locais de produção e ciclo de vida das ferramentas).

Seguindo com o desenvolvimento da pesquisa, para obter inicialmente a proposta conceitual do modelo, devem ser elaboradas etapas a serem seguidas, em uma única estrutura, que seja capaz de fornecer uma visão geral do modelo de EE para os processos de AT. Considera-se que a proposta do modelo deva ser, em princípio, composta por estágios conceituais, que envolvam a aplicação de métodos, instrumentos e/ou técnicas específicas para a coleta de dados e avaliação de resultados (como AHP, DEA, respectivamente), inseridas dentro de cada estágio de acordo com a sua finalidade.

De forma geral, o modelo conceitual de avaliação da ecoeficiência deve consistir em uma organização de passos sequenciais, baseados em todas as etapas que foram realizadas durante a abordagem metodológica, para a coleta e análise dos dados, conforme apresentadas e discutidas anteriormente.

Para ser possível medir a EE dos processos em estudo, o modelo proposto deve apresentar uma estrutura baseada na modelagem DEA, em que seja aplicado o modelo DEA selecionado, e, por meio de um programa, devem ser executados seus respectivos cálculos das entradas e saídas, ou seja, a combinação dos indicadores e os pesos atribuídos de maneira objetiva a cada entrada e saída, fornecendo assim os resultados da EE do processo investigado.

### **3.3. FASE 3: APLICAÇÃO DO MODELO DE EE**

Após finalizar a primeira e segunda fases da metodologia, observou-se que a construção do modelo de EE partiria da perspectiva das etapas estabelecidas em cada fase. Com a ideação do modelo, a terceira fase visa aplicar a proposta conceitual para os processos de AT, conforme etapas mostradas na Figura 15.

Inicialmente, devem ser classificados os indicadores de EE selecionados na AHP como *inputs* e *outputs* para ser aplicado, posteriormente, no modelo DEA. A técnica

DEA é utilizada para ser possível avaliar a EE, integrando os indicadores (*input* e *output*) econômicos e ambientais que envolvem o processo, neste caso a AT, em um único modelo de avaliação.

Após essa etapa, deve ser realizada uma coleta de dados em campo em uma empresa especializada em aplicação de revestimentos por aspersão. Devem ser coletados dados para cada indicador de EE selecionado de todas as DMUs a serem analisadas.

Os dados coletados e manuseados em uma planilha Excel devem ser importados para um *software*, para que o modelo DEA escolhido seja executado e obtidos os resultados da EE. Para a execução do modelo DEA no *software* devem ser seguidas algumas etapas, conforme descritas no subtópico a seguir.

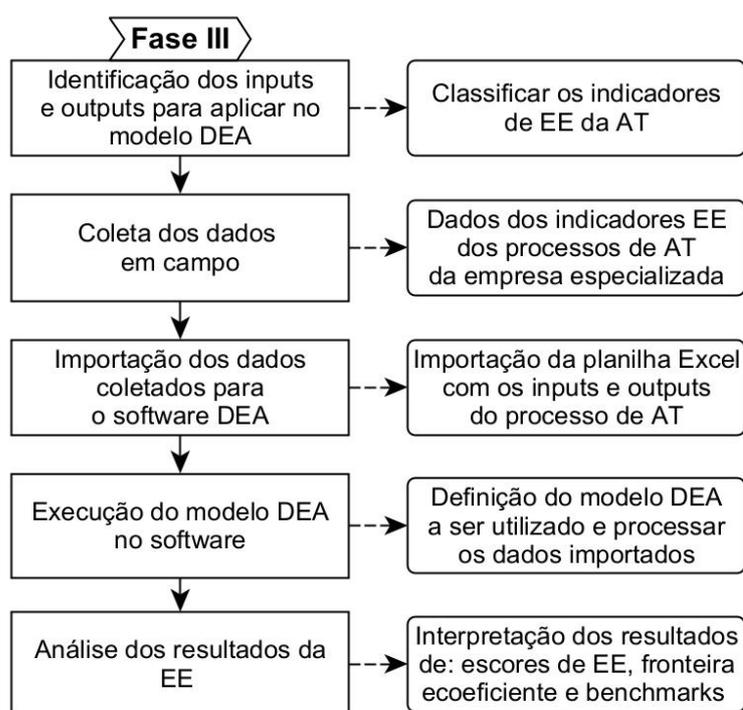


FIGURA 15. DESCRIÇÃO DA FASE III DA METODOLOGIA

### 3.3.1. EXECUÇÃO DO MODELO DEA

O procedimento seguido para utilização DEA é composto de etapas, necessárias para avaliação da EE: definir as DMUs que devem ser comparadas, analisar as variáveis de entrada e saída para que seja possível listar o número de DMUs a serem avaliadas. Posteriormente, deve ser selecionado o modelo e sua respectiva orientação, inserir as variáveis no modelo e, por fim, executar e interpretar os resultados obtidos. Para o

desenvolvimento do modelo DEA e disposição dos resultados da avaliação da ecoeficiência devem ser seguidas as etapas apresentadas na Figura 16.

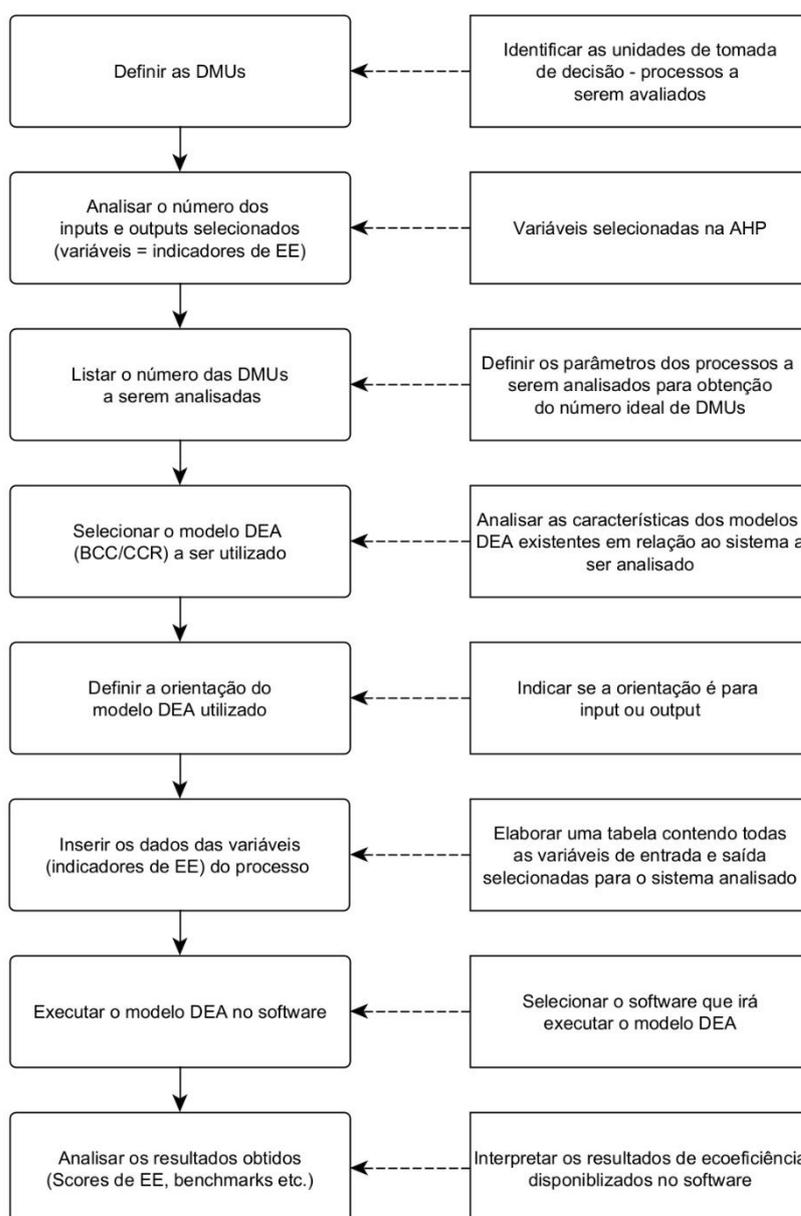


FIGURA 16. ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA MODELAGEM EM DEA

Inicialmente, devem ser **definidas as DMUs**, ou seja, o que será comparado durante a análise. As unidades de tomada de decisão são os processos que serão avaliados, devendo possuir as mesmas variáveis de entrada e saída, para que seja possível realizar a comparação e dispor dos resultados de EE para cada DMU.

Piran; Lacerda; Camargo (2020) apontam como sugestão para facilitar a definição das DMUs, realizar a seguinte questão: “O que eu quero comparar?”. É possível, por

exemplo, considerar um conjunto de DMUs que realiza as mesmas funções, possuindo o mesmo objetivo, e comparar essas DMUs em relação a um determinado período (que pode ser dias, meses ou anos, a depender do processo analisado), com isso é obtido um maior número de DMUs, analisando, especificamente relacionado ao tema deste trabalho, a ecoeficiência ao longo do tempo.

Posteriormente, devem ser analisadas as **variáveis de entrada (*input*) e saída (*output*)** a serem utilizadas no modelo DEA para avaliação da ecoeficiência. Neste caso, devem ser obtidas por meio do julgamento dos indicadores de EE, realizado com apoio do AHP (subtópico **3.2.1. Aplicação do Método AHP**). Essa etapa é uma das mais importantes para a modelagem, pois o modelo DEA deve ser alimentado com as variáveis pertinentes ao sistema, processo ou serviço que se pretende avaliar. Toda a forma seguida para obtenção das variáveis (indicadores de EE) deve ser realizada com base no procedimento desenvolvido, conforme apresentado anteriormente na Figura 13.

Para a **etapa de listagem das unidades** a serem analisadas na pesquisa, tem-se que a seleção das DMUs é uma parte que requer uma maior atenção, em relação às características das unidades que serão avaliadas durante a aplicação do modelo DEA. É necessário analisar a homogeneidade das unidades, ou seja, se realizam as mesmas tarefas com a mesma finalidade, se operam nas mesmas condições e se as variáveis utilizadas são iguais, exceto a sua magnitude. Para que as unidades sejam avaliadas, é fundamental que sejam suficientemente semelhantes, para que sejam comparadas adequadamente, mas que sejam suficientemente diferentes, para que possam ser discriminadas (LINS; MEZA, 2000).

A quantidade de DMUs selecionada é um outro fator fundamental a ser analisado, visto que influencia na seleção das variáveis de entrada e saída. O modelo DEA requer um maior número de DMUs do que o número de variáveis (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2020). Um número alto de variáveis e baixo de DMUs, pode comprometer a análise dos resultados, pois há uma alta possibilidade de não ser possível distinguir as DMUs ecoeficientes das não ecoeficientes (ineficientes), ou seja, resultar em uma situação em que todas as DMUs analisadas apresentam um escore igual ou muito próximo a 1. Para diminuir a possibilidade de ocorrer esse problema, é considerado o estudo de Banker *et al.* (1989), em que foi sugerido considerar um número de DMUs ao menos três vezes maior o número das variáveis (*inputs* e *outputs*) selecionadas.

Durante a **etapa de selecionar o modelo**, observou-se que os dois modelos DEA mais comumente conhecidos são o CCR e o BCC (COOPER; SEIFORD; ZHU, 2011). O modelo BCC considera variação da escala e não considera proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*. Já o modelo CCR, adotado neste trabalho, assume os retornos constantes de escala (premissa da proporcionalidade) (COOPER; SEIFORD; ZHU, 2011).

Quanto à **definição da orientação do modelo**, deve ser analisado se a análise pretende minimizar os *inputs* e manter os *outputs* (orientação a *input*) ou se pretende manter os *inputs* e maximizar os *outputs* (orientação a *output*). O pesquisador deve compreender essas diferenças para selecionar a orientação que seja ideal para sua análise. Para isso, recomenda-se consultar o trabalho de Piran; Lacerda; Camargo (2020).

Ainda, tem-se que entradas e/ou saídas indesejáveis podem existir no processo a ser analisado, por isso, se consideradas no estudo, devem ser ajustadas no modelo DEA a ser aplicado. Nesse caso, deve ser adotada uma forma indireta de incorporar a saída indesejável (exemplo: geração de resíduos), baseada em uma abordagem que possa fornecer a possibilidade de ajustar o indicador e que o resultado seja transparente, conforme apresentada em Halkos; Petrou (2019).

Após a definição das características das variáveis relacionadas aos processos a serem analisados, classificando-as como *inputs* e *outputs* para serem integradas ao modelo DEA selecionado, parte-se para **inserir os dados das variáveis do processo analisado**. Nesse caso, os dados dos *inputs* e *outputs* coletados devem ser inseridos em uma tabela para passar para a etapa de **executar o modelo**. Para a análise do modelo e estimativas de ecoeficiência é necessário utilizar um algoritmo computacional, o qual consiste na escolha de um *software* específico que permite selecionar um modelo DEA e, com isso, realizar a avaliação da ecoeficiência.

Como ilustrada na Figura 17, os processos a serem analisados (DMUs) recebem como entradas os indicadores de EE levantados (*inputs* e *outputs*), o modelo DEA selecionado, e sua devida orientação; e como saída, fornece os resultados da ecoeficiência dos processos avaliados. Todo esse processamento é realizado por meio de um *software* DEA, capaz de realizar os cálculos e fornecer os dados a serem interpretados.

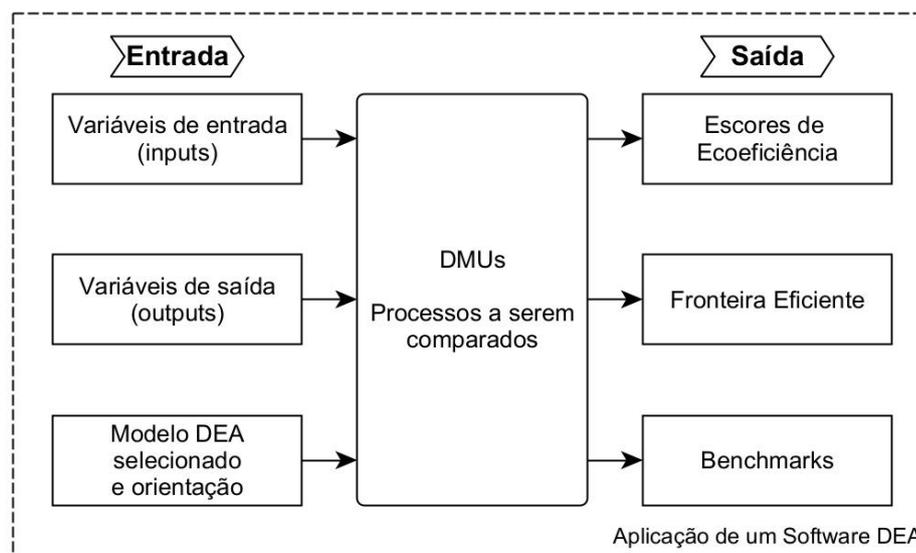


FIGURA 17. ENTRADAS E SAÍDAS DO MODELO DEA, COM APLICAÇÃO DE UM SOFTWARE

Para verificar os resultados obtidos, ou seja, analisar a EE dos processos (DMUs), deve ser gerado um *ranking*, por meio de um *score DEA*, para classificar as DMUs como ecoeficiente ou ineficientes. De forma análoga à definição de eficiência no contexto da engenharia, tem-se que 1 (um ou 100%) é o valor máximo do escore da ecoeficiência. Devido às restrições de desigualdade do problema, o escore não pode ultrapassar o valor de um; além disso, a pontuação da EE deve sempre estar entre 0 e 1, devido à restrição dos pesos que devem ser não-negativos. Os pesos presentes no modelo DEA são fundamentais para obtenção da pontuação de ecoeficiência DEA. Não é necessário um julgamento subjetivo, pois esses pesos e respectivas pontuações, são calculados por meio de técnicas de programação linear (KUOSMANEN; KORTELAJINEN, 2005). Para ser considerada ecoeficiente, a DMU avaliada deve apresentar uma pontuação de ecoeficiência igual a 1.

Para este trabalho, esperou-se que, com esse modelo, fosse possível comparar os processos de AT, quanto à sua ecoeficiência, analisando a quantidade de *inputs* que utilizam durante o processo e *outputs* originados. Ainda, esperou-se identificar qual o processo de aspersão se caracteriza como ecoeficiente, analisar suas características, a fim de fornecer um *benchmark* para ser utilizado pelos outros processos com baixa ecoeficiência. Lembrando que processos ecoeficientes são aqueles que apresentarem uma ecoeficiência igual a um.

#### 4. MODELO PROPOSTO PARA AVALIAÇÃO DA EE PARA ASPERSÃO TÉRMICA

Este capítulo apresenta a construção do modelo conceitual proposto, obtido por meio da realização das fases I, II e III, descritas anteriormente no capítulo de metodologia. Inicialmente, foram definidas as etapas principais que devem constituir um modelo conceitual de avaliação de ecoeficiência, com foco nas análises para os processos de Aspersão Térmica, como mostrado na Figura 18.

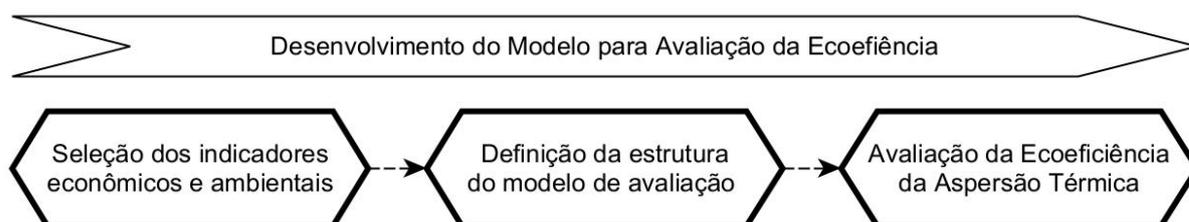


FIGURA 18. ETAPAS PARA O MODELO CONCEITUAL DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA

O modelo de avaliação a ser apresentado consiste em etapas propostas para serem seguidas na sequência indicada, iniciando com a obtenção dos indicadores ambientais e econômicos (*input* e *output*), definindo a estrutura a ser empregada no modelo e partindo para a definição da forma de avaliação da EE, que consiste na aplicação do modelo DEA, empregando um *software* para obtenção e análises de um processo, produto ou serviço, quanto à ecoeficiência.

##### 4.1. SELEÇÃO DOS INDICADORES ECONÔMICOS E AMBIENTAIS (INPUTS E OUTPUTS)

Conforme apresentado anteriormente no Quadro 2 (pág. 29), os modelos levantados na RSL foram classificados quanto ao setor, visando separar quais modelos são mais empregados para cada campo. Inicialmente, após análises de cada artigo, foram identificados nove setores, a saber: Equipamentos elétricos e eletroeletrônicos; Construção civil; Recursos hídricos e tratamento de água; Indústria alimentícia; Agropecuária; Usinas termelétricas e térmicas; Sustentabilidade das cidades e regiões; Mineração; e Manufatura.

Nessa primeira etapa, com a finalidade de avaliar a ecoeficiência dos processos de AT, foi considerado optar pela análise dos modelos e respectivos indicadores de EE, classificados no grupo “Manufatura”, por ser aquele no qual o processo de interesse (AT) se enquadra. Com isso, foi possível um direcionamento para um menor número

de opções a serem analisadas, para, posteriormente, aplicar o método de tomada de decisão AHP, de acordo com a análise dos critérios estabelecidos e, assim, definir indicadores já apontados em outros estudos e que possam ser julgados no método AHP, considerando o cenário a ser estudado.

Feita essa análise, o próximo passo foi realizar um levantamento de todos os indicadores de EE (ambientais e econômicos) presentes em cada modelo da área de “Manufatura”. Essa etapa garantiu que todos os indicadores de EE fossem extraídos e, posteriormente, julgados no método AHP. Ainda, foram eliminados os indicadores que se repetiram, pois pode acontecer que dois modelos ou mais apresentem o mesmo indicador utilizado para avaliar a EE.

Com os dados extraídos dos artigos apresentados anteriormente no Quadro 2 (pág. 29), foram extraídos os indicadores de cada modelo de avaliação da EE, os quais foram empregados posteriormente como critérios para a aplicação no método AHP, levantados de cada um dos 7 artigos do grupo “Manufatura”, conforme estão descritos no Quadro 4.

QUADRO 4. ALTERNATIVAS E CRITÉRIOS PARA SEREM AVALIADO NO AHP PARA O SETOR DE MANUFATURA

(continua)

<b>Autor (ano)</b>	<b>Modelo para avaliação da EE (Alternativas - An)</b>	<b>Composição dos indicadores de EE (Critérios)</b>
Ng <i>et al.</i> (2014)	C/CFP	- C é o Custo da produção - CFP é a pegada de carbono
Egilmez <i>et al.</i> (2013)	EIO-ACV + DEA (CCR)	- EIO é Entrada-Saída Econômica (produção econômica total) - Emissões de GEE, uso de energia, uso de água, geração de resíduos perigosos e emissões tóxicas)
Zheng and Peng (2019)	DEA (CCR)	- Eficiência de recursos (consumo de energia abrangente, produção unitária de trabalho, entrada de capital de produto unitário) - eficiência ambiental (emissão de gases e resíduos)
Leme Jr. <i>et al.</i> (2018)	Modelo Lean-Green: SMED / CF	- SMED é Single Minute Exchange of Die - CF é a pegada de carbono
Lucato <i>et al.</i> (2013)	Product value/ Ecological influence	- quantidade de peças - energia consumida - recursos materiais do equipamento consumidos

QUADRO 4. ALTERNATIVAS E CRITÉRIOS PARA SEREM AVALIADO NO AHP PARA O SETOR DE MANUFATURA

(conclusão)

Autor (ano)	Modelo para avaliação da EE (Alternativas - An)	Composição dos indicadores de EE (Critérios)
Mendoza <i>et al.</i> (2019)	Economic Score/ Environmental Score	- custo da matéria prima, custo de fabricação, custo de transporte e custo de gestão de resíduos) - potencial de esgotamento abiótico de elementos (ADP), potencial de esgotamento abiótico de combustíveis fósseis (ADP), potencial de acidificação (AP), potencial de eutrofização (EP), potencial de ecotoxicidade aquática de água doce (FAETP), potencial de aquecimento global (GWP), potencial de toxicidade humana (HTP), potencial de ecotoxicidade aquática marinha (MAETP), potencial de destruição da camada de ozônio (ODP), potencial de criação de oxidantes fotoquímicos (POCP) e potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP)
Vukelic <i>et al.</i> (2019)	TFC/TEI	- TFC é o custo total do produto - TEI é o impacto ambiental total: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos.

O Quadro 5 apresenta os 15 indicadores extraídos dos artigos somente do setor de Manufatura, apresentados anteriormente no Quadro 2, necessários para o AHP.

QUADRO 5. INDICADORES (CRITÉRIOS) PARA AVALIAR NO AHP, EXTRAÍDOS DO SETOR DE MANUFATURA

(continua)

Indicadores de EE	Legenda dos indicadores de EE	Autor(es)/ano
EC	Emissão de CO <sub>2</sub>	Egilmez <i>et al.</i> (2013) Zheng; Peng (2019)
CA	Consumo de água	Egilmez <i>et al.</i> (2013)
CE	Consumo de energia	Egilmez <i>et al.</i> (2013) Zheng; Peng (2019) Lucato <i>et al.</i> (2013)
GEE	Emissões de GEE	Egilmez <i>et al.</i> (2013) Zheng; Peng (2019)
CFP	Pegada de carbono	Ng <i>et al.</i> (2014)
GR	Geração de resíduos	Egilmez <i>et al.</i> (2013) Zheng; Peng (2019)
RMC	Recursos materiais consumidos do equipamento	Lucato <i>et al.</i> (2013)
CP-RH	Custo da produção (recursos humanos)	Ng <i>et al.</i> (2014) Zheng; Peng (2019)
PET	Produção Econômica Total	Egilmez <i>et al.</i> (2013)
QPR	Quantidade de peças (peça revestida)	Lucato <i>et al.</i> (2013)

QUADRO 5. INDICADORES (CRITÉRIOS) PARA AVALIAR NO AHP, EXTRAÍDOS DO SETOR DE MANUFATURA

(conclusão)

Indicadores de EE	Legenda dos indicadores de EE	Autor(es)/ano
CMP	Custo da matéria prima	Mendoza <i>et al.</i> (2019)
CF	Custo de fabricação (processo)	Mendoza <i>et al.</i> (2019)
CT	Custo de transporte	Mendoza <i>et al.</i> (2019)
CGR	Custo de gestão de resíduos	Mendoza <i>et al.</i> (2019)
CTP	Custo (valor) total do produto	Vukelic <i>et al.</i> (2019)

Após essas análises iniciais, foi aplicado o método de tomada de decisão, AHP, conforme os seis passos descritos anteriormente na metodologia, definidos por Mu e Pereyra-Rojas (2018). Recomenda-se que o julgamento dos critérios seja feito por profissional(is) da área que pretende avaliar a ecoeficiência. Isso pode garantir um melhor direcionamento do método e assertividade na tomada de decisão.

Para este estudo, foram consultados dois especialistas da área de AT, um profissional do mercado de trabalho que atua na área de aplicação de revestimentos por mais de 40 anos e um outro profissional, também do mercado, que se aprofundou nessa mesma área há 12 anos. Os dois especialistas realizaram o julgamento “par a par” de cada indicador, de acordo a sua importância para o processo de AT, atribuindo pesos para cada análise, conforme escala anteriormente apresentada na Tabela 1 (pág. 59), contendo escala de comparação de pares de Saaty.

Para agrupar os dados nessa etapa de aplicação do método AHP, recomenda-se utilizar um *software* que disponibilize uma planilha para organizar os dados, realizar cálculos e analisar as informações de forma rápida. Para este estudo, foi utilizado o Microsoft Excel para preenchimento dos pesos e organização dos cálculos, necessários para tomada de decisão. Antes do preenchimento da planilha, foi explicado o método AHP para ambos e apresentados exemplos para facilitar a compreensão. Foi acompanhado o preenchimento da Tabela por meio de um encontro virtual, em uma plataforma *online*, sendo auxiliado pela pesquisadora por 2h48min.

Os resultados médios obtidos do julgamento “par a par” (relação da importância dos pares de indicadores para AT) estão apresentados na Tabela 3. É possível observar a diagonal principal, sendo sempre 1, e o recíproco (inverso) na posição simétrica com relação à diagonal principal.

TABELA 3. RESULTADO DO JULGAMENTO DOS INDICADORES DE EE POR MEIO DO MÉTODO AHP

Matriz		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Indicador (critério)		EC	CA	CE	GEE	CFP	GR	RMC	CP-RH	PET	QPR	CMP	CF	CT	CGR	CTP
1	EC	1,00	0,15	0,13	1,00	1,00	0,33	0,18	0,33	0,33	0,50	0,50	0,33	2,00	0,25	0,25
2	CA	5,00	1,00	0,17	7,00	7,00	3,00	0,50	0,25	0,25	0,50	0,33	0,25	4,00	0,50	0,20
3	CE	7,00	6,00	1,00	6,00	6,50	6,00	1,00	2,50	2,00	2,00	2,50	2,00	7,50	3,00	0,50
4	GEE	1,00	0,14	0,17	1,00	1,00	0,33	0,17	0,20	0,20	0,23	0,33	0,33	2,00	0,23	0,20
5	CFP	1,00	0,14	0,15	1,00	1,00	0,33	0,18	0,20	0,20	0,18	0,33	0,33	2,00	0,23	0,20
6	GR	3,00	0,33	0,17	3,00	3,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,17	0,17	0,17	3,00	0,50	0,25
7	RMC	5,45	2,00	1,00	5,83	5,45	3,00	1,00	3,00	3,00	2,50	2,00	2,00	8,50	2,50	2,00
8	CP-RH	3,00	4,00	0,40	5,00	5,00	3,00	0,33	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	7,50	2,00	1,00
9	PET	3,00	4,00	0,50	5,00	5,00	3,00	0,33	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	8,00	3,00	1,00
10	QPR	2,00	2,00	0,50	4,44	5,45	6,00	0,40	0,50	0,33	1,00	1,00	1,00	6,00	2,00	1,00
11	CMP	2,00	3,00	0,40	3,00	3,00	6,00	0,50	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	5,50	3,00	1,00
12	CF	3,00	4,00	0,50	3,00	3,00	6,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,50	2,00	1,00
13	CT	0,50	0,25	0,13	0,50	0,50	0,33	0,12	0,13	0,13	0,17	0,18	0,13	1,00	0,15	0,15
14	CGR	4,00	2,00	0,33	4,44	4,44	2,00	0,40	0,50	0,33	0,50	0,33	0,50	6,46	1,00	0,50
15	CTP	4,00	5,00	2,00	5,00	5,00	4,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	6,46	2,00	1,00

Para realizar os demais cálculos no método AHP, é necessário conhecer o valor de RI, o qual é tabelado de acordo a ordem da matriz construída. Para este estudo, conforme Tabela 3, tem-se uma matriz de ordem 15. Segundo Saaty (1980), para uma Matriz Quadrada de ordem 15, o valor de RI é igual a 1,59, dado esse apresentado na Tabela 2 (pág. 60).

Com os resultados obtidos na Tabela 3, fez-se os cálculos para analisar a consistência (CR), utilizando as equações 13, 14 e 15, conforme resultados apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DOS CRITÉRIOS (INDICADORES DE EE)

Indicador (critério)	Peso $C_i$	Peso Normalizado $C_{in}$	$\lambda_{max} = \left\{ \frac{(D_i * \overline{C_{in}})}{C_{in}} \right\}$	$\lambda_{max}$ (médio)	CR	RI (tabelado)
EC	8,30	0,019	17,57	16,87	<b>0,08</b>	1,59
<b>CA</b>	<b>29,95</b>	<b>0,070</b>	<b>11,79</b>			
<b>CE</b>	<b>55,50</b>	<b>0,130</b>	<b>19,14</b>			
GEE	7,53	0,018	15,85			
CFP	7,49	0,018	15,73			
<b>GR</b>	<b>15,75</b>	<b>0,037</b>	<b>12,80</b>			
<b>RMC</b>	<b>49,24</b>	<b>0,116</b>	<b>19,99</b>			
<b>CP-RH</b>	<b>39,23</b>	<b>0,092</b>	<b>18,12</b>			
<b>PET</b>	<b>39,83</b>	<b>0,094</b>	<b>17,99</b>			
<b>QPR</b>	<b>33,63</b>	<b>0,079</b>	<b>16,30</b>			
<b>CMP</b>	<b>31,73</b>	<b>0,075</b>	<b>18,72</b>			
<b>CF</b>	<b>35,50</b>	<b>0,083</b>	<b>18,17</b>			
CT	4,38	0,010	17,97			
<b>CGR</b>	<b>27,75</b>	<b>0,065</b>	<b>13,82</b>			
<b>CTP</b>	<b>39,96</b>	<b>0,094</b>	<b>19,03</b>			

Após obter o valor de CR, utilizando a equação 13, foi verificado se esse valor é  $\leq 0,10$  (10%). Caso seja superior, deve-se realizar um novo julgamento, pois significa que há uma incoerência no preenchimento da matriz, em relação ao valor colocado da escala Saaty. No caso demonstrado na Tabela 4, tem uma consistência de 0,09 ou 9,0%, o que significa que o julgamento realizado está coerente.

Após verificar que o método AHP foi aplicado corretamente, foram analisados quais indicadores apresentaram um maior peso, visando selecionar os que tiveram um peso maior que 10, pois a finalidade é utilizar indicadores de EE que tenham uma relevância significativa no processo de AT.

Nesse caso, foram selecionados 11 indicadores (Figura 19): Recursos materiais consumidos do equipamento (RMC); Custo da produção (recursos humanos) (CP-RH); Produção Econômica Total (PET); Custo de fabricação (processo) (CF); Custo da matéria prima (CMP); Custo (valor) total do produto (CTP); Quantidade de peças (peça revestida) (QPR); Consumo de energia (CE); Consumo de água (CA); Custo de gestão de resíduos (CGR); e Geração de resíduos (GR).

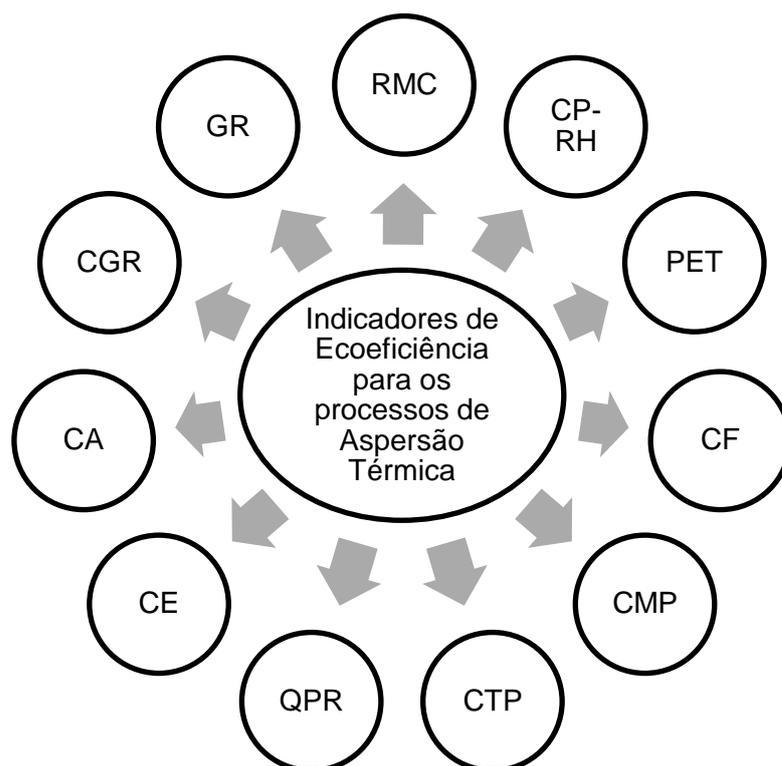


FIGURA 19. INDICADORES SELECIONADOS PARA AVALIAR A EE DOS PROCESSOS DE AT

Como a lacuna deste estudo está na falta de um modelo de ecoeficiência para a AT, os indicadores selecionados por meio da pesquisa são considerados, inicialmente, os mais adequados ao processo, o que pode ser posteriormente investigado em outras pesquisas para integração de novos indicadores, por exemplo. Indicadores como CE e RCM são alguns dos principais indicadores que são investigados em outros estudos quando se trata de avaliar a ecoeficiência na área industrial (CAIADO *et al.*, 2017).

De forma esquemática, a Figura 20 apresenta a primeira parte do modelo proposto, ilustrando as sub etapas descritas anteriormente, visando a seleção dos indicadores de EE, para dar sequência à segunda etapa principal de definição da estrutura do modelo.

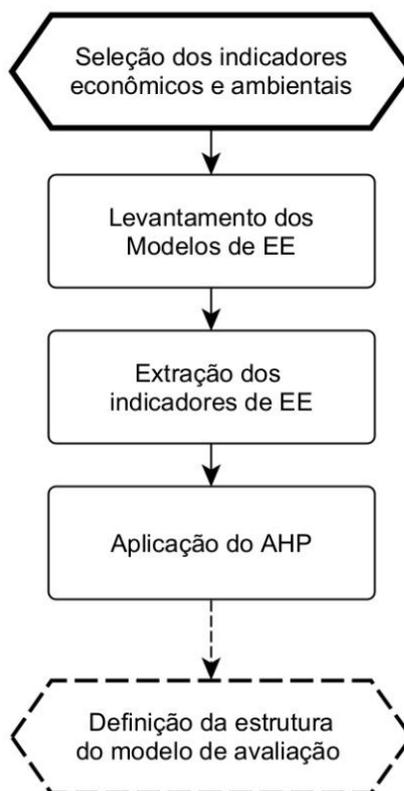


FIGURA 20. PRIMEIRA PARTE DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE

#### 4.2. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO MODELO DE AVALIAÇÃO

Após a seleção dos indicadores com o uso do método AHP, foi definida a estrutura da avaliação da EE, que corresponde em: apontar o modelo DEA a ser utilizado; agrupar os indicadores obtidos na etapa anterior, classificando-os como *input* e *output*; e agrupar as DMUs que serão avaliadas. Para essa etapa do modelo, seguiu-se os passos apresentados na modelagem DEA da Figura 16 (pág. 66).

Para a inserção dos *inputs* e *outputs* (indicadores de EE) no modelo DEA, foi assumida a forma geral mais conhecida da ecoeficiência, descrita na eq. (1), em que as variáveis econômicas (*outputs*) e ambientais (*inputs*), foram utilizadas para a medida de desempenho das DMUs (processos de AT).

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor do produto ou serviço}}{\text{Impacto ambiental}} \quad \text{eq. (1)}$$

Assim, o numerador dessa equação é uma combinação entre os indicadores econômicos de saída, expressos em valores monetários e apontados mais adiante, na Tabela 5. E o denominador, se trata da combinação entre os indicadores ambientais de entrada, também expressos em valores monetários e igualmente apontados mais adiante, nessa mesma tabela.

Quanto ao modelo DEA a ser utilizado, foram analisados os conceitos apresentados no subtópico **2.5. DEA (Data Envelopment Analysis)**, e definida a aplicação do modelo DEA, que pode ser CCR ou BCC. Ainda, deve ser definida a orientação do foco de análise para *input* ou *output*. Essa análise deve ser feita pelo especialista do processo ou pela empresa envolvida no estudo ou até mesmo pelo pesquisador interessado, visto que a orientação do modelo deve estar alinhada com o contexto e objetivo da análise (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2020).

Para este trabalho, foi adotada a orientação para *input*, pois, sob o aspecto de eficiência ambiental, foi considerado que é necessário reduzir os recursos utilizados (*inputs*), mantendo o nível de produção (*outputs*) nos processos de AT. No entanto, poder-se-ia adotar também a orientação para *output*, sendo que nesse caso o foco seria na maximização da saída com a manutenção das entradas.

Ainda, foi considerado que existem nos processos de AT dois tipos de saídas: saída desejável e saída indesejável, ou seja, há resultados indesejáveis desse processo produtivo, em que sua produção deve ser minimizada ao invés de ser maximizada. Para tratar do *output* indesejável neste estudo, foi adotada a abordagem Inverso Multiplicativo, em inglês *Multiplicative Inverse* (MLT) (GOLANY; ROLL, 1989; LOVELL; PASTOR; TURNER, 1995). Nesta abordagem, é inserido no modelo o inverso do *output* indesejável como *output*, ou seja, se utiliza  $f(U) = \frac{1}{U}$ . Dessa forma, tem-se que quanto mais indesejável for o *output*, menor será o seu valor ao obter o valor inverso. Para Tschaffo; Meza (2014), a abordagem MLT é a mais recomendada para o tratamento de *outputs* indesejáveis, com resultado mais transparente da eficiência para cada DMU em análise.

Em seguida, foi necessário analisar a relação entre o número de variáveis (*inputs* e *outputs*) com o número de DMUs. Com o resultado do AHP, foi obtido para este estudo um número consideravelmente alto de variáveis (11 indicadores), em relação a um número inicialmente pequeno de DMUs (3 processos de AT). Para Banker *et al.*

(1989), é necessário que o número de DMUs seja ao menos três vezes maior o número das variáveis (*inputs* e *outputs*) selecionadas. Por isso, optou-se por aumentar o número de DMUs considerando 11 materiais que são mais aplicados em cada processo de AT na empresa analisada neste trabalho, obtendo assim um maior número de DMUs.

A coleta de dados dos indicadores de EE para todas as DMUs selecionadas foi realizada junto a uma empresa prestadora de serviços, especializada na aplicação de revestimentos por AT. A empresa está localizada no interior de São Paulo, apresentando um faturamento anual de aproximadamente R\$7,5 milhões, e conta atualmente com cerca de 40 funcionários, distribuídos como mão de obra direta e indireta, a empresa fornece serviços de aplicação de revestimentos em campo, nos mais diversos setores que necessitam de proteção de suas peças e estruturas metálicas.

Inicialmente, foram consultados relatórios internos da empresa que se disponibilizou em fornecer dados sobre as aplicações de revestimentos que a organização realiza para os seus clientes. A partir disso, foram selecionados 33 materiais que possuem uma maior demanda de serviço: 11 materiais para o HVOF, 11 para *Arc Spray* e 11 para *Flame Spray*. Com esses materiais selecionados, foram definidas 33 DMUs para serem analisadas no modelo DEA selecionado.

É importante destacar que o objetivo não foi analisar a influência do material sobre a ecoeficiência do processo. Ao contrário da ACV, em que são coletados e analisados os dados em todas as fases do ciclo de vida do produto, o foco principal da EE aqui investigada foi avaliar as entradas e saídas presentes durante o processo de AT, ou seja, foram consideradas as etapas que compreendem até obtenção da camada, não analisando o produto (peça revestida), sua aplicação industrial e descarte. Ainda, os principais parâmetros dos processos de AT (velocidade, temperatura, vazão do combustível etc.) possuem variação quando utilizados diferentes tipos de materiais de aplicação, mas o que foi considerado para as diferentes DMUs (processos de AT) foi o comportamento das variáveis do processo quando aplicados os materiais sobre uma peça com uma área de 1m<sup>2</sup>.

Partindo para a aplicação no modelo DEA é necessária a identificação de entradas e saídas do processo analisado (GANDHI; SHANKAR, 2014). Dessa forma, os indicadores de EE selecionados foram classificados em *inputs* e *outputs* do sistema,

apontado ser um passo importante para posterior aplicação no modelo de avaliação da EE baseado na DEA. Os indicadores ainda foram classificados quanto a característica econômica e ambiental, conforme apresentados na Quadro 6.

QUADRO 6. VARIÁVEIS UTILIZADOS NO MODELO DEA

Característica do indicador	Tipo	Indicador de EE	Unidade /m <sup>2</sup>
Econômico	<i>Input</i>	RMC* <sup>8</sup>	kg
		CMP	R\$
		PET* <sup>9</sup>	R\$
		CF	R\$
		CP-RH	R\$
	<i>Output</i>	CTP	R\$
		QPR* <sup>10</sup>	m <sup>2</sup>
Ambiental	<i>Input</i>	CE	kWh
		CA	L
	<i>Output (indesejável)</i>	GR* <sup>11</sup>	kg
		CGR	R\$/kg

- O indicador de RMC é definido como a quantidade de material em quilograma que é colocada no equipamento para realizar a deposição na área considerada para esta pesquisa. Esse indicador já está embutido no indicador CMP e, portanto, não será utilizado.
- O indicador de CMP foi obtido com base no custo pago pela empresa para a quantidade de material utilizado para aspergir um revestimento sobre uma superfície de 1m<sup>2</sup>.
- O indicador PET é o custo total gasto pela empresa para produzir o revestimento para a área considerada. Para cálculo deste custo foram considerados os mesmos

<sup>8</sup> O indicador RMC não foi considerado para aplicar no modelo, pois adotou-se que o valor monetário individual já está considerado na composição do indicador CMP, que se trata do custo do valor do RCM.

<sup>9</sup> O indicador PET não foi considerado no modelo, pois, é a soma de dois outros indicadores (CMP e CP-RH) já considerados de forma individual.

<sup>10</sup> O indicador QPR não foi considerado na coleta de dados, pois foi adotado uma área fixa da peça revestida de 1m<sup>2</sup>, fazendo assim que a quantidade de peças para todas as DMUs seja sempre a mesma.

<sup>11</sup> O indicador GR não foi considerado para aplicação no modelo, pois seu valor individual também está considerado na composição do indicador GR.

fatores apresentados por Paredes (2009), em que incluem os custos relacionados à matéria-prima e mão de obra utilizada para revestir um substrato de 1m<sup>2</sup>.

- Já o CF refere-se ao indicador que mensura o valor gasto em reais considerado para utilizar os equipamentos do processo de AT. Do mesmo modo, entra na forma da equação 1 como um componente redutor do valor econômico final ( $\frac{1}{CF}$ ).
- Em relação ao CP-RH, esse indicador foi obtido com base no valor gasto em reais para a mão de obra aplicar o material. Entra na forma da equação 1 como um componente redutor do valor econômico final ( $\frac{1}{CP-RH}$ ).
- Para obter os valores do indicador de CTP para cada DMU, foi calculado o custo em real da peça revestida para comercialização.
- O consumo de energia, indicador CE, foi obtido com base na potência dos equipamentos que cada processo de AT possui, ou seja, levantado o consumo de cada equipamento que compõe a técnica (HVOF, *Flame Spray*, *Arc Spray*) para o tempo de operação realizado na obtenção para cada revestimento aplicado.
- Em relação ao indicador referente ao consumo de água, CA, foi considerada a quantidade de água gasta durante a deposição do revestimento.
- Os valores do indicador de GR para cada DMU foram obtidos com base na quantidade de material que se torna resíduo após a deposição sobre a superfície. Da mesma forma que no caso anterior, esse indicador não será utilizado por já estar embutido no indicador CGR, descrito a seguir.
- O custo de geração de resíduos (CGR) foi obtido multiplicando a quantidade de resíduos gerada em cada DMU pelo valor em reais que a empresa paga para que uma empresa responsável retire do local. Por ser um indicador de resultado indesejável, entra na forma da equação 1 como um componente redutor do valor econômico ( $\frac{1}{CGR}$ ), apesar de ser um componente de características ambientais.

Dessa forma, relacionando os indicadores levantados com os componentes da eq. (1) (pág. 15), tem-se a seguinte combinação de entradas e saídas e seus respectivos pesos (*i* e *j*) atribuídos no DEA, conforme ilustrados na Equação 16.

$$EE_{AT} = \frac{\text{outputs}}{\text{inputs}} = \frac{j_4 \cdot CTP + j_5 \cdot \frac{1}{CGR}}{i_1 \cdot CE + i_2 \cdot CA + i_3 \cdot CMP + j_1 \cdot CP_{RH} + j_2 \cdot CF + j_3 \cdot PET} \quad (16)$$

Definidas as variáveis, os dados devem ser coletados para cada DMU e dispostos conforme Tabela 5, seguindo para a próxima etapa do modelo desenvolvido.

A Figura 21 apresenta resumidamente a segunda parte do modelo de avaliação da EE, ilustrando as três etapas principais e as sub etapas detalhadas anteriormente, realizadas para a definição da estrutura do modelo, finalizando com a terceira e última etapa principal para a avaliação da EE.

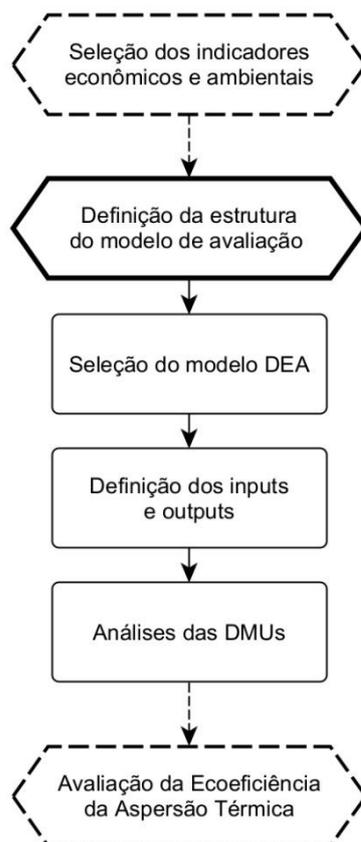


FIGURA 21. SEGUNDA PARTE DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE

#### 4.3. AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS – SOFTWARE DEA

Após a coleta dos dados de cada indicador para cada DMU, partiu-se para a etapa final do modelo, que consistiu no processamento dos dados. Para cálculo e obtenção dos resultados da ecoeficiência de cada DMU, deve ser utilizado um *software* para executar o modelo DEA.

Existem diversos *softwares* que podem ser empregados nesta etapa, muitos disponíveis para *download* gratuitamente, como: *Open Source DEA*<sup>12</sup>, *MaxDEA*<sup>13</sup>, *DEA Solver Pro*<sup>14</sup>, entre outros que podem ser vistos em Meza et al. (2005). Também existem aplicativos web capazes de estimar modelos DEA, como, por exemplo, o SAGEPE (disponível em <http://www.sagepe.com.br/>), e, ainda, os modelos DEA podem ser estruturados por meio do Solver Excel. Esses aplicativos facilitam a aplicação DEA pela praticidade e disponibilidade dos recursos necessários para execução. Porém, deve ser analisado se o programa a ser adotado possui limites de inserção de dados, ou seja, se há um limite na análise de DMUs, pois, nas versões gratuitas, alguns *softwares* só permitem analisar abaixo de dez DMUs, por exemplo, o que impede de realizar análises acima desse valor.

Além desses *softwares* disponíveis (comerciais ou livres), é possível programar modelos DEA por meio da linguagem de programação R. O R é gratuito, de código aberto, além de ser possível integrar o modelo DEA com outras técnicas, para compor o processo de tomada de decisão (PESSANHA *et al.*, 2013).

A escolha do *software* pode ser feita analisando os fatores citados nos parágrafos anteriores, de acordo a sua disponibilidade. Mas, de forma geral, para utilização nos *softwares* devem ser importados todos os dados necessários (DMUs, variáveis) do sistema a ser avaliado, com base no exemplo da Tabela 5, para preenchimento das informações.

TABELA 5. DISTRIBUIÇÃO DAS DMUs E RESPECTIVOS INDICADORES DE EE

Relação: Indicadores de EE - DMUs										
DMUs	Indicadores de EE									
	Ind.1	Ind.2	Ind.3	Ind.4	Ind.5	Ind.6	Ind.7	Ind.8	Ind.9	Ind. n
DMU <sub>1</sub>										
DMU <sub>2</sub>										
DMU <sub>3</sub>										
DMU <sub>4</sub>										
DMU <sub>5</sub>										
DMU <sub>6</sub>										
DMU <sub>n</sub>										

<sup>12</sup> Disponível em: <https://opensourcedea.org/>

<sup>13</sup> Disponível em: <http://www.maxdea.cn/>

<sup>14</sup> Disponível em: [http://www.saitech-inc.com/Products/download\\_DEA.asp](http://www.saitech-inc.com/Products/download_DEA.asp)

Dessa forma, são importadas as entradas requeridas para utilização do *software* e obtidas as saídas após execução do modelo, de forma que sejam visualizados os resultados de ecoeficiência para cada unidade analisada.

São esperados os seguintes resultados: a obtenção dos escores de EE, das folgas e dos *benchmarks*, conforme definições apresentadas por Piran; Lacerda; Camargo (2020). Esses resultados devem ser analisados cuidadosamente pelo responsável da pesquisa, para apresentar de forma clara as conclusões quanto ao(s) processo(s) ecoeficiente(s).

Os escores de ecoeficiência devem ser analisados para determinar qual ou quais processos são ecoeficientes. Após a execução do modelo DEA, as DMUs que apresentarem um *score* igual a 1 são consideradas ecoeficientes; conseqüentemente, as DMUs que apresentarem escores menores que 1 não são ecoeficientes. Quando uma DMU apresenta um *score* de 0,9, por exemplo, no caso de a análise ser feita considerando um modelo orientado para entradas (*inputs*), significa que essa DMU poderia ter uma redução de 10% no seu consumo de recursos, mantendo constante a sua saída (*output*). Se caso for considerado um modelo orientado para saídas, esse mesmo *score* de 0,9 indica que é possível aumentar 10% dos seus *outputs*, mantendo fixo o consumo das entradas.

A análise dos *benchmarks* deve ser realizada para identificar as DMUs ecoeficientes e utilizá-las como referência para as DMUs que não foram consideradas ecoeficientes. Com a execução do modelo DEA no *software*, devem ser obtidos valores que representam a similaridade entre DMUs ecoeficientes e não ecoeficientes. Esse ponto se refere ao *benchmark*, em que a DMU não ecoeficiente toma como base as variáveis da DMU ecoeficiente, a fim de aperfeiçoar os seus parâmetros e se tornar ecoeficiente.

Esta terceira e última parte do modelo de avaliação da EE está representada na Figura 22, que destaca as três etapas principais e as sub etapas detalhadas anteriormente.

A Figura 23 é a representação completa do modelo conceitual proposto, mostrando as três principais etapas e seus respectivos passos que devem ser realizados de maneira sequencial, a fim de obter os resultados de EE para os processos de AT a serem analisados.



FIGURA 22. TERCEIRA PARTE DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA EE

Na Figura 23 está representado o fluxo seguido neste trabalho para obtenção dos resultados apresentados no próximo capítulo.

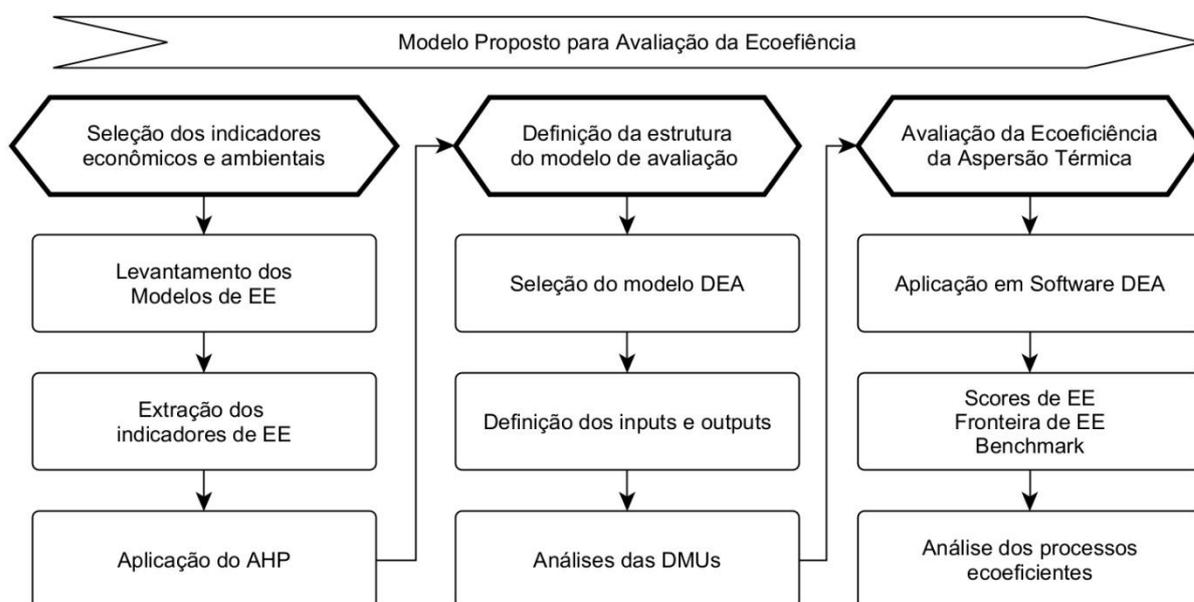


FIGURA 23. MODELO CONCEITUAL DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA

De forma geral, um dos principais desafios em desenvolver e propor a aplicação de modelos visando a ecoeficiência dos processos, produtos ou serviços é fazer com que as empresas entendam que é possível obter valor econômico, ao mesmo tempo em que entrega benefícios ambientais. Essa mesma análise pode ser vista em Schaltegger *et al.* (2012), que aponta esse mesmo desafio no desenvolvimento de modelos de negócios, especificamente quando se trata de modelos sustentáveis.

A aplicação do modelo de avaliação da EE proposto neste trabalho pode impactar positivamente nos processos industriais, no que diz respeito a redução de energia e de recursos (emissões e resíduos) por unidade de produção. Apesar da existência de desafios na aplicação por empresas, entende-se que é uma proposta importante no contexto da sustentabilidade.

Na avaliação da EE, conforme estudos explorados (Quadro 2) levantados da literatura, aponta-se que as várias aplicações em diferentes setores têm como foco principal fornecer os resultados de EE, ou seja, focando na análise quantitativa, em muitos casos não dispondo de informações qualitativas, essenciais para iniciar a análise. O pesquisador, inicialmente, precisa compreender quais são os indicadores que serão avaliados, como irá levantar os dados desses indicadores e como irá estruturar em uma forma adequada de avaliação da EE.

Enquanto diversas aplicações levantadas na revisão utilizam a DEA para calcular e obter os scores de EE (BELUCIO *et al.*, 2021; LOZANO; ADENSO-DÍAZ; BARBAGUTIÉRREZ, 2011; TATARI; KUCUKVAR, 2012; ZHENG; PENG, 2019), a diferença para o presente trabalho é a estrutura qualitativa (conceitual) do modelo aqui proposto, uma contribuição importante para pesquisadores que querem um ponto de partida para avaliar a EE no contexto que deseja. Dessa forma, a DEA é uma integração no modelo proposto, mas antes disso há toda uma análise e levantamento de dados que deve ser realizada.

## 5. APLICAÇÃO DO MODELO: ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA

Com o modelo desenvolvido neste trabalho, ilustrado na Figura 23, foi realizada a avaliação da EE dos processos de AT, seguindo todos os passos estabelecidos, podendo assim validar a proposta aqui apresentada e obter resultados quanto à EE dos processos de aspersão analisados.

Para este trabalho, os dados das variáveis (*inputs* e *outputs*) a serem inseridos e analisados pela DEA foram aqui chamadas de indicadores (ecoindicadores), seguindo a visão da sustentabilidade, em que são utilizados indicadores para aferir os efeitos positivos ou negativos de alguma ação no ambiente.

Na aplicação, a última parte do modelo proposto trata exclusivamente da organização e importação dos dados levantados para o aplicativo SAGEPE, conforme descrito no capítulo anterior, para cálculo e obtenção dos resultados da EE. Para isso, os dados de cada indicador (*input* e *output*) para cada DMU (processos de AT), foram coletados e organizados em uma tabela Excel, seguindo a estrutura da Tabela 5 (pág. 83) e, posteriormente, inserida no SAGEPE. Esses dados estão apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13, em Apêndice. No SAGEPE, os passos que devem ser realizados para cálculo DEA são explícitos, seguindo a ordem das ações que aparecem escritas no aplicativo Web, conforme mostra a Figura 24.

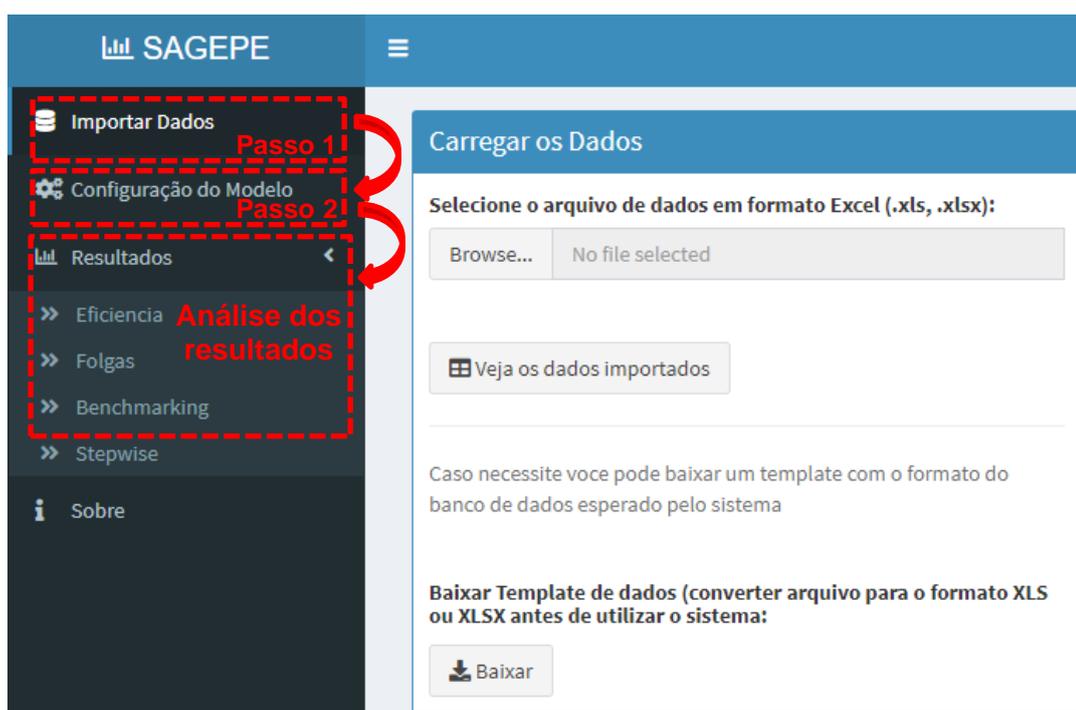


FIGURA 24. APLICATIVO WEB SAGEPE PARA MODELOS DEA

Para o passo 1 destacado na Figura 24, foram importados os dados da Tabela 6 (especificamente uma planilha Excel em formato .xlsx), dados esses de cada indicador coletados em uma empresa especializada em aplicação de revestimentos por aspersão, e, posteriormente, foi feita toda a configuração do modelo no passo 2, na seguinte ordem: seleção das variáveis do modelo (selecionar o que é *input* e o que é *output*); e seleção dos parâmetros do modelo DEA (tipo CRS e a orientação para *input*, conforme definições já discutidas no capítulo anterior).

TABELA 6. DADOS DOS INDICADORES IMPORTADOS NO SAGEPE

DMUs	Indicadores de EE						
	Inputs			Outputs			
	CE	CA	CMP	CP-HR	CF	CTP	CGR
HVOF_1	2,550	0,0300	4493,500	315,110	341,360	8085,600	0,543
HVOF_2	2,540	0,0300	2010,000	420,060	455,060	5544,000	0,847
HVOF_3	0,650	0,0100	353,210	179,480	194,440	1396,090	2,174
HVOF_4	0,820	0,0100	887,080	292,210	316,570	7524,058	1,695
HVOF_5	0,990	0,0100	552,340	116,040	125,710	1524,672	1,515
HVOF_6	0,720	0,0100	297,580	120,140	130,160	2973,581	2,174
HVOF_7	1,110	0,0200	626,480	191,230	207,170	2484,250	1,493
HVOF_8	4,020	0,0500	5826,770	468,310	507,330	13060,627	0,410
HVOF_9	4,150	0,0600	2408,620	491,100	532,020	6588,922	0,397
HVOF_10	1,720	0,0200	1412,210	417,660	452,460	7390,963	0,962
HVOF_11	3,020	0,0400	2271,700	462,110	500,620	6210,317	0,422
ArcSpray_1	2,810	0,0348	50,450	175,560	190,200	799,123	3,030
ArcSpray_2	2,760	0,0342	355,000	155,570	168,540	1291,963	3,125
ArcSpray_3	2,430	0,0301	60,000	185,590	201,060	854,388	3,125
ArcSpray_4	1,430	0,0176	720,000	195,280	211,560	2796,672	2,083
ArcSpray_5	2,690	0,0333	294,000	27,220	29,490	717,054	2,778
ArcSpray_6	0,110	0,0013	48,200	158,600	171,820	744,238	2,564
ArcSpray_7	0,040	0,0005	65,000	72,660	78,720	343,140	7,143
ArcSpray_8	0,380	0,0047	37,000	82,110	88,950	388,187	3,571
ArcSpray_9	0,340	0,0042	568,050	57,170	61,930	1464,058	2,703
ArcSpray_10	0,500	0,0062	60,000	175,560	190,200	817,459	3,030
ArcSpray_11	1,680	0,0208	227,000	141,500	153,300	1802,189	1,064
FlameSpray_1	5,930	0,0022	250,000	29,560	32,020	624,490	2,439
FlameSpray_2	4,830	0,0018	370,000	99,270	107,550	1311,237	2,000
FlameSpray_3	3,460	0,0013	436,000	420,400	455,430	2453,000	2,857
FlameSpray_4	1,970	0,0007	931,000	162,130	175,640	1510,997	5,263
FlameSpray_5	4,690	0,0017	247,000	95,690	103,670	827,751	2,778
FlameSpray_6	6,160	0,0023	903,000	58,110	62,950	2130,382	2,381
FlameSpray_7	6,330	0,0023	258,000	125,810	136,290	1200,402	1,852
FlameSpray_8	4,460	0,0017	214,000	32,850	35,590	538,833	2,632
FlameSpray_9	4,390	0,0016	340,000	30,840	33,410	888,376	2,222
FlameSpray_10	2,400	0,0009	288,000	134,490	134,490	1074,432	2,500
FlameSpray_11	2,460	0,0009	255,000	145,760	145,760	1019,227	2,632

Após carregar os dados numéricos e configurar o modelo no SAGEPE, os dados foram calculados, conforme descrito anteriormente, e obtidos os resultados de Ecoeficiência, Folgas (que representam as oportunidades de melhoria para cada indicador) e *Benchmarking* (que são as referências do processo). Esses resultados, melhor explicados adiante, estão disponibilizados separadamente no próprio aplicativo web, dispostos em planilhas Excel, disponíveis para o *download* de maneira simples e rápida.

Primeiramente, na planilha com resultados de eficiência padrão, foram analisados quais processos apresentaram escores igual a 1, ou seja, quais processos de AT são ecoeficientes, conforme resultados apresentados na Tabela 7.

TABELA 7. RESULTADOS DOS ESCORES: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT

DMU	Ecoeficiência	DMU	Ecoeficiência	DMU	Ecoeficiência
HVOF_1	0,93	ArcSpray_1	<b>1,00</b>	FlameSpray_1	<b>1,00</b>
HVOF_2	0,50	ArcSpray_2	0,44	FlameSpray_2	0,82
HVOF_3	0,42	ArcSpray_3	0,95	FlameSpray_3	<b>1,00</b>
HVOF_4	<b>1,00</b>	ArcSpray_4	0,57	FlameSpray_4	<b>1,00</b>
HVOF_5	0,52	ArcSpray_5	<b>1,00</b>	FlameSpray_5	0,60
HVOF_6	<b>1,00</b>	ArcSpray_6	<b>1,00</b>	FlameSpray_6	<b>1,00</b>
HVOF_7	0,51	ArcSpray_7	<b>1,00</b>	FlameSpray_7	0,63
HVOF_8	<b>1,00</b>	ArcSpray_8	<b>1,00</b>	FlameSpray_8	0,94
HVOF_9	0,51	ArcSpray_9	<b>1,00</b>	FlameSpray_9	<b>1,00</b>
HVOF_10	0,68	ArcSpray_10	0,94	FlameSpray_10	0,99
HVOF_11	0,51	ArcSpray_11	0,76	FlameSpray_11	0,93

Nota: Os valores destacados representam as DMUs ecoeficientes

Como mostrado na Tabela 7, das 33 DMUs analisadas, 14 apresentaram escores igual a 1, ou seja, 14 combinações dos três processos de AT considerados neste trabalho, se mostraram ecoeficientes: HVOF\_4; HVOF\_6; HVOF\_8; ArcSpray\_1, ArcSpray\_5; ArcSpray\_6; ArcSpray\_7; ArcSpray\_8; ArcSpray\_9; FlameSpray\_1; FlameSpray\_3; FlameSpray\_4; FlameSpray\_6; e FlameSpray\_9. Esses resultados estão apresentados de forma gráfica na Figura 25.

Seguindo a definição apresentada por Bidoki *et al.* (2006), tem-se que os processos de AT investigados neste trabalho que se mostraram ecoeficientes apresentam como característica principal uma ótima relação entre a produção (valores econômicos) e o impacto ambiental, ocasionado pelo consumo de materiais e geração de resíduos originados no processo da aspersão.

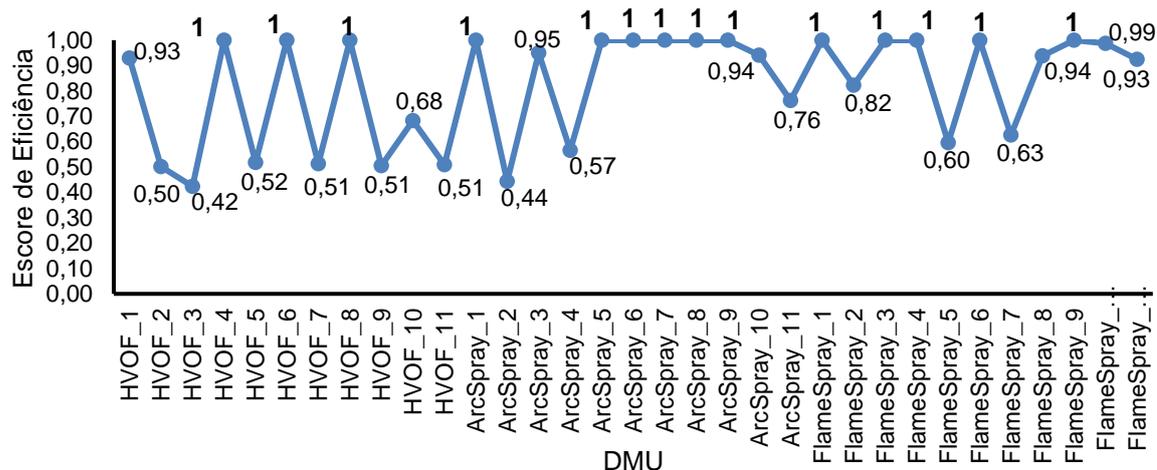


FIGURA 25. ESCORES DE EE PARA AS DMUs ANALISADAS

Com os resultados de EE apresentados na Tabela 7 e na Figura 25, foi possível organizar as DMUs em grupos separados quanto ao grau da EE, de acordo com uma classificação adotada por Andrade (2022), originalmente vista no trabalho de Cavalcanti (2011). Nesse agrupamento, de acordo com os escores de EE obtidos (0 a 100% ou 0 a 1), as DMUs podem se apresentar como: ecoeficientes (100%), média EE (99,9% - 80%), baixa EE (79% - 50%) e, muito baixa EE (menor que 50%). A Tabela 8 mostra os resultados dos quatro grupos que foram classificados os processos de AT (DMUs).

TABELA 8. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE EE

(continua)

Classificação quanto à ecoeficiência	DMUs
<b>100% - Ecoeficientes</b>	HVOF_4
	HVOF_6
	HVOF_8
	ArcSpray_1
	ArcSpray_5
	ArcSpray_6
	ArcSpray_7
	ArcSpray_8
	ArcSpray_9
	FlameSpray_1
	FlameSpray_3
	FlameSpray_4
	FlameSpray_6
FlameSpray_9	

TABELA 8. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE EE

(conclusão)

Classificação quanto à ecoeficiência	DMUs
<b>99,9% - 80% - Média Ecoeficiência</b>	HVOF_1 ArcSpray_3 ArcSpray_10 FlameSpray_2 FlameSpray_8 FlameSpray_10 FlameSpray_11
<b>79% - 50% - Baixa Ecoeficiência</b>	HVOF_2 HVOF_5 HVOF_7 HVOF_9 HVOF_10 HVOF_11 ArcSpray_4 ArcSpray_11 FlameSpray_5 FlameSpray_7
<b>&gt;50% - Muito Baixa Ecoeficiência</b>	HVOF_3 ArcSpray_2

É válido lembrar que, neste estudo, não foi analisada a possível influência dos 33 materiais empregados em cada uma das 11 formas simuladas para cada um dos três processos de AT utilizados. Mesmo com as diferentes características dos materiais utilizados para obtenção da camada protetora, alguns sendo considerados mais resistentes (para corrosão e/ou desgaste) que outros, por exemplo, o foco desta pesquisa voltou-se para a avaliação da EE generalizada para os processos de aspersão, se restringindo, especificamente, em analisar os indicadores levantados para cada técnica e suas respectivas influências na EE de cada processo, e não dos recursos materiais utilizados.

Uma análise técnica sobre os três processos de AT aqui estudados (HVOF, *Arc Spray* e *Flame Spray*), pode apontar possíveis pesos nos resultados obtidos da EE. A escolha do processo a ser utilizado para aplicação do revestimento está diretamente relacionada com a finalidade que se deseja (aumentar a resistência contra a corrosão, oxidação, desgaste etc.). O *Arc Spray*, por exemplo, é um processo que apresenta a maior eficiência térmica do que a de qualquer outro processo de AT (ESPALLARGAS, 2015), e seis das onze DMUs desse processo aqui avaliadas foram consideradas ecoeficientes; já o processo *Flame Spray* é considerado o processo mais simples e de baixo custo em relação ao seu sistema de aplicação, quando comparado com os

demais (ESPALLARGAS, 2015), e cinco das onze DMUs especificamente dessa técnica de aspersão à chama apresentaram como ecoeficientes; e o HVOF, que é um processo de alta eficiência, mas que apresenta um custo mais elevado (ESPALLARGAS, 2015), apenas três das onze DMUs se mostraram ecoeficientes.

Dessa forma, para uma tomada de decisão sobre qual técnica e revestimento utilizar, seguindo os princípios da EE, o profissional além de avaliar, inicialmente, a finalidade do revestimento para decidir qual material deve ser utilizado e consequente processo que seja apropriado para aspersão; sugere-se que o tomador de decisão se aprofunde nos parâmetros e questões técnicas e ambientais dos processos ecoeficientes, para que sejam avaliados quais indicadores podem ser otimizados e, assim, processos ecoeficientes sirvam como base de consultas para melhorias, visando obtenção da EE. Essas análises, *benchmarking* e folgas, estão apresentadas e discutidas a seguir.

### 5.1. BENCHMARKING

A análise de *Benchmarking* é realizada a partir da identificação das DMUs ecoeficientes (ou seja, as que utilizam os recursos de uma forma ótima), para que sirvam como referências para as DMUs que não são ecoeficientes (ou seja, ineficientes no ponto de vista da ecoeficiência analisada). Nesse caso, tem-se que a DMU que apresenta um maior peso geral deve ser a referência para que a DMU ineficiente se baseie (visite a DMU eficiente) em relação às suas práticas e, conseqüentemente, se torne ecoeficiente.

Na Tabela 9, é possível visualizar as 14 DMUs ecoeficientes, ou seja, as que são consideradas *benchmarks*, e as demais DMUs que podem ser basear nas referências, visando se tornarem mais eficientes (ecoefficientes). Analisando os dados apresentados na tabela, tem-se que a DMU 1 (HVOF\_1) pode se basear em quatro DMUs (**HVOF\_4**: 0,155; **HVOF\_8**: 0,526; **ArcSpray\_9**: 0,005; e **FlameSpray\_6**: 0,021), mas, considerando o maior valor, o *benchmark* da DMU 1 é a DMU 8 (HVOF\_8), que apresentou um valor de 0,526. Isso significa que a DMU 1 deve visitar a DMU 8, analisar às suas práticas e aplicá-las para se tornar ecoeficiente.

Seguindo a sequência de análise dos resultados da Tabela 9, tem-se que o *benchmark* da DMU 2 (HVOF\_2) é a DMU 4 (HVOF\_4), que apresenta o maior valor (0,592). Essa análise de *benchmarking* deve ser feita para todas as 19 DMUs que não se mostraram 100% ecoeficientes (escore = 1).



TABELA 9. RESULTADOS DO BENCHMARKING: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT

(conclusão)

DMUs	DMUs Ecoeficientes / Benchmarking													
	HVOF_ 4	HVOF_ 6	HVOF_ 8	ArcSpray_ 1	ArcSpray_ 5	ArcSpray_ 6	ArcSpray_ 7	ArcSpray_ 8	ArcSpray_ 9	FlameSpray_ 1	FlameSpray_ 3	FlameSpray_ 4	FlameSpray_ 6	FlameSpray_ 9
FlameSpray_ 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
FlameSpray_ 2	0,126	0	0	0	0	0	0,102	0	0	0	0,014	<b>0,193</b>	0	0
FlameSpray_ 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
FlameSpray_ 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
FlameSpray_ 5	0,084	0	0	0	0	0	<b>0,329</b>	0	0	0	0	0,052	0,003	0
FlameSpray_ 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
FlameSpray_ 7	0,129	0	0	0	0	0	<b>0,198</b>	0	0	0	0,060	0,008	0	0
FlameSpray_ 8	0	0	0	0	0,005	0	0,148	0	0	<b>0,398</b>	0	0	0	0,265
FlameSpray_ 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
FlameSpray_ 10	0,047	0	0	0	0	0	0,145	0	0	0	0,168	<b>0,172</b>	0	0
FlameSpray_ 11	0,042	0	0	0	0	0	<b>0,201</b>	0	0	0	0,189	0,110	0	0

Nota: Os valores destacados em vermelho na tabela representam os *benchmarks* para as DMUs presentes na primeira coluna

Realizando uma análise com a finalidade de uma aplicação industrial, aponta-se como importante o tomador de decisão considerar as características particulares de cada processo. Como trata-se de três processos de AT que apresentam parâmetros distintos de operação, como diferentes temperaturas, velocidades de aspersão, formas de materiais etc., que devem ser ajustados de acordo à finalidade do revestimento a ser aplicado (BERGER, 2015), sugere-se avaliar se é mais adequado que o *benchmark* seja realizado dentro do seu grupo específico (HVOF, *Flame Spray* ou *Arc Spray*). Como exemplo, para uma DMU não ecoeficiente do grupo *Arc Spray*, como a DMU 13 (ArcSpray\_2), sugere-se avaliar se é mais adequado considerar como *benchmark* a DMU 18 (ArcSpray\_7), ou seja, considerando ser a mesma técnica de aspersão, ao invés da DMU 6 (HVOF\_6), visto que se trata de processos de diferentes parâmetros técnicos operacionais.

## 5.2. ANÁLISE DAS FOLGAS

Ainda, foi possível analisar as folgas que cada DMU apresenta em relação a cada indicador. As folgas representam as **oportunidades de melhoria** de cada indicador analisado das DMUs que não se mostraram ecoeficientes. Em outras palavras, as folgas consistem em valores de referências que devem ser consultados para se estabelecer melhorias para as DMUs ineficientes em relação aos indicadores utilizados no cálculo (*inputs* e *outputs*). A Tabela 10 apresenta os valores das folgas para cada indicador, apresentando o quanto e de que ponto cada DMU pode melhorar.

TABELA 10. RESULTADOS DAS FOLGAS: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT

(continua)

DMU	Ecoeficiência	Indicadores de EE / Folgas						
		CE	CA	CMP	CP.HR	CF	CTP	CGR
HVOF_1	0,93	0,18	0,00	1271,56	22,06	23,89	0	0
HVOF_2	0,50	1,27	0,02	1002,43	209,50	226,95	0	0,38
HVOF_3	0,42	0,37	0,01	203,62	103,47	112,09	0	0
HVOF_4	1	0	0	0	0	0	0	0
HVOF_5	0,52	0,48	0,01	266,26	55,94	60,60	0	0
HVOF_6	1	0	0	0	0	0	0	0
HVOF_7	0,51	0,54	0,01	305,07	93,12	100,88	0	0
HVOF_8	1	0	0	0	0	0	0	0
HVOF_9	0,51	2,05	0,05	1191,60	242,97	263,20	0	1,29
HVOF_10	0,68	0,55	0,01	448,04	132,52	143,55	0	0,78

TABELA 10. RESULTADOS DAS FOLGAS: ECOEFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE AT

(conclusão)

DMU	Ecoeficiência			Indicadores de EE / Folgas				
HVOF_11	0,51	1,48	0,03	1115,00	226,82	245,71	0	0,98
ArcSpray_1	1	0	0	0	0	0	0	0
ArcSpray_2	0,44	2,24	0,03	197,59	86,59	93,81	0	0
ArcSpray_3	0,95	0,12	0,00	3,03	9,38	10,16	0	0
ArcSpray_4	0,57	0,62	0,01	312,82	84,85	91,92	0	0
ArcSpray_5	1	0	0	0	0	0	0	0
ArcSpray_6	1	0	0	0	0	0	0	0
ArcSpray_7	1	0	0	0	0	0	0	0
ArcSpray_8	1	0	0	0	0	0	0	0
ArcSpray_9	1	0	0	0	0	0	0	0
ArcSpray_10	0,94	0,03	0,00	3,52	10,29	11,15	0	0
ArcSpray_11	0,76	0,60	0,01	53,88	33,59	36,39	0	0,85
FlameSpray_1	1	0	0	0	0	0	0	0
FlameSpray_2	0,82	4,29	0,00	65,79	17,65	19,13	0	0
FlameSpray_3	1	0	0	0	0	0	0	0
FlameSpray_4	1	0	0	0	0	0	0	0
FlameSpray_5	0,60	4,49	0,00	99,80	38,66	41,89	0	0
FlameSpray_6	1	0	0	0	0	0	0	0
FlameSpray_7	0,63	5,99	0,00	96,49	47,06	50,97	0	0
FlameSpray_8	0,94	0,91	0,00	13,10	2,01	2,18	0	0
FlameSpray_9	1	0	0	0	0	0	0	0
FlameSpray_10	0,99	1,44	0,00	3,49	11,85	1,63	0	0
FlameSpray_11	0,93	1,55	0,00	19,11	21,30	10,92	0	0

Para uma melhor compreensão desses valores de folgas, ao analisar a DMU 1 (HVOF\_1), que apresentou um escore de eficiência de 0,93 (93%), para que se torne ecoeficiente, é preciso que reduza 0,18 kWh do consumo de energia durante a aspersão, R\$1.271,56 de da matéria-prima, ou seja, diminuir a quantidade de material utilizado na aspersão, R\$22,06 do custo de operação humana, ou seja, otimizar o tempo de trabalho do profissional, e R\$23,89 do custo de fabricação, que significa otimizar o tempo de operação do equipamento.

A análise das folgas deve ser feita pelo especialista com rigor, pois é necessário identificar a melhor forma de otimizar os recursos para alcançar a ecoeficiência do processo. Alguns parâmetros dos processos de AT podem ser engessados, ou seja, parâmetros operacionais estão estabelecidos para serem seguidos de acordo o material a ser aplicado, como a temperatura, que, conseqüentemente, impacta no

consumo de recursos como gás combustível, energia elétrica, água de resfriamento etc. (BOULOS; FAUCHAIS; HEBERLEIN, 2021). Com foco na sustentabilidade dessa área em estudo, é necessário compreender as questões operacionais do equipamento, combinando com os resultados de EE aqui obtidos, como os dados das folgas, para obter uma melhor relação entre *inputs* e *outputs* envolvidos na aspersão.

Por fim, considerou-se que as análises aqui apresentadas da avaliação da EE dos processos de AT são importantes, pois direcionam uma base para que mais pesquisas que abordem aspectos sustentáveis em operações industriais, como o caso em estudo, sejam realizadas. Assim, o capítulo a seguir apresenta as considerações finais que foram obtidas desta pesquisa realizada.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho atingiu o objetivo proposto, qual seja: o desenvolvimento de um modelo conceitual de avaliação de ecoeficiência (EE) dos processos de aspersão térmica (AT), tendo como parâmetros os indicadores ambientais e econômicos resultantes do processo. A proposta foi validada por meio da aplicação de cada passo estabelecido no modelo conceitual, utilizando dados de processos industriais realizados dentro de uma empresa prestadora de serviços de aspersão. Com isso, foi possível analisar quais os processos de AT foram evidenciados como ecoeficientes.

Considerando-se que a AT é uma das principais escolhas das indústrias em relação aos processos de aplicação de revestimentos, os consumos de energia, de materiais e de outros recursos econômicos e ambientais desse processo, justificam a importância de se analisar os impactos ambientais provocados pelo processo em balanceamento com os aspectos econômicos que essas operações propiciam, ou seja, avaliar a EE do processo. E mais importante, com base na Revisão Sistemática inicial realizada neste trabalho, foi identificada a falta de um modelo de avaliação da EE para processos de AT.

Foram, então, identificados, em uma nova RSL, os modelos de avaliação da EE aplicados em diferentes setores e, a partir disso, foram levantados todos os indicadores presentes em cada modelo e utilizados os que mais se adequavam ao processo investigado, como base para a proposta desenvolvida neste estudo.

Sendo a avaliação da EE uma análise embasada em dois dos pilares da sustentabilidade (econômico e ambiental), a forma de abordagem proposta contribuiu para que fosse preenchida a lacuna levantada, partindo-se de uma investigação em relação a EE dos processos de AT, envolvendo tanto os aspectos ambientais como econômicos em uma única abordagem para a avaliação, foco desta pesquisa.

Na primeira parte da construção do modelo conceitual para a avaliação da EE, utilizou o método AHP para selecionar os indicadores econômicos e ambientais (*inputs* e *outputs*) mais adequados dentre aqueles obtidos junto à revisão de literatura, e que alimentaram os passos seguintes da proposta. Os valores destes indicadores foram obtidos para cada DMU (processos de AT) na segunda parte da estrutura desenvolvida, em que foram introduzidos em um modelo DEA-CCR, considerando que qualquer variação nos *inputs* produz uma variação proporcional nos *outputs*.

Finalmente, com a terceira parte do modelo proposto, foi possível avaliar os valores de EE adotando o SAGEPE (<http://www.sagepe.com.br/>), um *software* que disponibiliza gratuitamente uma forma de executar o modelo DEA, necessário para obter os resultados da EE dos processos de AT; também possibilita analisar os resultados da avaliação de EE que são importantes para que o gestor da investigação e/ou os especialistas envolvidos possam compreender melhor os aspectos da EE nas três técnicas de aspersão estudadas: HVOF, *Arc Spray* e *Flame Spray*.

Este estudo aponta que seguir os passos estabelecidos no modelo desenvolvido pode facilitar a obtenção dos resultados da avaliação da EE para os processos de aspersão (e possivelmente até mesmo um outro tipo de processo de manufatura ou uma outra área industrial). Isso porque a construção e a disposição em etapas sequenciais e transparentes, alinhadas com aplicações de abordagens consolidadas na literatura, como AHP e DEA, proporciona aos pesquisadores uma maneira lógica e de vasta adequação no cenário que se deseja avaliar a EE.

Os resultados obtidos na avaliação da EE mostraram que existem processos ecoeficientes presentes nos três tipos analisados, tanto para HVOF, *Arc Spray* e *Flame Spray*. Um dos principais fatores que podem influenciar esses resultados, é o tipo de material de aplicação que foi utilizado, o qual pode causar variação nos parâmetros do processo e custo final do produto. Entretanto, esse tipo de análise é uma limitação desta pesquisa, e por isso é apontada como uma oportunidade para novos estudos.

Dessa forma, as empresas deste setor podem utilizar essas análises como base para analisar os seus processos sob uma perspectiva ambiental concomitantemente com os custos envolvidos e aumentar a competitividade no mercado.

### **6.1. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se, como trabalhos futuros, realizar a aplicação do modelo apresentado neste trabalho para avaliar a ecoeficiência dos processos de EE de forma mais aprofundada, de modo que os materiais de aplicação de revestimentos sejam considerados como parte da interpretação dos resultados, contribuindo assim para próximos estudos nesta área.

Uma análise ainda mais aprofundada, e que igualmente pode ser feita, é ir além da mera aplicação da camada protetora, ou seja, considerar também aspectos como os descartes de materiais, a utilização da peça revestida na avaliação da EE, ou ainda a manutenção dos revestimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, D. M. de. **Análise sobre a eficiência dos gastos públicos em educação no ensino fundamental do estado de Alagoas: uma avaliação usando DEA**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Pública). Universidade de Brasília, DF, 2022.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W.; SWARTS, J.; THOMAS, D. A. An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. **Research in governmental and nonprofit accounting**, v. 5, n. 1, p. 125-163, 1989.
- BARBA-GUTIÉRREZ, Y.; ADENSO-DÍAZ, B.; LOZANO, S. Eco-efficiency of electric and electronic appliances: a data envelopment analysis (DEA). **Environmental Modeling & Assessment**, v. 14, n. 4, p. 439-447, 2009.
- BELEM, M. J. X.; VIEIRA JUNIOR, M.; MUMMOLO, G.; FACCHINI, F. An AHP-based procedure for model selection for eco-efficiency assessment. **Sustainability**, v. 13, n. 21, p. 12121, 2021.
- BELUCIO, M.; RODRIGUES, C.; ANTUNES, C. H.; FREIRE, F.; DIAS, L. C. Eco-efficiency in early design decisions: A multimethodology approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124630, 2021.
- BERG, S. A.; FØRSUND, F. R.; JANSEN, E. S. Malmquist indices of productivity growth during the deregulation of Norwegian banking, 1980-89. **The Scandinavian Journal of Economics**, p. S211-S228, 1992.
- BERGER, L. M. Application of hardmetals as thermal spray coatings. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 49, n. 1, p. 350–364, 2015.
- BIDOKI, S. M.; WITTLINGER, R.; ALAMDAR, A. A.; BURGER, J. Eco-efficiency analysis of textile coating materials. **Journal of the Iranian Chemical Society**, v. 3, n. 4, p. 351-359, 2006.
- BOULOS, M. I.; FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. V. R. **Thermal spray fundamentals: from powder to part**. 2. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2021.

BRADLEE, C. A.; SALING, P.; UHLMAN, B. **Submission for NSF Protocol P352 Validation and Verification of Eco-efficiency Analyses, Part A. BASF's Eco-Efficiency Analysis Methodology**. New Jersey: BASF Corporation, 2009.

BRERETON, P.; KITCHENHAM, B.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; KHALIL, M. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. **Journal of systems and software**, v. 80, n. 4, p. 571-583, 2007.

BRUNELLI, M. **Introduction to the analytic hierarchy process**. Espoo: Springer, 2015.

CAIADO, R. G. G.; DIAS, R. F.; MATTOS, L. V.; QUELHAS, O. L. G.; LEAL FILHO, W. Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency-A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904, 2017.

CARVALHO, H.; GOVINDAN, K.; AZEVEDO, S. G.; CRUZ-MACHADO, V. Modelling green and lean supply chains: An eco-efficiency perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 75-87, 2017.

CAVALCANTE, S.M. de A. **Avaliação da eficiência acadêmica dos cursos de graduação da Universidade Federal do Ceará (UFC): utilização de indicadores de desempenho como elementos estratégicos da gestão**. 215 f. Tese (Doutorado em Educação). Faculdade de Educação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

CAVES, D. W.; CHRISTENSEN, L. R.; DIEWERT, W. E. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 1393-1414, 1982.

CHARMONDUSIT, K; PHATARACHAISAKUL, S.; PRASERTPONG, P. The quantitative eco-efficiency measurement for small and medium enterprise: A case study of wooden toy industry. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 5, p. 935-945, 2014.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European journal of operational research**, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978.

CHENG, C. Y.; REN, J. M.; WANG, R. S.; LIU, F. Eco-Efficiency Assessment of Farming Activity in China. **Advanced Materials Research**, v. 361-363, p. 1776-1779, 2012.

CINCA, N.; GUILMANY, J. M. Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview. **Intermetallics**, v. 24, p. 60–72, 2012.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. **Introduction to data envelopment analysis and its uses: with DEA-solver software and references**. New York, NY: Springer Science & Business Media, 2006.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. (Ed.). **Handbook on data envelopment analysis**. 2. ed. New York, NY: Springer, 2011.

CUBBIN, J.; TZANIDAKIS, G. Regression versus data envelopment analysis for efficiency measurement: an application to the England and Wales regulated water industry. **Utilities policy**, v. 7, n. 2, p. 75-85, 1998.

CZAPLICKA-KOLARZ, K.; BURCHART-KOROL, D.; TUREK, M.; BORKOWSKI, W. Model of eco-efficiency assessment of mining production processes. **Archives of Mining Sciences**, v. 60, 2015.

DAVIS, J. R. (Ed.). **Handbook of Thermal Spray Technology**. 1. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2004.

EGILMEZ, G.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Sustainability assessment of US manufacturing sectors: an economic input output-based frontier approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 53, p. 91-102, 2013.

EL IBRAHIMI, B.; JMIAI, A.; BAZZI, L.; EL ISSAMI, S. Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 740-771, 2020.

ESPALLARGAS, N. Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, Designs, Manufacture and Applications. UK: Woodhead Publishing, 2015.

EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL. Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles. **Official Journal of the European Union**, v. L, n. 269, p. 34–42, 2000.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)**, v. 120, n. 3, p. 253-281, 1957.

FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. V. R.; BOULOS, M. I. **Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part**. 1. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2014.

FEDRIZZI, L.; ROSSI, S.; CRISTEL, R.; BONORA, P. L. Corrosion and wear behaviour of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium. **Electrochimica Acta**, v. 49, n. 17-18, p. 2803-2814, 2004.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FOTOVVATI, B.; NAMDARI, N.; DEGHANGHADIKOLAEI, A. On Coating Techniques for Surface Protection: A Review. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 1, p. 1-22, 2019.

GANDHI, A.; SHANKAR, R. Efficiency measurement of Indian retailers using data envelopment analysis. **International Journal of Retail & Distribution Management**, v. 42, n. 6, p.500-520, 2014.

GARETTI, M.; TAISCH, M. Sustainable manufacturing: trends and research challenges. **Production planning & control**, v. 23, n. 2-3, p. 83-104, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **RAE - Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

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

GÓMEZ, T.; GÉMAR, G.; MOLINOS-SENANTE, M.; SALA-GARRIDO, R.; CABALLERO, R. Measuring the eco-efficiency of wastewater treatment plants under data uncertainty. **Journal of environmental management**, v. 226, p. 484-492, 2018.

GRAND VIEW RESEARCH (GVR). **Thermal Spray Coatings Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (Metal, Ceramics, Abradable), by Technology (Plasma Spray, HVOF), by Application (Aerospace, Medical), And Segment Forecasts, 2022 – 2030**. GVR, 2022. Disponível em:

<<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermal-spray-coatings-market>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

GUO, Y.; LIU, W.; TIAN, J.; HE, R.; CHEN, L. Eco-efficiency assessment of coal-fired combined heat and power plants in Chinese eco-industrial parks. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 963-972, 2017.

GUPTA, S.; DANGAYACH, G. S.; SINGH, A. K.; RAO, P. N. Analytic hierarchy process (AHP) model for evaluating sustainable manufacturing practices in Indian electrical panel industries. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 189, p. 208-216, 2015.

HALKOS, G.; PETROU, K. N. Treating undesirable outputs in DEA: A critical review. **Economic Analysis and Policy**, v. 62, p. 97-104, 2019.

HAMID, M. S. A.; SHAFIQ, N. Eco-efficiency index model for reinforced concrete structural design: Malaysia case study. **ARNP J. Eng. Appl. Sci**, v. 11, n. 8, p. 5453-5458, 2016.

HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L. From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives. **CIRP annals**, v. 54, n. 2, p. 1-21, 2005.

HAZRA, S.; SABIRUDDIN, K.; BANDYOPADHYAY, P. P. Plasma and HVOF sprayed WC-Co coatings as hard chrome replacement solution. **Surface Engineering**, v. 28, n. 1, p. 37-43, 2012.

HE, J.; WAN, Y.; FENG, L.; AI, J.; WANG, Y. An integrated data envelopment analysis and emergy-based ecological footprint methodology in evaluating sustainable development, a case study of Jiangsu Province, China. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 23-34, 2016.

HENGEN, T. J.; SIEVERDING, H. L.; COLE, N. A.; HAM, J. M.; STONE, J. J. Eco-Efficiency Model for Evaluating Feedlot Rations in the Great Plains, United States. **Journal of environmental quality**, v. 45, n. 4, p. 1234-1242, 2016.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263–284, 2017.

HOU, B.; LI, X.; MA, X.; DU, C.; ZHANG, D.; ZHENG, M.; XU, W.; LU, D.; MA, F. The cost of corrosion in China. **npj Materials Degradation**, v. 1, n. 1, p. 10, 2017.

HOUDKOVÁ, Š.; ZAHÁLKA, F.; KAŠPAROVÁ, M.; BERGER, L. M. Comparative study of thermally sprayed coatings under different types of wear conditions for hard chromium replacement. **Tribology Letters**, v. 43, n. 2, p. 139-154, 2011.

HSIEH, T. T.; LAI, K. P.; CHIANG, C. M.; HO, M. C. Eco-efficiency model for green building material in a subtropical climate. **Environmental Engineering Science**, v. 30, n. 9, p. 555-572, 2013.

HU, X.; LIU, C. Slacks-based data envelopment analysis for eco-efficiency assessment in the Australian construction industry. **Construction management and economics**, v. 35, n. 11-12, p. 693-706, 2017.

HUPPES, G.; ISHIKAWA, M. A framework for quantified eco-efficiency analysis. **Journal of industrial ecology**, v. 9, n. 4, p. 25-41, 2005.

HURRICKS, P. L. Review Paper: Some Aspects of the Metallurgy Surface Coatings and Wear Resistance. **Wear**, v. 22, p. 291-320, 1972.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040: Life cycle assessment. principles and framework**. ISO, 2006.

JACOBS, L.; HYLAND, M. M.; DE BONTE, M. Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVOF process. **Journal of thermal spray technology**, v. 7, n. 2, p. 213-218, 1998.

JAMES, A. S.; THOMAS, K.; MANN, P.; WALL, R. The role and impacts of surface engineering in environmental design. **Materials & design**, v. 26, n. 7, p. 594-601, 2005.

JAZI, H. S. (Ed.). **Advanced Plasma Spray Applications**. Rijeka: InTech, 2012.

JI, Y.; LEE, C. Data envelopment analysis. **The Stata Journal**, v. 10, n. 2, p. 267-280, 2010.

KICHERER, A.; STEFAN, S.; HEINRICH, T.; BEATRIZ, F. P. Eco-efficiency. combining life cycle assessment and life cycle costs via normalization. **International journal of life cycle assessment**, v. 12, n. 7, p. 537, 2007.

KIM, T.; TAE, S.; CHAE, C. U.; LEE, K. PROPOSAL for the evaluation of eco-efficient concrete. **Sustainability**, v. 8, n. 705, p. 1-19, 2016.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. 2007. **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**. Durham: EBSE. 2007.

KONDO, Y.; NAKAMURA, S. Waste input–output linear programming model with its application to eco-efficiency analysis. **Economic Systems Research**, v. 17, n. 4, p. 393-408, 2005.

KOOPMANS, T. C. **Analysis of production as an efficient combination of activities**. pp. 33–97. *In* KOOPMANS, T. C. (Ed.). Activity analysis of production and allocation, Cowles Commission New York: Wiley, 1951.

KORTELAINEEN, M. Dynamic environmental performance analysis: a Malmquist index approach. **Ecological Economics**, v. 64, n. 4, p. 701-715, 2008.

KOSKELA, M.; VEHMAS, J. Defining eco-efficiency: A case study on the Finnish forest industry. **Business strategy and the environment**, v. 21, n. 8, p. 546-566, 2012.

KUOSMANEN, T.; KORTELAINEEN, M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 59-72, 2005.

LEE, H.; KIM, C. Benchmarking of service quality with data envelopment analysis. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 8, p. 3761-3768, 2014.

LEME JR., R. D.; NUNES, A. O.; SILVA, D. A. L. Creating value with less impact: Lean, green and eco-efficiency in a metalworking industry towards a cleaner production. **Journal of cleaner production**, v. 196, n. 29, p. 517-534, 2018.

LINS, M. P. E.; MEZA, L. A. **Análise Envoltória de Dados e Perspectivas de Integração no Meio Ambiente de Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: Coppe, 2000.

LIU, W. B.; MENG, W.; LI, X. X.; ZHANG, D. Q. DEA models with undesirable inputs and outputs. **Annals of Operations Research**, v. 173, n. 1, p. 177-194, 2010.

LIU, Y.; SUN, C.; XU, S. Eco-efficiency assessment of water systems in China. **Water resources management**, v. 27, n. 14, p. 4927-4939, 2013.

LORENZO-TOJA, Y.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; CHENEL, S.; MARÍN-NAVARRO, D.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+ DEA method. **Water research**, v. 68, p. 651-666, 2015.

LOVELL, C. K.; PASTOR, J.T.; TURNER, J.A. Measuring macroeconomic performance in the OECD: A comparison of European and non-European countries. **European journal of operational research**, v. 87, n. 3, p. 507-518, 1995.

LOZANO, F. J.; LOZANO, R. Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production. **Journal of cleaner production**, v. 172, p. 4162-4169, 2018.

LOZANO, S.; ADENSO-DÍAZ, B.; BARBA-GUTIÉRREZ, Y. Russell non-radial eco-efficiency measure and scale elasticity of a sample of electric/electronic products. **Journal of the Franklin Institute**, v. 348, n. 7, p. 1605-1614, 2011.

LUCATO, W. C.; VIEIRA JR., M.; SANTOS, J. C. S. Measuring the ecoefficiency of a manufacturing process: a conceptual proposal. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 24, n. 6, p. 755-770, 2013.

LUO, Y.; SALMAN, M.; LU, Z. Heterogeneous impacts of environmental regulations and foreign direct investment on green innovation across different regions in China. **Science of the total environment**, v. 759, p. 143744, 2021.

MAKHLOUF, A. S. H.; TIGINYANU, I. (Eds.). **Nanocoatings and ultra-thin films: Technologies and applications**. 1. ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2011.

MANGLA, S. K.; GOVINDAN, K.; LUTHRA, S. Prioritizing the barriers to achieve sustainable consumption and production trends in supply chains using fuzzy Analytical Hierarchy Process. **Journal of cleaner production**, v. 151, p. 509-525, 2017.

MARDANI, A.; ZAVADSKAS, E. K.; STREIMIKIENE, D.; JUSOH, A.; KHOSHNOUDI, M. A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1298-1322, 2017.

MARIMIN; DARMAWAN, M. A.; WIDHIARTI, R. P.; TENIWUT, Y. K. Green productivity improvement and sustainability assessment of the motorcycle tire production process: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 191, p. 273-282, 2018.

MASTERNAK-JANUS, A.; RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA, M. Comprehensive regional eco-efficiency analysis based on data envelopment analysis: the case of Polish Regions. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 1, p. 180-190, 2017.

MASUDA, K. Optimization model for mitigating global warming at the farm scale: an application to Japanese rice farms. **Sustainability**, v. 8, n. 7, p. 593, 2016.

MEHMETI, A.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Assessing the eco-efficiency improvements of Sinistra Ofanto irrigation scheme. **Journal of Cleaner Production**, v. 138, p. 208-216, 2016.

MEHTA, J.; MITTAL, V. K.; GUPTA, P. Role of thermal spray coatings on wear, erosion and corrosion behavior: a review. **Journal of Applied Science and Engineering**, v. 20, n. 4, p. 445-452, 2017.

MENDES, M. W. D. **Revestimentos a base de Ta/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produzidos por aspersão térmica**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2010.

MENDOZA, J. M. F.; D'APONTE, F.; GUALTIERI, D.; AZAPAGIC, A. Disposable baby diapers: Life cycle costs, eco-efficiency and circular economy. **Journal of cleaner production**, v. 211, p. 455-467, 2019.

METCO. **An Introduction to Thermal Spray**. n. 6, p. 9, 2016. Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/thermal-spray-equipment/>>. Acesso em: 29 fev. 2021.

MEZA, L. A.; BIONDI NETO, L.; MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G. ISYDS-Integrated System for Decision Support (SIAD-Sistema Integrado de Apoio à Decisão): a software package for data envelopment analysis model. **Pesquisa Operacional**, v. 25, n. 3, p. 493-503, 2005.

MIGUEL, P. A. C. (Org.). **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MOIGN, A.; VARDELLE, A.; LEGOUX, J. G.; THEMELIS, N. J. LCA comparison of electroplating and other thermal spray processes. **In: Proceedings of the International Thermal Spray Conference**, 1207-1212, 2009.

MOLINOS-SENANTE, M.; GÉMAR, G.; GÓMEZ, T.; CABALLERO, R.; SALA-GARRIDO, R. Eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants using a weighted Russell directional distance model. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1066-1075, 2016.

MU, E.; PEREYRA-ROJAS, M. **Practical decision making using super decisions v3: An introduction to the analytic hierarchy process**. Springer: Pittsburgh, PA, USA, 2017.

MÜLLER, K.; HOLMES, A.; DEURER, M.; CLOTHIER, B. E. Eco-efficiency as a sustainability measure for kiwifruit production in New Zealand. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 333-342, 2015.

Nações Unidas no Brasil. 2022. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

NAKANO, D. **Métodos de Pesquisa Adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. In: MIGUEL, P. A. C. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. 2ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

NG, R.; NAI, M. L. S.; CHAN, H. L. I.; SHI, C. W. P.; SONG, B. Comparative eco-efficiency analyses of copper-to-copper bonding technologies. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 96-104, 2014.

NG, R.; YEO, Z.; LOW, J. S. C.; SONG, B. A method for relative eco-efficiency analysis and improvement: case study of bonding technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 320-332, 2015.

OLIVEIRA, R.; CAMANHO, A. S.; ZANELLA, A. Expanded eco-efficiency assessment of large mining firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2364-2373, 2017.

OLIVEIRA, R.; CAMANHO, A.; ZANELLA, A. **Eco-efficiency assessment at firm level: an application to the mining sector**. In: PÓVOA A.; DE MIRANDA J. (eds). Operations Research and Big Data. Studies in Big Data, v. 15. Springer, Cham., p. 149-157, 2015.

PATHAK, S.; SAHA, G. C. Development of sustainable cold spray coatings and 3D additive manufacturing components for repair/manufacturing applications: A critical review. **Coatings**, v. 7, n. 8, p. 122, 2017.

PAREDES, R.C. **Aspersão Térmica**. Curitiba: Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná, 2009.

PAWLAK, Z. Rough sets. **International journal of computer & information sciences**, v. 11, n. 5, p. 341-356, 1982.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2. ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd., 2008.

PENADÉS-PLÀ, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; MARTÍ, J. V.; YEPES, V. A review of multi-criteria decision-making methods applied to the sustainable bridge design. **Sustainability**, v. 8, n. 12, p. 1295, 2016.

PERERA, P.; HEWAGE, K.; ALAM, M. S.; SADIQ, R. Eco-efficiency analysis of recycled material for residential construction: a case study of okanagan (BC). **Leadership in Sustainable Infrastructure**, p. 1-13, 2017.

PESSANHA, J. F. M.; MARINHO, A.; LAURENCEL, L. D. C.; AMARAL, M. R. D. S. **Implementing DEA models in the R program. Data Envelopment Analysis and Performance Measurement**, p. 233-239, 2013. In: BANKER, R.; EMROUZNEJAD, A.; BAL, H.; ALP, I.; CENGIZ, M. A. Data Envelopment Analysis and Performance Measurement: Proceedings of the 11th International Conference of DEA, Samsun, Turkey, 2013.

PICAS, J. A.; FORN, A.; MATTHÄUS, G. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves. **Wear**, v. 261, n. 5-6, p. 477-484, 2006.

PIMENOV, D. Y.; MIA, M.; GUPTA, M. K.; MACHADO, Á. R.; PINTAUDE, G.; UNUNE, D. R.; ... KUNTOĞLU, M. Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 166, p. 112660, 2022.

PIRAN, F. S.; LACERDA, D. P.; CAMARGO, L. F. R. **Analysis and Management of Productivity and Efficiency in Production Systems for Goods and Services**. Boca Raton: CRC Press, 2020.

POISSON-DE HARO, S.; BITEKTINE, A. Global sustainability pressures and strategic choice: The role of firms' structures and non-market capabilities in selection and implementation of sustainability initiatives. **Journal of World Business**, v. 50, n. 2, p. 326-341, 2015.

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

PROMENTILLA, M. A. B.; JANAIRO, J. I. B.; YU, D. E. C.; PAUSTA, C. M. J.; BELTRAN, A. B.; HUELGAS-ORBECIDO, A. P.; TAPIA, J. F. D.; AVISO, H. B.; TAN, R. R. A stochastic fuzzy multi-criteria decision-making model for optimal selection of clean technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 1289-1299, 2018.

RAMANATHAN, R. A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. **Journal of environmental management**, v. 63, n. 1, p. 27-35, 2001.

RASHIDI, K.; FARZIPOOR SAEN, R. Measuring eco-efficiency based on green indicators and potentials in energy saving and undesirable output abatement. **Energy Economics**, v. 50, p. 18-26, 2015.

REBOLLEDO-LEIVA, R.; ANGULO-MEZA, L.; IRIARTE, A.; GONZÁLEZ-ARAYA, M. C.; VÁSQUEZ-IBARRA, L. Comparing two CF+ DEA methods for assessing eco-efficiency from theoretical and practical points of view. **Science of The Total Environment**, v. 659, p. 1266-1282, 2019.

ROBAINA-ALVES, M.; MOUTINHO, V.; MACEDO, P. A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 562-573, 2015.

RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA, M.; MASTERNAK-JANUS, A. Eco-efficiency assessment of Polish regions: Joint application of life cycle assessment and data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1180-1192, 2018.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1980.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. Pittsburgh, PA: Springer, 2012.

SALING, P.; KICHERER, A.; DITTRICH-KRÄMER, B.; WITTLINGER, R.; ZOMBIK, W.; SCHMIDT, I.; SCHOTT, W.; SCHMIDT, S. Eco-efficiency analysis by BASF: the method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 4, p. 203-218, 2002.

SANJUAN, N.; RIBAL, J.; CLEMENTE, G.; FENOLLOSA, M. L. Measuring and improving eco-efficiency using data envelopment analysis: A case study of Mahón-Menorca cheese. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 4, p. 614-628, 2011.

SCHALTEGGER, S.; LÜDEKE-FREUND, F.; HANSEN, E. G. Business cases for sustainability: the role of business model innovation for corporate sustainability. **International journal of innovation and sustainable development**, v. 6, n. 2, p. 95-119, 2012.

SCHALTEGGER, S; STURM, A. Ökologische rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten. **Die Unternehmung**, v. 44, n. 4, p. 273-290, 1990.

SCHMIDHEINY, S.; TIMBERLAKE, L. **Changing course: A global business perspective on development and the environment**. Cambridge, MA: mit Press, 1992.

SCOTT, J. A.; HO, W.; DEY, P. K. A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems. **Energy**, v. 42, n. 1, p. 146-156, 2012.

SERRES, N.; HLAWKA, F.; COSTIL, S.; LANGLADE, C.; MACHI, F. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, n. 4, p.1039-1046, 2010.

SERRES, N.; HLAWKA, F.; COSTIL, S.; LANGLADE, C.; MACHI, F.; CORNET, A. Dry coatings and ecodesign part. 1—Environmental performances and chemical properties. **Surface and Coatings Technology**, v. 204, n. 1-2, p. 187-196, 2009.

SIMBOLI, Alberto; TADDEO, Raffaella; MORGANTE, Anna. Value and wastes in manufacturing. An overview and a new perspective based on eco-efficiency. **Administrative Sciences**, v. 4, n. 3, p. 173-191, 2014.

SONG, J.; CHEN, X. Eco-efficiency of grain production in China based on water footprints: A stochastic frontier approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117685, 2019.

STEINHÄUSER, S.; WIELAGE, B.; HOFMANN, U.; SCHNICK, T.; ILYUSCHENKO, A.; AZAROVA, T. Plasma-sprayed wear-resistant coatings with respect to ecological aspects. **Surface and Coatings Technology**, v. 131, n. 1-3, p. 365-371, 2000.

TAHERI, K.; ELHORINY, M.; PLACHETTA, M.; GADOW, R. Thermodynamic Analysis of Resources Used in Thermal Spray Processes: Energy and Exergy Methods. **Entropy**, v. 18, n. 7, p. 237, 2016.

TAHERI, K.; GADOW, R.; KILLINGER, A. Exergy analysis as a developed concept of energy efficiency optimized processes: The case of thermal spray processes. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 511-516, 2014.

TATARI, O.; KUCUKVAR, M. Eco-efficiency of construction materials: data envelopment analysis. **Journal of construction engineering and management**, v. 138, n. 6, p. 733-741, 2012.

TATARI, O.; KUCUKVAR, M. Evaluating eco-efficiency of construction materials: a frontier approach. In: **Computing in Civil Engineering**, p. 736-743, 2011.

THIEDE, S. **Energy efficiency in manufacturing systems**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.

TIANQUN, X.; YUEPENG, C. Eco-efficiency assessment of Wuhan based on data envelopment analysis approach. In: **The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)**. IEEE, p. 2237-2242, 2015.

TODOROVIC, M.; MEHMETI, A.; SCARDIGNO, A. Eco-efficiency of agricultural water systems: Methodological approach and assessment at meso-level scale. **Journal of environmental management**, v. 165, p. 62-71, 2016.

TONE, K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. **European journal of operational research**, v. 130, n. 3, p. 498-509, 2001.

TONE, K. Continuous Optimization A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 143, p. 32-41, 2002.

TSCHAFFON, P.; MEZA, L. A. Assessing the efficiency of the electric energy distribution using Data Envelopment Analysis with undesirable outputs. **IEEE Latin America Transactions**, v. 12, n. 6, p. 1027-1035, 2014.

UHLMAN, B. W.; SALING, P. Measuring and communicating sustainability through eco-efficiency analysis. **Chemical Engineering Progress**, v. 106, n. 12, p. 17-26, 2010.

UHLMAN, B. W.; SALING, P. R. The BASF eco-efficiency toolbox: Holistic evaluation of sustainable solutions. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**, p. 131, 2017.

VAN CANEGHEM, J.; BLOCK, C.; CRAMM, P.; MORTIER, R.; VANDECASTEELE, C. Improving eco-efficiency in the steel industry: the ArcelorMittal Gent case. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 8, p. 807-814, 2010.

VAN CANEGHEM, J.; BLOCK, C.; CRAMM, P.; MORTIER, R.; VANDECASTEELE, C. Improving eco-efficiency in the steel industry: the ArcelorMittal Gent case. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 8, p. 807-814, 2010.

VATAVUK, J.; VENDRAMIN, J. C.; CANALE, L. C. F. **Termos metalúrgicos selecionados no contexto metalomecânico: foco nos ferrosos**. São Paulo: Fontenele Publicações Eireli, 2021.

VILLAFUERTE, J. Considering cold spray for additive manufacturing. **Advanced Materials & Processes**, v. 50, p. 50-52, 2014.

VISWANATHAN, V.; KATIYAR, N. K.; GOEL, G.; MATTHEWS, A.; GOEL, S. Role of thermal spray in combating climate change. **Emergent Materials**, p. 1-15, 2021.

VUKELIC, D.; AGARSKI, B.; BUDAK, I.; ŠIMUNOVIČ, G.; BUCHMEISTER, B.; JAKOVLJEVIĆ, Ž.; TADIĆ, B. Eco-design of fixtures based on life cycle and cost assessment. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 18, n. 1, p. 72-85, 2019.

WALL-MARKOWSKI, C. A.; KICHERER, A.; WITTLINGER, R. Eco-efficiency: inside BASF and beyond. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 16, n. 2, p. 153-159, 2005.

WANG, C. N.; HSU, H. P.; WANG, Y. H.; NGUYEN, T. T. Eco-Efficiency Assessment for Some European Countries Using Slacks-Based Measure Data Envelopment Analysis. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1760, 2020.

WANG, Q.; LUO, S.; WANG, S.; WANG, H.; RAMACHANDRAN, C. S. Wear, erosion and corrosion resistance of HVOF-sprayed WC and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> based coatings for electrolytic hard chrome replacement. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 81, p. 242-252, 2019.

WIDENER, C.A.; ELLINGSEN, M.; CARTER, M. Understanding cold spray for enhanced manufacturing sustainability. **Materials Science Forum**, p. 1867-1873, 2018.

WIDENER, C.A.; OZDEMIR, O. C.; CARTER, M. Structural repair using cold spray technology for enhanced sustainability of high value assets. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 361-368, 2018.

WIJEWARDANE, S. Thermal spray coatings in renewable energy applications. **In: Future Development of Thermal Spray Coatings**. Woodhead Publishing, 2015. p. 241-257.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). **Introduction to the learning module**. WBCSD, 2006. Disponível em: <<https://docs.wbcSD.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). **Measuring eco-efficiency: A guide to reporting company performance**. WBCSD, 39p., 2000. Disponível em: <<https://www.gdrc.org/sustbiz/measuring.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

XU, T.; GAO, P.; YU, Q.; FANG, D. An improved eco-efficiency analysis framework based on slacks-based measure method. **Sustainability**, v. 9, n. 6, p. 952, 2017.

YANG, L.; ZHANG, X. Assessing regional eco-efficiency from the perspective of resource, environmental and economic performance in China: A bootstrapping approach in global data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 173, p. 100-111, 2018.

YIN, K.; WANG, R.; AN, Q.; YAO, L.; LIANG, J. Using eco-efficiency as an indicator for sustainable urban development: A case study of Chinese provincial capital cities. **Ecological Indicators**, v. 36, p. 665-671, 2014.

ZHANG, B.; BI, J.; FAN, Z.; YUAN, Z.; GE, J. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. **Ecological economics**, v. 68, n. 1-2, p. 306-316, 2008.

ZHANG, X. Estimation of eco-efficiency and identification of its influencing factors in China's Yangtze River Delta urban agglomerations. **Growth and Change**, v. 51, n. 2, p. 792-808, 2020.

ZHENG, J.; PENG, X. Does an Ecological Industry Chain Improve the Eco-Efficiency of an Industrial Cluster? Based on Empirical Study of an Energy-Intensive Industrial Cluster in China. **Sustainability**, v. 11, n. 6, p. 1651, 2019.

ZHONG, F.; JIANG, D.; ZHAO, Q.; GUO, A.; ULLAH, A.; YANG, X.; CHENG, Q.; ZHANG, Y.; DING, X. Eco-efficiency of oasis seed maize production in an arid region, Northwest China. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122220, 2020.

ZHOU, C.; SHI, C.; WANG, S.; ZHANG, G. Estimation of eco-efficiency and its influencing factors in Guangdong province based on Super-SBM and panel regression models. **Ecological Indicators**, v. 86, p. 67-80, 2018.

## APÊNDICES

TABELA 11. DADOS COLETADOS DOS INDICADORES DO PROCESSO HVOF

Indicadores	unidade	DMUs										
		HVOF_1	HVOF_2	HVOF_3	HVOF_4	HVOF_5	HVOF_6	HVOF_7	HVOF_8	HVOF_9	HVOF_10	HVOF_11
		WC	CrC	Inc 625	Stell 6	Colm 88	Colm 5	Colm 63	1310 VM	1356 VM	1375	86-10-4
Recursos materiais consumidos do equipamento	kg	4,18	2,68	1,05	1,34	1,49	1,04	1,53	5,55	5,73	2,37	5,38
*Custo 52% Máquina + 48% Homem	R\$	656,47	875,12	373,92	608,78	241,75	250,30	398,40	975,64	1023,12	870,12	962,73
Custo da produção (recursos humanos)	R\$	315,11	420,06	179,48	292,21	116,04	120,14	191,23	468,31	491,10	417,66	462,11
Custo de fabricação (processo)	R\$	341,36	455,06	194,44	316,57	125,71	130,16	207,17	507,33	532,02	452,46	500,62
*Custo da matéria prima	R\$/kg	4493,50	2010,00	353,21	887,08	552,34	297,58	626,48	5826,77	2408,62	1412,21	2271,79
Custo da matéria prima por m <sup>2</sup>	R\$	3554,78	2012,38	353,21	3310,00	552,35	1298,44	895,48	5826,77	2408,61	2979,34	2271,81
Produção Econômica Total	R\$	4211,25	2887,50	727,13	3918,78	794,10	1548,74	1293,88	6802,41	3431,73	3849,46	3234,54
Custo (valor) total do produto	R\$	8085,60	5544,00	1396,09	7524,06	1524,67	2973,58	2484,25	13060,63	6588,92	7390,96	6210,32
Consumo de energia	kWh	2,55	2,54	0,65	0,82	0,99	0,72	1,11	4,02	4,15	1,72	3,02
Consumo de água (diário - produção).	m <sup>3</sup> /h	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06	0,02	0,04
Custo de gestão de resíduos	R\$	1,84	1,18	0,46	0,59	0,66	0,46	0,67	2,44	2,52	1,04	2,37
Geração de resíduos	kg	1,67	1,07	0,42	0,54	0,60	0,42	0,61	2,22	2,29	0,95	2,15

TABELA 12. DADOS COLETADOS DOS INDICADORES DO PROCESSO ARC SPRAY

Indicadores	unidade	DMUs										
		ArcSpray_1	ArcSpray_2	ArcSpray_3	ArcSpray_4	ArcSpray_5	ArcSpray_6	ArcSpray_7	ArcSpray_8	ArcSpray_9	ArcSpray_10	ArcSpray_11
		Inox 420	Inox 308	Inox 316	Inconel 625	Estanho	Zinco	Zn-Al	Al	Base 75B	AN3965	96MXC
Recursos materiais consumidos do equipamento	kg	1,00	0,98	0,97	1,46	1,08	1,19	0,42	0,84	1,13	1,00	2,84
*Custo 52% Máquina + 48% Homem	R\$	365,76	324,11	386,65	406,84	56,71	330,42	151,38	171,06	119,10	365,76	294,80
Custo da produção (recursos humanos)	R\$	175,56	155,57	185,59	195,28	27,22	158,60	72,66	82,11	57,17	175,56	141,50
Custo de fabricação (processo)	R\$	190,20	168,54	201,06	211,56	29,49	171,82	78,72	88,95	61,93	190,20	153,30
*Custo da matéria prima	R\$/kg	50,45	355,00	60,00	720,00	294,00	48,20	65,00	37,00	568,05	60,00	227,00
Custo da matéria prima	R\$	50,45	348,79	58,34	1049,76	316,76	57,20	27,34	31,12	643,43	60,00	643,84
Produção Econômica Total	R\$	416,21	672,90	444,99	1456,60	373,47	387,62	178,72	202,18	762,53	425,76	938,64
Custo (valor) total do produto	R\$	799,12	1291,96	854,39	2796,67	717,05	744,24	343,14	388,19	1464,06	817,46	1802,19
Consumo de energia	kWh	2,81	2,76	2,43	1,43	2,69	0,11	0,04	0,38	0,34	0,50	1,68
Consumo de água	m³/h	0,035	0,034	0,030	0,018	0,033	0,001	0,000	0,005	0,004	0,006	0,021
Custo de gestão de resíduos	R\$	0,33	0,32	0,32	0,48	0,36	0,39	0,14	0,28	0,37	0,33	0,94
Geração de resíduos	kg	0,30	0,29	0,29	0,44	0,32	0,36	0,13	0,25	0,34	0,30	0,85

TABELA 13. DADOS COLETADOS DOS INDICADORES DO PROCESSO FLAME SPRAY

Indicadores	unidade	DMUs										
		FlameSpray_1	FlameSpray_2	FlameSpray_3	FlameSpray_4	FlameSpray_5	FlameSpray_6	FlameSpray_7	FlameSpray_8	FlameSpray_9	FlameSpray_10	FlameSpray_11
		NbO	CrO	16C	102	130	450NS	Alloy 187	1275 H	88 HV	Inconel 625	Stellite 6
Recursos materiais consumidos do equipamento	kg	1,05	1,29	0,92	0,48	0,94	1,09	1,41	0,99	1,17	1,05	0,98
*Custo 52% Máquina + 48% Homem	R\$	61,58	206,82	875,83	337,77	199,36	121,06	262,10	68,44	64,25	258,64	280,31
Custo da produção (recursos humanos)	R\$	29,56	99,27	420,40	162,13	95,69	58,11	125,81	32,85	30,84	124,15	134,55
Custo de fabricação (processo)	R\$	32,02	107,55	455,43	175,64	103,67	62,95	136,29	35,59	33,41	134,49	145,76
*Custo da matéria prima	R\$/kg	250,00	370,00	436,00	931,00	247,00	903,00	258,00	214,00	340,00	288,00	255,00
Custo da matéria prima	R\$	263,68	476,12	401,77	449,21	231,76	988,51	363,11	212,20	398,45	300,96	250,54
Produção Econômica Total	R\$	325,26	682,94	1277,60	786,98	431,12	1109,57	625,21	280,64	462,70	559,60	530,85
Custo (valor) total do produto	R\$	624,49	1311,24	2453,00	1511,00	827,75	2130,38	1200,40	538,83	888,38	1074,43	1019,23
Consumo de energia	kWh	5,93	4,83	3,46	1,97	4,69	6,16	6,33	4,46	4,39	2,40	2,46
Consumo de água	m³/h	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
Custo de gestão de resíduos	R\$	0,41	0,50	0,35	0,19	0,36	0,42	0,54	0,38	0,45	0,40	0,38
Geração de resíduos	kg	0,37	0,45	0,32	0,17	0,33	0,38	0,49	0,35	0,41	0,37	0,34