

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIENCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**CAMPUS SOROCABA**

**ORLANDO HENRIQUE BATISTA JUNIOR**

**MÉTRICAS E MÉTODOS PARA APRIMORAMENTO DA PRODUÇÃO**  
**SUSTENTÁVEL: UMA PESQUISA-AÇÃO NA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE**  
**FRICÇÃO**

**SOROCABA**

**2022**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIENCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CAMPUS SOROCABA**

**ORLANDO HENRIQUE BATISTA JUNIOR**

**MÉTRICAS E MÉTODOS PARA APRIMORAMENTO DA PRODUÇÃO  
SUSTENTÁVEL: UMA PESQUISA-AÇÃO NA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE  
FRICÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do *campus* Sorocaba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação:

Profa. Dra. Juliana Veiga Mendes

SOROCABA

2022

Batista Junior, Orlando Henrique

Métricas e métodos para aprimoramento da produção sustentável: uma pesquisa-ação na indústria de materiais de fricção / Orlando Henrique Batista Junior -- 2022. 90f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Profa. Dra. Juliana Veiga Mendes  
Banca Examinadora: Profa. Dra. Claudia Aparecida de Mattos, Prof. Dr. Ricardo Coser Mergulhão  
Bibliografia

1. Logística Reversa. 2. Indicador. 3. TBL. I. Batista Junior, Orlando Henrique. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Orlando Henrique Batista Júnior, realizada em 29/04/2022.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Juliana Veiga Mendes (UFSCar)

Profa. Dra. Claudia Aparecida de Mattos (FEI)

Prof. Dr. Ricardo Coser Mergulhão (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

*"Pensar não é sair da caverna nem substituir a incerteza das sombras pelos contornos nítidos das próprias coisas, a claridade vacilante de uma chama pela luz do verdadeiro Sol. É entrar no Labirinto, fazer ser e aparecer um Labirinto ao passo que se poderia ter ficado 'estendido entre as flores, voltado para o céu'. E, perder-se em galerias que só existem porque as cavamos incansavelmente, girar no fundo de um beco cujo acesso se fechou atrás de nossos passos - até que essa rotação, inexplicavelmente, abra, na parede, fendas por onde se pode passar."*

(CASTORIADIS, C. *As Encruzilhadas do Labirinto/1.*)

## AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha mãe, Maria Cecília, que mesmo tendo concluído apenas o ensino fundamental sempre me incentivou a trilhar o caminho da ciência. Ao meu pai, *in memoriam*, por me deixar além do nome, valores morais para a vida.

A minha orientadora, Professora Dra. Juliana Veiga Mendes, que sempre esteve disposta a sanar minhas dúvidas e me ajudou a gerar essa pesquisa. Obrigado por toda a dedicação e direcionamentos dados durante esses dois anos.

Ao Professor Dr. Ricardo Coser Mergulhão, uma das pessoas que me incentivaram a entrar no programa de mestrado e que se tornou uma de minhas referências acadêmicas.

A Professora Dra. Lucila Campos e Professora Dra. Claudia Mattos, pelas ricas contribuições durante as bancas de qualificação e defesa. Meu respeito e gratidão.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Engenharia da Sustentabilidade por todo o companheirismo e suporte.

Por fim, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, a todos os professores, pela excelente estrutura, em especial ao Felipe Marques por todo o suporte prestado.

## RESUMO

BATISTA, O. H. **Métricas e métodos para aprimoramento da produção sustentável: uma pesquisa-ação na indústria de materiais de fricção.** 2022. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba, 2022.

A preocupação de órgãos internacionais relativa ao consumo e produção sustentável é crescente devido aos impactos ambientais causados pela humanidade sendo de extrema importância a constante governança dos processos produtivos. Neste contexto, este trabalho propõe um indicador de sustentabilidade para monitoramento e direcionamentos para a mitigação dos impactos ambientais causados na produção de materiais de fricção, indústria altamente nociva ao meio ambiente. Para isso, foi conduzida uma pesquisa dividida em quatro fases, na primeira, uma revisão sistemática da literatura em bases internacionais abrangendo 1.573 artigos. Na segunda fase, a partir de análise de conteúdo, observou-se que os indicadores existentes embora tenham semelhanças gerais, como avaliação de fatores sociais, ambientais e econômicos, carecem de validade externa devido às singularidades das indústrias, diante disso, foi proposto um indicador adaptado para a indústria estudada. Na terceira fase, usando o método de pesquisa-ação para a aplicação e validação prática do indicador desenvolvido, identificando os pontos críticos do objeto de estudo. Após aplicar técnicas de pesquisa operacional e análises estatísticas, conforme a fase quatro, importantes resultados foram alcançados, como a reutilização de 240 toneladas ao ano de materiais antes considerados resíduos, além disso, a diminuição do índice de materiais nocivos utilizados nos produtos caiu de 24,2% para 17,41%. Desta forma, o presente trabalho contribui para o refino da teoria e a validação prática de métricas sustentáveis no contexto específico da indústria de materiais de fricção, trazendo para esse contexto uma ferramenta para o direcionamento ao aprimoramento dessa indústria nociva ao meio ambiente.

Palavras-Chave: Indicador. TBL. Estatística. Logística reversa. Pesquisa operacional.

## ***ABSTRACT***

**BATISTA, O. H. Metrics and Methods to Improve Sustainable Production: An Action-Research in the Friction Materials Industry.** 2021. Thesis (Postgraduate Program in Industrial Engineering – Federal University of São Carlos (UFSCar), Sorocaba, 2021.

The concern of international bodies regarding sustainable consumption and production is growing due to the environmental impacts caused by humanity, and the constant governance of production processes is extremely important. In this context, this work proposes a sustainability indicator for monitoring and directions for the mitigation of environmental impacts caused in the production of friction materials, an industry highly harmful to the environment. For this, a research divided into four phases was carried out, in the first, a systematic review of the literature in international databases covering 1,573 articles. In the second phase, based on a deep content analysis, it was observed that the existing indicators, although they have general similarities, such as the evaluation of social, environmental and economic factors, lack external validity due to the singularities of the industries. indicator adapted to the industry studied. In the third phase, using the action research method for the application and practical validation of the indicator developed, identifying the critical points of the object of study. After applying operational research techniques and statistical analysis, according to phase four, important results were achieved, such as the reuse of 240 tons per year of materials previously considered waste, in addition, the decrease in the rate of harmful materials used in products fell from 24.2% to 17.41%. In this way, the present work contributes to the refinement of the theory and the practical validation of sustainable metrics in the specific context of the friction materials industry, bringing to this context a tool for directing the improvement of this environmentally harmful industry

Keywords: Indicator. TBL Statistic. Reverse logistic. Operational Research.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Série histórica de produção de veículos no Brasil.....	15
Figura 2 – Ciclos da pesquisa-ação .....	19
Figura 3 – Protocolo para seleção de artigos.....	24
Figura 4 – Rede de palavras-chave. ....	25
Figura 5 – Rede de coautoria.....	27
Figura 6 – Publicações ao longo do tempo. ....	27
Figura 7 – Publicações por país. ....	28
Figura 8 – Resumo do Indicador de produção sustentável - IPS. ....	41
Figura 9 – O Indicador de produção sustentável - IPS.....	46
Figura 10 – Componentes do sistema de freio.....	47
Figura 11 – Classificação dos materiais particulados - MP. ....	48
Figura 12 – Resultado obtido na primeira coleta de dados. ....	54
Figura 13 – EVSM – Ferramenta aplicada na produção de pastilhas de freio.....	61
Figura 14 – Resíduos tipo A gerados no processo.....	62
Figura 15 – Indicador pós melhorias. ....	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Escopo direcionador da dissertação. ....	20
Quadro 2 - Expressões de busca.....	23
Quadro 3 - Análise dos periódicos. ....	29
Quadro 4 - Artigos destaque. ....	29
Quadro 5 - Relevância por autor. ....	30
Quadro 6 - Análise das referências. ....	31
Quadro 7 – Estratificação dos artigos por <i>Cluster</i> . ....	33
Quadro 8 – Contribuições do <i>Cluster</i> desenvolvimento sustentável. ....	34
Quadro 9 – Contribuições do <i>Cluster</i> Impacto Ambiental.....	35
Quadro 10 – Contribuições do <i>Cluster</i> Manufatura Sustentável.....	36
Quadro 11 – Contribuições do <i>Cluster</i> Produção Sustentável. ....	38
Quadro 12 – Descrição das notas do indicador.....	40
Quadro 13 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 1: Energia.....	42
Quadro 14 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 2: Água.....	42
Quadro 15 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 1: Materiais .....	42
Quadro 16 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 4: Resíduos.....	43
Quadro 17 – Indicador do pilar TBL Social, parâmetro 1: Legais, norma e gestão. ..	44
Quadro 18 – Indicador do pilar TBL Social, parâmetro 2: Condição de trabalho.....	44
Quadro 19 – Indicador do pilar TBL econômico - IE.....	45
Quadro 20 – Caracterização geral da organização $\alpha$ . ....	49
Quadro 21 – Identificação dos respondentes. ....	50
Quadro 22 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 1: Energia. ..	51
Quadro 23 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 2: Água. ....	51
Quadro 24 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 3: Materiais. 51	
Quadro 25 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 4: Resíduos.51	
Quadro 26 – Indicador Social, parâmetro 1: Legislação, norma e gestão.....	52
Quadro 27 – Indicador Social, parâmetro 2: Condição de trabalho.....	52
Quadro 28 – Indicador econômico - IE.....	53
Quadro 29 – Principais geradores de resíduos. ....	63
Quadro 30 – Composição do material proposto pelo GAMS.....	65
Quadro 31 – Resumo das análises estatísticas. ....	67
Quadro 32 – Resultados obtidos no teste de Compressibilidade.....	68

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Contextualização</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 Problemática</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho</b> .....	<b>17</b>
<b>2 METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Descrição das fases da pesquisa</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 A revisão sistemática da literatura</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Planejamento da revisão sistemática .....	22
2.2.2 Realização da revisão sistemática .....	22
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 Reporte da revisão sistemática: Análise descritiva</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2 Reporte da revisão sistemática: Análise de conteúdo</b> .....	<b>32</b>
3.2.1 Desenvolvimento sustentável .....	33
3.2.2 Impacto ambiental .....	34
3.2.3 Manufatura sustentável .....	35
3.2.4 Produção sustentável .....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>39</b>
<b>4.1 Discussões a respeito da fundamentação teórica</b> .....	<b>39</b>
4.1.1 Construção do indicador IPS - Indicador Ambiental .....	41
4.1.2 IPS - Indicador Social .....	43
4.1.3 IPS - Indicador Econômico .....	44
4.1.4 O Indicador de sustentabilidade IPS .....	45
<b>4.2 Aplicação do indicador</b> .....	<b>47</b>
4.2.1 Caracterização do produto .....	47
4.2.2 Caracterização da empresa .....	49

4.2.3. Primeira coleta de dados.....	50
4.2.3 Análise dos dados .....	54
4.2.4 Análise geral e direcionamentos .....	58
<b>4.3 Proposição de melhorias.....</b>	<b>59</b>
4.3.1 Aplicando pesquisa operacional.....	63
4.3.2 Validação através de análises estatísticas .....	65
4.3.3 Aplicando <i>Desing of experiments</i> .....	68
<b>4.4 Discussão dos resultados .....</b>	<b>69</b>
4.4.1 Discussões sobre o indicador.....	69
4.4.2 Discussões dos resultados da pesquisa-ação.....	72
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo permite uma visão holística do trabalho. Inicialmente, parte-se de uma breve contextualização do leitor sobre o tema. Em seguida, apresenta-se a problemática e a questão de pesquisa, os objetivos, e, por fim, a estrutura do trabalho como um todo.

### 1.1 Contextualização

Segundo estudos como Hagino *et al.* (2016), Glišović *et al.* (2016) e Nogueira *et al.* (2020) devido a vulnerabilidade da saúde humana agravada pela poluição, principalmente em grandes centros urbanos, cada vez mais tem aumentado o número de doenças respiratórias, câncer e doenças cardiovasculares. Wahlström (2011) advoga que os principais agentes poluidores em centros urbanos são gerados por componentes de veículos automotores, como pastilhas de freio, em formato de Material Particulado (MP). Segundo a Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos da América (EUA) os MP's contribuem para a alteração do Ph de lagos, aumento de doenças respiratórias e dermatologias, contaminação do lençol freático e solo (EPA, 2022).

Na literatura, a partir do início dos anos 2000 é possível encontrar estudos que trazem à luz a evolução dos impactos dos MP para a saúde humana. Em estudo na Europa, Katsouyanni *et al.* (2001) indicaram a correlação positiva significativa que para localidades com concentração de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  de partículas  $\text{MP} > 1\mu\text{m}$  aumentaram 0,6% os casos de mortes por doenças respiratórias. Gianini *et al.* (2012) advogam que 30% do  $\text{MP} > 1\mu\text{m}$  é gerado pelo tráfego de veículos, impactando negativamente na qualidade do ar e da água nas regiões urbanas (PIPAL; GURSUMEERAN, 2015; MUNIR, 2017). Sofer *et al.* (2013) observaram que indivíduos expostos a ambientes com níveis de  $\text{MP} > 1\mu\text{m}$  maiores que  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  sofreram um declínio de até 6% da função pulmonar. Além disso, estudos mostraram os efeitos tóxicos da concentração de partículas de material no tecido epitelial, impactando no estresse oxidativo e aumento de casos de inflamações cutâneas e aumento da viscosidade sanguínea (GASSER *et al.* 2009; KABIR; KABIR; KIM, 2016). Agrawal e Mukherjee (2017) advogam que em ambientes urbanos com concentração de  $\text{MP} > 1\mu\text{m}$  os casos de

doenças respiratórias são 80% maiores que em regiões com menor concentração desses materiais.

Devido a isso, nos EUA e países Europeus, cada vez mais órgãos ambientais fazem pressão para redução de poluentes gerados por componentes veiculares. No caso de materiais de fricção para componentes de freios veiculares como pastilhas e sapatas, as legislações vêm exigindo redução de materiais contaminantes presentes em sua formulação desde o final da década de 90 quando se proibiu o uso de amianto, este, altamente carcinógeno, representava em média 30% das formulações de pastilhas de freio (STRAFFELINI, 2015; SINHA *et al.* 2020).

Atualmente o foco de organizações governamentais dos EUA e Europa é a limitação do uso de cobre na composição dos materiais de fricção para sapatas e pastilhas de freio para no máximo 0,5% já em 2025, atualmente esse material representa em média 14% da composição das pastilhas de freio (GARG *et al.* 2000; HULSKOTTE *et al.* 2007; PANT; HARRISON, 2013; VISSCHEDIJK, 2007). Além dos componentes tóxicos supracitados, com o objetivo de melhorar a proteção a saúde humana e ambiental em 2006 a União Europeia – UE, criou a regulamentação EC 1907/2006, em vigor a partir de 2007, gerando uma lista de matérias-primas críticas para a indústria de manufatura, visando monitorar e controlar o uso de substâncias químicas no continente Europeu (*EUROPEAN CHEMICALS AGENCY-ECHA*, 2021).

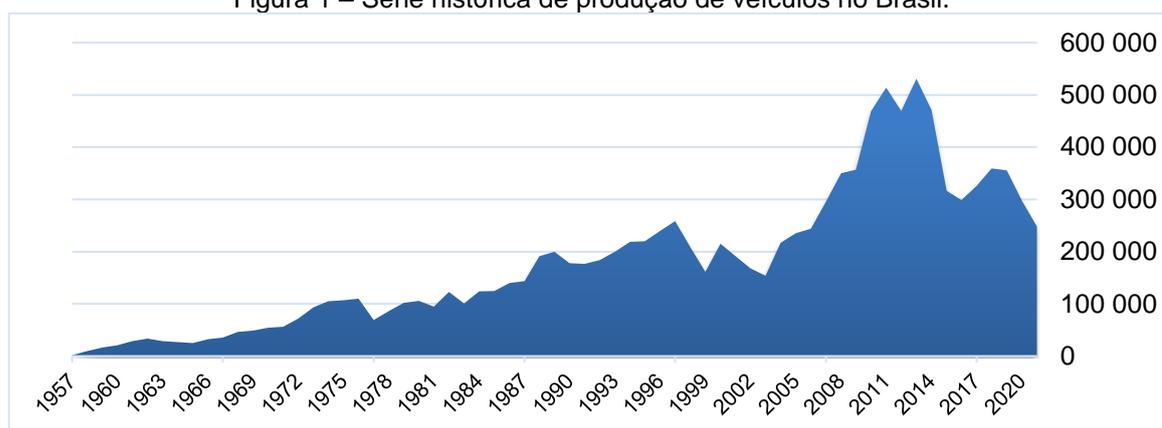
Diante disso, entre os principais desafios de organizações e pesquisadores da atualidade está a busca pelo desenvolvimento de produtos com alto desempenho, baixo custo e que causem o menor impacto ambiental possível, tanto durante os processos de produção, durante o uso pelos consumidores e no final da vida útil desses produtos (GIRUBHA; VINODH, 2012; RAOUFI *et al.* 2017; SWARNAKAR *et al.* 2021). Em alinhamento com o supracitado, com foco na melhoria da qualidade da vida no planeta, a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, adotada em 2015 por 193 países membros da Organização das Nações Unidas - ONU propõem 17 objetivos e 169 metas até o ano de 2030, dentre essas está a ODS 12, com foco na produção e consumo sustentáveis por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização (ODS BRASIL, 2021).

## 1.2 Problemática

No Brasil, embora exista a instrução normativa número 13 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e o ODS12 qual o Brasil é um país signatário, não há nenhuma previsão de legislações conforme os países da UE e EUA limitando o uso de matérias-primas críticas específicas para a produção de materiais de fricção para pastilhas de freio (IBAMA, 2021; ODS BRASIL, 2021).

Desde 1957 a indústria brasileira já produziu mais de 11 milhões de unidades de veículos comerciais leves, com uma média de 410.914 de unidades ao ano na última década, um acréscimo de 69,35% em relação à média da década anterior (Associação Nacional De Fabricante De Veículos Automotores-ANFAVEA, 2021).

Figura 1 – Série histórica de produção de veículos no Brasil.



Fonte: Estatísticas ANFAVEA, 2021.

Com o crescente aumento na produção de veículos, existe proporcionalmente a necessidade da produção de pastilhas de freios. Em cada veículo comercial leve com sistema de disco dianteiro utiliza-se 4 pastilhas de freio, multiplicando-se pela quantidade média de veículos produzidos conforme figura 2, o mercado demandou na última década uma média de 1.643.657 unidades de pastilhas de freio ao ano no país, apenas para o mercado de montadoras de veículos comerciais leves (COULIBALY *et al.* 2021; BHATT *et al.* 2021; ANFAVEA, 2021).

Segundo Gehrig, Hill e Buchmann (2004), em seu estudo conduzido em 8 cidades europeias, a abrasão do processo de frenagem e a resuspensão de partículas representam parte significativa do material MP<sub>10</sub> em centros urbanos. Advogam Abu-Allaban *et al.* (2003) em estudo realizado em diversos estados dos EUA que a

emissão por desgaste de pastilhas de freio em ambientes urbanos representa em média 610mg/km por veículo MP> 1µm. Hagino *et al.* (2016) observaram que um veículo de passeio, ao frear, emite entre 0,04 e 1,4mg/km MP> 1µm.

Considerando uma pastilha de freio média para veículos comerciais leves de 50cm<sup>2</sup> de área e 18mm de espessura com material de atrito com peso específico de 2,8g/cm<sup>3</sup>, cada pastilha portanto utiliza em média 252g de material de fricção. Conforme a classificação da ECHA (2021) 20% dessa composição sejam de materiais críticos ao meio ambiente, como o antimônio, levando em conta a quantidade de pastilhas produzidas estima-se que na última década no Brasil foram consumidas mais de 82 toneladas ao ano desses materiais nocivos, tendo impactos ambientais diretos durante a produção e vida útil das pastilhas de freio (JEONG; RA, 2011; HAGINO *et al.* 2016; CHOY; CHEUNG, 2019; ANFAVEA, 2021; ECHA, 2021; SEO *et al.* 2021).

Diante desses graves impactos ao meio ambiente e a saúde humana, observou-se na literatura o foco em publicações que visam a redução do impacto ambiental durante a vida útil de pastilhas de freio por meio da redução matérias primas críticas em sua composição, como o cobre e o amianto (GIRUBHA; VINODH, 2012; PIPAL; GURSUMEERAN, 2015; MUNIR, 2017; RAOUFI *et al.* 2017; SWARNAKAR *et al.* 2021). Porém, notou-se uma lacuna quanto ao mapeamento dos impactos ambientais gerados durante os processos de produção de pastilhas de freio (QURESHI *et al.* 2019; MATTHEWS, STAMFORD E SHAPIRA 2019; DESPEISSE *et al.* 2012; LAYTON, BRAS E WEISSBUG, 2016; BHANOT *et al.* 2020).

Considerando o supracitado e o papel das empresas para o Brasil atingir as metas referentes a práticas sustentáveis (ODS BRASIL, 2022), este estudo propõe-se a apresentar um indicador de sustentabilidade para o monitoramento e o aprimoramento da produção sustentável com foco específico na indústria de materiais de fricção. Sendo assim, esta pesquisa é voltada para responder duas questões fundamentais:

**Q1- Como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras?**

**Q2- A partir do direcionamento dado por métricas, é possível a mitigação dos impactos ambientais na produção de materiais de fricção?**

### 1.3 Objetivos

A partir das questões apresentadas anteriormente, o objetivo geral desta pesquisa é propor e validar um indicador de sustentabilidade para monitoramento e direcionamento visando a mitigação dos impactos ambientais na produção de materiais de fricção específicos para pastilhas de freio. Alinhados com o problema de pesquisa, os objetivos específicos a seguir foram estabelecidos:

- Mapear métodos de quantificação da sustentabilidade por meio da técnica de revisão sistemática da literatura e a partir desses, propor um indicador de sustentabilidade específico para a indústria de matérias de fricção;
- Aplicar e validar o indicador proposto utilizando a metodologia de pesquisa-ação em uma organização da indústria de materiais de fricção;
- Aplicar e validar métodos de melhoria para aprimorar o desempenho sustentável da organização estudada.

### 1.4 Estrutura do trabalho

Este tópico fornece uma visão da estrutura do presente trabalho, este dividido em cinco capítulos.

Sendo o primeiro capítulo com caráter introdutório, onde contextualiza-se o leitor com o tema, apresenta-se a problemática e a questão de pesquisa e os objetivos. O segundo capítulo fornece uma visão das metodologias de pesquisas empregadas para responder às questões de pesquisa, bem como o escopo direcionador da dissertação. No terceiro capítulo aborda-se a fundamentação teórica do trabalho, baseado em uma revisão sistemática com foco no mapeamento das formas de medir a sustentabilidade. O quarto capítulo contempla os resultados e discussões obtidos com a aplicação dos métodos de melhoria baseados em logística reversa, pesquisa operacional e análise estatística, visando melhorar o desempenho sustentável de uma organização produtora de materiais de fricção para pastilhas de freio veicular. Finalmente, o quinto capítulo contempla as conclusões do trabalho.

## 2 METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente capítulo apresenta as metodologias de pesquisa adotadas e, na sequência, detalha a partir do escopo direcionador, as fases desse estudo.

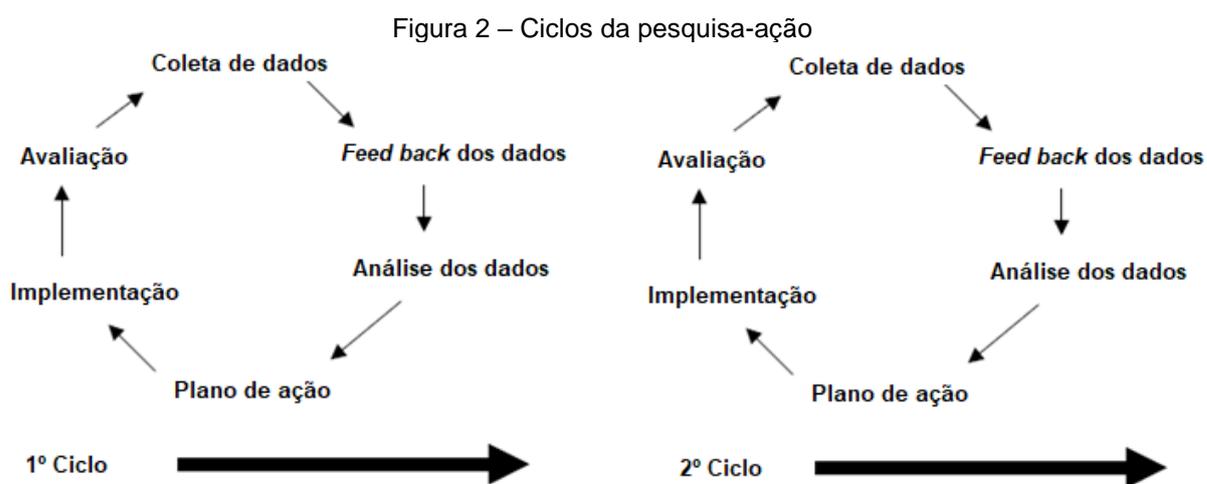
Segundo Marconi e Lakatos (2003) existem diversas formas de conhecimento como o religioso, o filosófico, o popular e o científico, que se diferencia dos demais pois tem por base a lógica e a experimentação, o que permite ser falível em virtude de não buscar ser absoluto o que permite estar em constante aprimoramento. Segundo Bourdieu (1975), o pesquisador participa sempre na importância e no valor que são atribuídos ao seu objeto de estudo, desta forma, foca suas forças em assuntos relevantes à sociedade do seu tempo. Em ciências sociais aplicadas os pesquisadores devem estar sempre atentos quanto ao método e as técnicas de pesquisa a serem escolhidos a fim de minimizar o seu viés nos resultados (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003).

O presente estudo científico, conforme Gil (2008) busca as leis que regem os fenômenos de forma objetiva, racional, sistemática, falível e demonstrável. Utilizando a abordagem mista quantitativa e qualitativa, a classificação geral do trabalho é a pesquisa-ação. Segundo Clark e Castro (2003), este tipo de pesquisa exige que o pesquisador tenha participação ativa na resolução do problema triangulando os métodos exploratórios, descritivos e experimentais. A pesquisa-ação, é uma estratégia de pesquisa que visa produzir conhecimento e resolver um problema prático, reforçam Turrioni e Mello (2012). Coughlan e Coughlan (2002) definem a metodologia de pesquisa-ação como pesquisa em ação e não pesquisa sobre ação, ainda advogam que este método requer presença participativa do pesquisador no campo pesquisado. O pesquisador, durante a sequência de eventos deve aplicar técnicas para resolução de problemas, gerando simultaneamente o mapeamento da situação, soluções para os problemas de pesquisa, refinamento e criação de conhecimento científico, quebrando as herméticas barreiras entre a teoria e a prática (THIOLLENT, 1985; COUGHLAN; COUGHLAN, 2002; TURRRIONE; MELLO, 2010).

A pesquisa-ação, permite ao pesquisador uma ampla escolha de veredas para responder às questões de pesquisa (BRADBURY, H.; DRAPER, P.; DRAPER, P., 2001). Na literatura há diversos exemplos bem-sucedidos de pesquisa-ação no contexto de Gestão de Operações. Senge e John (1992) advogam sobre a importância da aplicação da pesquisa-ação para o aprimoramento do aprendizado e aumento de

flexibilidade no chão de fábrica. Middel *et al.* (2006) salientam a necessidade da colaboração entre pesquisadores e organizações para contribuição de melhoria da prática e desenvolvimento de novas teorias. Evans, Partidário e Lambert (2007) com sua pesquisa-ação demonstraram que quando há colaboração entre pesquisadores e indústrias é possível aprimorar aspectos ambientais, sociais e econômicos. Dey, Bhattacharya e Ho (2015) aplicam métodos inovadores que até então estavam apenas na teoria em casos reais e conseguem aprimorar a cadeia logística de uma organização, alcançando além de confirmação da teoria, valiosos resultados práticos.

A pesquisa-ação, na visão de Coughlan e Coghlan (2002), é um processo cíclico que apresenta os seguintes passos: entendimento do contexto ou necessidade da pesquisa por parte da organização estudada, coleta de dados em campo, análise dos dados, tomada de ação, implementação e, por fim a avaliação dos resultados da ação (Figura 2).



Fonte: Traduzido de Coughlan e Coghlan (2002).

## 2.1 Descrição das fases da pesquisa

Inspirado na abordagem cíclica da pesquisa-ação, proposta por Coughlan e Coghlan (2002), o escopo do presente estudo foi dividido em quatro fases: (1) exploração, (2) elaboração, (3) aplicação, (4) conclusão. O quadro 1 ilustra as fases executadas, em seguida um resumo dos procedimentos metodológicos utilizados para responder às questões de pesquisa.

Quadro 1 - Escopo direcionador da dissertação.

FASES	Etapas	
Fase 1 - Exploração	Explorar a literatura e construir quadro teórico	
Fase 2 - Elaboração	Elaborar indicador de sustentabilidade denominado: Indicador de produção sustentável - IPS	
Fase 3 - Aplicação	Etapa 3.1 – Mapeamento da organização	Etapa 3.2 – Aplicação do IPS
	Etapa 3.3 – Levantamento de melhorias	Etapa 3.4 – Avaliação dos resultados após melhorias
Fase 4 - Conclusão	Considerações finais e conclusões acerca dos resultados obtidos	

Fonte: Do autor, 2022.

A metodologia de pesquisa utilizada na Fase um “Exploração” (quadro 1) para responder à questão de pesquisa (**Q1- Como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras?**) foi a revisão sistemática da literatura, baseada nos passos “Planejamento, Realização e Reporte” propostos por Tranfield, Denyer & Smart (2003). Esta técnica de pesquisa amplamente utilizada em ciências médicas vem sendo aplicada também para análises em gestão de operações (ANTONY, CHAKRABORTY; VASHISHTH, 2019). A revisão sistemática da literatura está detalhada a partir do tópico 2.2 do presente capítulo.

Tendo sido feito o mapeamento da literatura sobre indicadores de sustentabilidade encontrados a partir da revisão sistemática da literatura, utilizou-se o *software* gratuito VOSviewer® para gerar a rede de palavras-chave (IKEZIRI *et al.* 2019; VAN ECK; WALTMAN, 2017) facilitando assim a análise de conteúdo.

A partir da análise de conteúdo iniciou-se a Fase dois “Elaboração” (quadro 1), onde foi proposto o instrumento de avaliação de sustentabilidade. O instrumento proposto foi denominado Indicador de Produção Sustentável – IPS, este avalia o desempenho da sustentabilidade a nível empresarial com foco específico na indústria produtora de materiais de fricção para pastilhas de freio.

Com o IPS elaborado a Fase três “Aplicação” (quadro 1) foi delineada para responder à questão de pesquisa (**Q2- A partir do direcionamento dado por métricas, é possível a mitigação dos impactos ambientais na produção de materiais de fricção?**).

Inicialmente, com base na classificação proposta por MacCarthy e Fernandes (2000), mapeou-se a organização produtora de pastilhas de freio estudada a fim de ter um entendimento de suas características (Fase 3.1 - quadro 1). Após isso, utilizando o método de pesquisa-ação proposto por Coughlan e Goghlan (2002) iniciou-se a primeira etapa da coleta de dados na empresa, primeiramente foi realizada

uma reunião introdutória com os respondentes a fim de explicar de maneira detalhada o objetivo da aplicação do IPS, fornecendo uma prévia explicação dos parâmetros deste e do tripé de sustentabilidade. As reuniões subsequentes foram feitas apenas entre o pesquisador e o respondente de cada processo. O período avaliado na primeira aplicação do indicador foram os dados de 2020 em comparação com os dados de 2019 (Fase 3.2 - quadro 1).

Após a coleta de dados com o IPS, observou-se os principais pontos de aprimoramento (Fase 3.3 - quadro 1). Conforme Shahbazi *et al.* (2019) passou-se a aplicar a ferramenta *Environmental Value Stream Mapping* - EVSM e a ferramenta *Waste Flow Mapping* - WFM, estas direcionaram aos principais pontos de melhoria na empresa estudada. Uma vez identificados os pontos de melhoria, a partir dos passos indicados por Bertrand e Fransoo (2002) construiu-se um modelo matemático utilizando a linguagem GAMS que levou a uma solução ótima para o problema.

Elaborado o modelo, aplicou-o na organização e validou-se os resultados com análises estatísticas ANOVA e análise de capacidade conforme, também foi aplicada a técnica *Design of Experiments* - DOE para melhorias adicionais (MONTGOMERY, 2000, HAIR *et al.* 2009; BROOK, 2017; WOOLURU; NAGESH, 2014)

Depois de as melhorias terem sido validadas estatisticamente, com o processo colocado em prática, mensurou-se novamente o desempenho do processo utilizando o IPS (Fase 3.4 - quadro 1). A fase três como um todo envolveu as atividades de coleta de dados em campo, *feedback* dos dados, análise dos dados, tomada de ação, implementação e a avaliação dos resultados da ação (COUGHLAN E GOGHLAN, 2002). Na Fase 4 (quadro 1), foram discutidos os resultados e apresentadas as conclusões da pesquisa realizada.

## **2.2 A revisão sistemática da literatura**

Visando aprofundamento no assunto e responder às questões de pesquisa foi conduzida a revisão sistemática da literatura, com base na proposta de Tranfield, Denyer e Smart (2003), aplicando os passos Planejamento, Realização e Reporte, este último dividido em análise descritiva e análise de conteúdo, abordado no capítulo 3. Essa atividade é parte da Fase 1 – Exploração (Quadro 1).

Entendendo a importância de não se perder contribuições relevantes feitas por pesquisadores em trabalhos anteriores, a questão direcionadora para o delineamento da revisão da literatura foi: “Quais são os métodos de quantificação da sustentabilidade descritos na literatura?”.

### 2.2.1 Planejamento da revisão sistemática

Com base na necessidade identificada no tópico 2.2, o protocolo de execução da revisão foi criado com a finalidade de preservar a criatividade do pesquisador e garantir que o viés do mesmo não interfira nos resultados do trabalho. Os termos de busca foram definidos, a saber: medição (e suas variáveis) e sustentabilidade (e suas variáveis). As bases de dados consultadas foram a *Web of Science - WOS* e *Scopus*, devido sua relevância internacional.

Quanto aos critérios de inclusão, foram selecionados artigos a partir de termos de busca validados por especialista. Referente ao limite temporal, não se delimitou uma data inicial para as contribuições e o limite final foi em dezembro de 2020, uma vez que a revisão sistemática da literatura foi elaborada em janeiro de 2021. Além disso, buscando a maior assertividade, limitou-se a apenas artigos de periódicos completos revisados por pares em inglês ou português.

Quanto aos critérios de exclusão, de maneira tautológica, todos os artigos e outros documentos que não foram encontrados em periódicos revisados por pares e em outros idiomas que não o inglês ou português e artigos duplicados (TRANFIELD, DENYER; SMART, 2003).

Após esse primeiro filtro, foi realizada a leitura de títulos e *abstracts* para a exclusão de artigos que, sinteticamente, não aderiam à questão de pesquisa, trabalhos sobre simulação e trabalhos que utilizassem dados de outras fontes.

### 2.2.2 Realização da revisão sistemática

As expressões de busca foram definidas conforme o tópico 2.2.1 a fim de que a pesquisa abrangesse o conhecimento desenvolvido na área de indicadores de sustentabilidade. Conforme argumentam Tranfield, Denyer e Smart (2003), para a revisão sistemática da literatura o pesquisador, após validar as expressões de busca

com especialistas da área, deve reportá-las em detalhes o suficiente para que possa ser replicada. O quadro 2, mostra as expressões de busca usados em cada portal e os documentos encontrados.

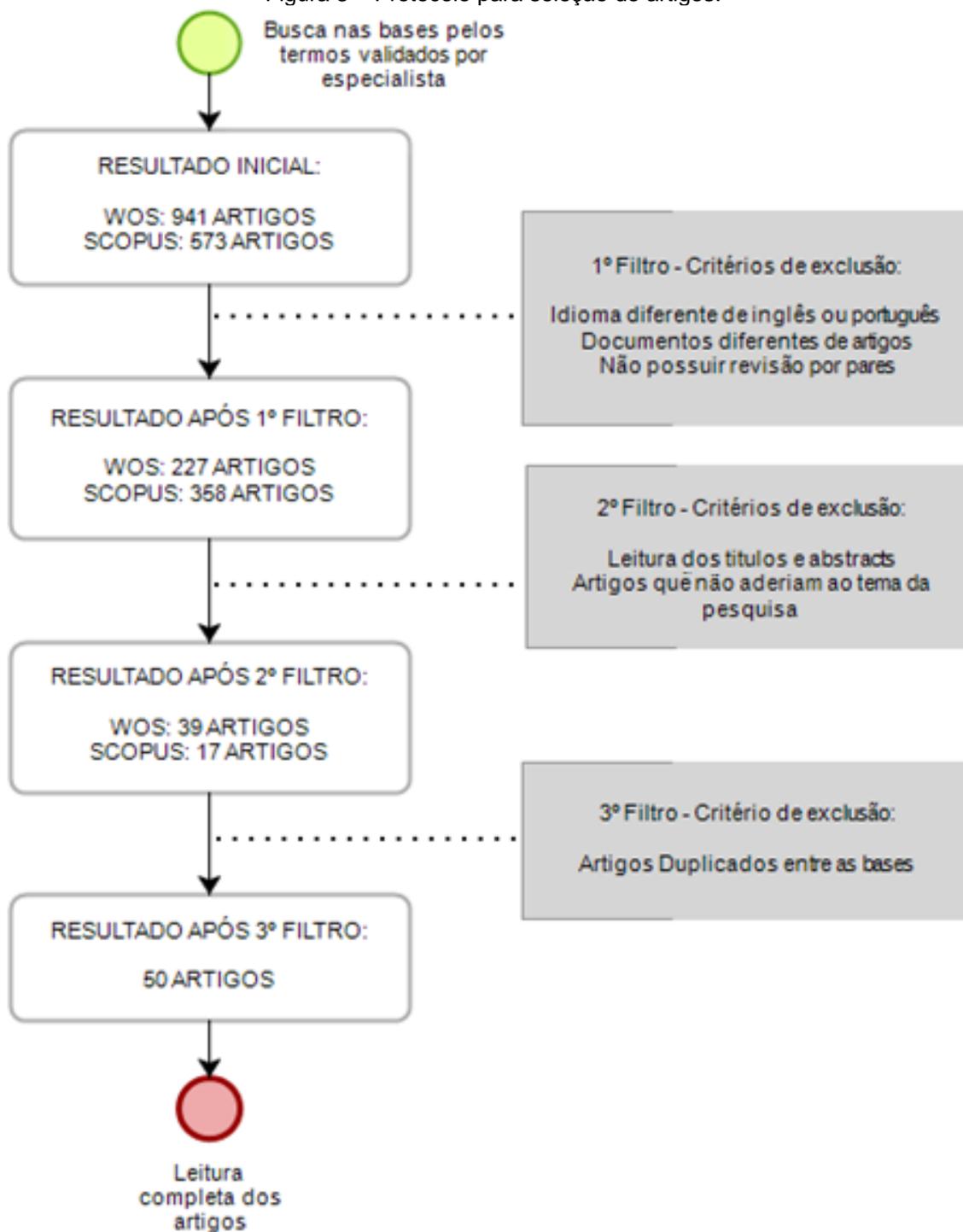
Quadro 2 - Expressões de busca

Base	Rótulo	Termos de busca	Resultados
WOS	TS	<i>TS= (measure OR measuring OR assessment OR appraisal OR evaluation OR KPI OR indicator OR performance) AND TS= ("production sustainability" OR "Sustainable production" OR "Sustainable manufacturing")</i>	941
SCOPUS	TITLE-ABS-KEY	<i>TITLE-ABS-KEY (measure OR measuring OR assessment OR appraisal OR evaluation OR KPI OR indicator) AND TITLE-ABS-KEY ("production sustainability" OR "Sustainable production" OR "Sustainable manufacturing")</i>	573

Fonte: Do autor, 2022.

As expressões expostas no quadro 2, após validadas com especialista da área de gestão ambiental e pesquisadas nas bases, inicialmente resultaram em 941 documentos no portal da *Web of Science* - WOS e em 573 documentos no portal Scopus, totalizando 1.573 documentos. Seguindo os procedimentos formalizados no tópico planejamento, em cada base de dados, foram removidos documentos que não estavam no idioma inglês ou português, também foram excluídos documentos que não eram artigos de periódicos revisados por pares. Com esse filtro inicial, foi possível encontrar 358 artigos no portal Scopus e 227 no portal WOS. Após isso, iniciou-se a leitura do título e *abstract* a fim de verificar se esses estavam de acordo com a questão de pesquisa. Com esse filtro, e buscando atender a premissa de manter na revisão apenas artigos que atendam os critérios de inclusão e que não tenha manifestado nenhum critério de exclusão (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003), chegou-se ao total de 17 artigos do portal Scopus e 39 artigos do portal WOS, o principal fator de exclusão nessa etapa foi que os artigos indicavam em sua maioria técnicas de mensuração de impactos ambientais voltados especificamente para o agronegócio, tais como, análise de solo e de efluentes contaminantes. A próxima etapa foi a averiguação de artigos duplicados entre as bases, nesta etapa foram encontrados 6 artigos que foram removidos da base de análise. Após a execução total do protocolo, chegou-se ao total de 50 artigos para a leitura completa. A figura 3 dá visão do procedimento de seleção dos artigos.

Figura 3 – Protocolo para seleção de artigos.



Fonte: Do autor, 2022.

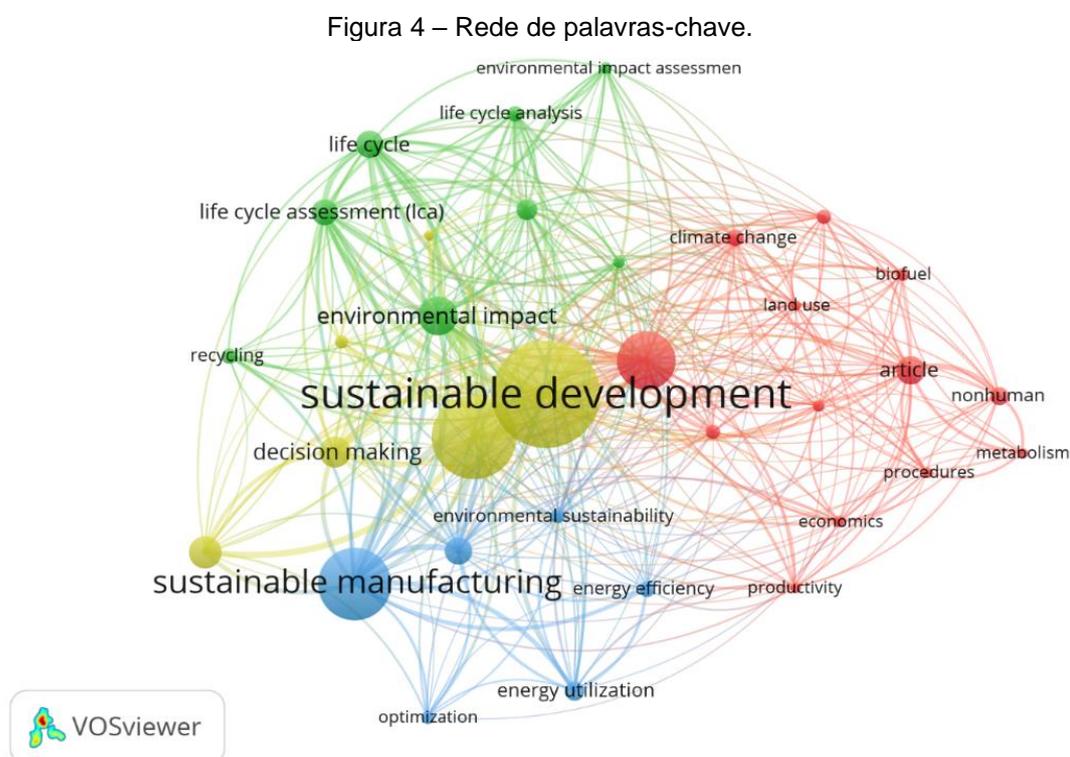
Depois de finalizada a seleção dos artigos o próximo capítulo trará a etapa de “Reporte” da revisão sistemática da literatura, divididos em análise descritiva e análise de conteúdo. Utilizando o software VOSviewer para análise descritiva, facilitando a análise de conteúdo, assim, finalizando a Fase 1 – Exploração, conforme quadro 1.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica feita a partir da metodologia de Revisão Sistemática da Literatura é importante por ser baseada em evidências, o que diminui os efeitos do viés do pesquisador (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Neste capítulo será abordada a etapa “Reporte” da revisão sistemática, dividida em análise descritiva e análise de conteúdo.

#### 3.1 Reporte da revisão sistemática: Análise descritiva

Iniciando a análise descritiva da etapa “Reporte”, utilizando o *software* VOSviewer® examinou-se a rede de palavras-chave, formada pela busca de artigos que convergem os temas indicadores e produção sustentável. A figura 4, gerada pelo *software* reflete a supracitada rede de palavras-chave.



Fonte: Do autor, 2022.

Esta rede é formada pelo número de coocorrência de duas palavras-chave, o número de publicações nas quais as duas palavras ocorrem juntas (IKEZIRI *et al.*

2019; VAN ECK; WALTMAN, 2017). A rede construída para a atual pesquisa foi desenvolvida incluindo apenas os termos com no mínimo 10 ocorrências. Observa-se que os termos geraram 4 agrupamentos, amarelo, vermelho, azul e verde.

O agrupamento com maior número de itens, o vermelho, teve como palavra-chave de maior relevância “Produção Sustentável” e termos correlatos ao clima. Esse agrupamento foi formado majoritariamente por estudos de casos voltados para avaliação da cadeia de produção agrícola como um todo, como a avaliação desde o plantio, industrialização e distribuição de frutas e hortaliças.

Já o segundo agrupamento em número de itens (48), o cluster verde. Sendo a palavra-chave com maior relevância “Impacto Ambiental”, seguido por termos correlatos ao ciclo de vida. Este agrupamento teve metodologia de escrita dividida entre Estudos de caso e Survey, com foco na indústria de manufatura de componentes metálicos.

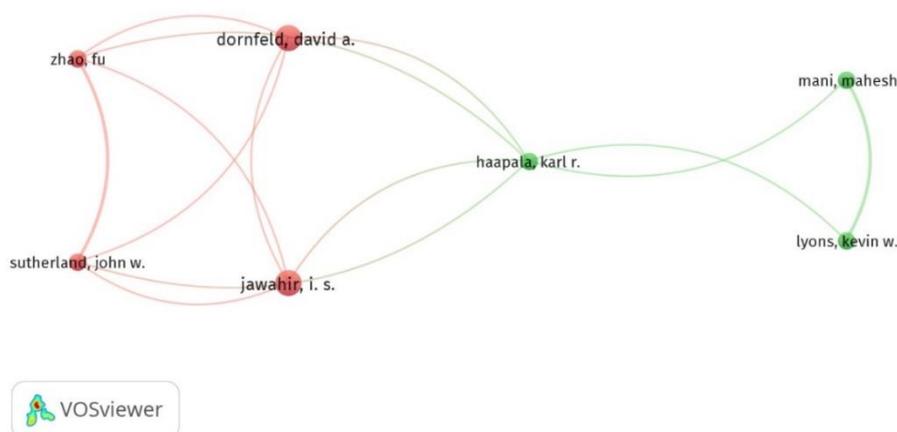
O agrupamento azul, composto por 15 itens teve a palavra-chave de maior destaque “Manufatura sustentável”, a metodologia de pesquisa mais empregada foi o estudo de caso tendo eficiência energética da indústria metalmeccânica como principal objeto de estudo.

O quarto agrupamento, amarelo, composto por 15 itens teve a palavra-chave de maior destaque “Desenvolvimento Sustentável”, seguido por termos correlatos a tomada de decisões estratégicas. Para esse agrupamento a principal metodologia utilizada, a exemplo dos outros agrupamentos, foi o estudo de caso com foco em organizações de manufatura.

Esses delineamentos revelam que a preocupação dos pesquisadores do tema “Indicadores de sustentabilidade” tem foco em questões ambientais e que diversas dimensões podem ser analisadas, como o efeito estufa, consumo de energia, ciclo de vida e tomadas de decisões voltadas à sustentabilidade econômica e social. A divisão desses artigos em agrupamentos facilitou a análise de conteúdo descrita no tópico 3.2 do presente capítulo.

Buscando avaliar as redes de coautoria, utilizando o *software Vosviewer*®, baseando-se nos autores e suas pesquisas em conjunto, utilizando o critério de no mínimo dois artigos, obteve-se dois *clusters*, como pode-se observar na figura 5 a seguir.

Figura 5 – Rede de coautoria.

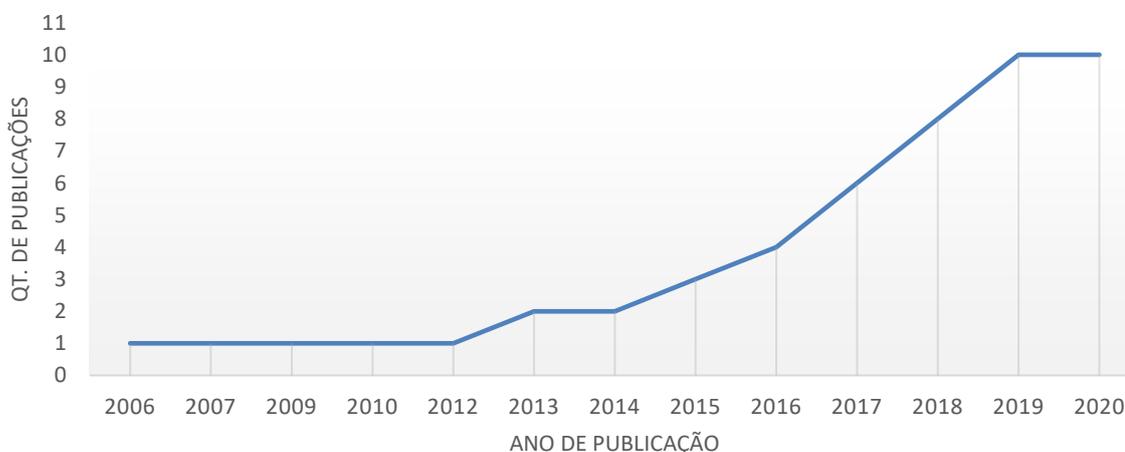


Fonte: Do autor, 2022.

O autor David Dornfeld tem 5 artigos publicados, desses 2 com Jawahir I.S., 2 com Zhao Fu, 1 com John Sutherland e 1 com Karl Haapala, este sendo um elo entre os pesquisadores dos dois *clusters*. A rede de colaboração entre esses tem estudos voltados a manufatura sustentável e consumo de energia. Por outro lado, o *cluster* verde, que é composto pelos autores Karl Haapala, Mahesh Mani e Kevin Lyons focam no estudo de desenvolvimento sustentável.

Seguindo a execução do protocolo para os 50 artigos selecionados observou-se o aumento crescente de publicações voltadas a definição, implementação ou implantação de técnicas de medições de sustentabilidade em organizações. Observa-se na figura 6 a tendência de aumento a partir de 2012 de artigos com essa preocupação.

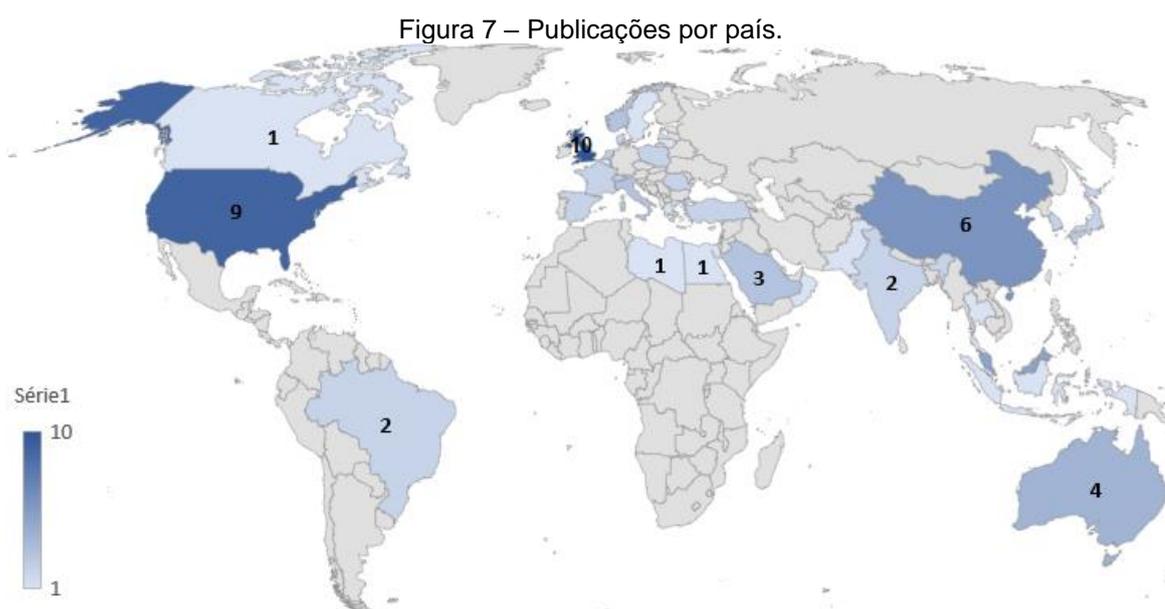
Figura 6 – Publicações ao longo do tempo.



Fonte: Do autor, 2022.

No contexto dos países onde as pesquisas foram realizadas, embora tenham sido selecionados 50 artigos para revisão completa, as pesquisas foram conduzidas em muitos dos casos triangulando os dados em mais territórios, resultando estudos em 33 países. Observando a relevância geral dos artigos por país, verifica-se que o país com maior concentração de estudos é o Reino Unido (10), seguido pelos Estados Unidos da América (9) e China (6). Um fator relevante a se considerar é que segundo dados da ONU (2021), os Estados Unidos e a China são os países com maior índice de poluição, fazendo elevar a média para 9 em cada 10 pessoas terem contato com ar poluído, elevando casos de doenças respiratórias, levando a 7 milhões de mortes prematuras, além do aumento do efeito estufa e agravamento da crise climática.

A figura 7 ilustra a distribuição de publicações por país. Foram mapeadas 2 publicações Brasileiras sobre o tema.



Fonte: Do autor, 2022.

Continuando a análise das publicações selecionadas para a leitura completa, os 50 artigos estão distribuídos em 13 periódicos. O *Journal* com maior número de publicações, 40%, é o *Sustainability, journal* europeu voltado à sustentabilidade, meio ambiente, cultura e economia com *H-index* de 85 e fator de impacto de SJR 0,61. O segundo com 10% das publicações é o *Journal of cleaner production*, este periódico tem foco em produção mais limpa, meio ambiente e sustentabilidade, com *H-index* de 200 e fator de impacto de SJR 1,94.

Um fator relevante a se observar é que através dos termos de busca chegou-se a periódicos com foco em questões ambientais e econômicas, o quadro 3 divulga os periódicos selecionados a partir da técnica de revisão.

Quadro 3 - Análise dos periódicos.

Periódico	Artigos	%	H Index	SJR
<i>Sustainability</i>	20	40%	85	0,61
<i>Journal of cleaner production</i>	5	10%	200	1,94
<i>Resources conservation and recycling</i>	4	8%	130	2,47
<i>Science of the total environment</i>	3	6%	244	1,80
<i>International journal of life cycle assessment</i>	3	6%	105	1,09
<i>Journal of industrial ecology</i>	3	6%	102	2,38
<i>Journal of manufacturing Science</i>	2	4%	98	1,37
<i>Journal of manufacturing systems</i>	2	4%	70	2,31
<i>International journal of precision engineering</i>	2	4%	50	0,51
<i>Sustainable production and consumption</i>	2	4%	26	1,02
<i>Journal of industrial engineering and management</i>	2	4%	29	0,39
<i>Computers and chemical engineering</i>	1	2%	139	1,02
<i>Ifac-papersonline</i>	1	2%	72	0,31

Fonte: Do autor, 2022.

Fazendo uma análise geral, os artigos com maior número de citações são:

Quadro 4 - Artigos destaque.

Artigo	Autor	Ano de publicação	Total de citações
<i>A case study of lean, sustainable manufacturing</i>	Miller, G., Pawloski, J., Standridge, C.	2010	127
<i>Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability</i>	Azapagic, A., Stamford, L., Youds, L., Barteczko-Hibbert, C.	2016	49
<i>Applying distance-to-target weighing methodology to evaluate the environmental performance of bio-based energy, fuels, and materials</i>	Weiss, Martin; Patel, Martin; Heilmeyer, Hermann; et al.	2007	44
<i>Sustainable manufacturing for Indonesian small- and medium-sized enterprises (SMEs): the case of remanufactured alternators</i>	Fatimah, Y.A., Biswas, W., Mazhar, I., Islam, M.N.	2013	35
<i>Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use</i>	Jolliet, Olivier; Anton, Assumpcio; Boulay, Anne-Marie; et al.	2018	30

Fonte: Do autor, 2022.

Os cinco artigos destacados no quadro 4 representam quase 300 citações, com uma média de aproximadamente 10 citações ao ano. Para os 50 artigos selecionados, um total de 139 autores foram encontrados. Uma breve análise de relevância por quantidade de citações dos autores, excluindo autocitações, é exibida no quadro 5.

Quadro 5 - Relevância por autor.

<b>Autor</b>	<b>Nº Publicações</b>	<b>Nº Citações</b>
Subic, A.	128	2.063
Shabani, B.	55	1.298
Welo, T.	120	522
Moldvska, A.	8	119
Stamford, L.	7	69

Fonte: Do autor, 2022.

Conforme o quadro 5, o autor Aleksandar Subic tem o maior número de citações. A publicação mais citada desse autor tem mais de 1.250 citações na WOS, o artigo de Subic (2010) “*Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of passenger seats and their impact on different vehicle models*”, busca minimizar impactos ambientais na produção de veículos.

O segundo autor em número de citações é Bahman Shabani (quadro 5). O artigo mais citado deste autor tem o tema “*Re-envisioning the role of hydrogen in a sustainable energy economy*” Shabani (2013). Este artigo traz uma proposta do uso do hidrogênio como fonte estratégica de energia limpa e conta com 193 citações na WOS.

A terceira autora em citações (quadro 5) é Torgeir Welo. A publicação com maior número de citações é também voltada ao tema ambiental, a revisão da literatura Welo (2017) “*The concept of sustainable manufacturing and its definitions: A content-analysis based literature review*” conta com 41 citações na WOS, e mostra os conceitos da manufatura sustentável.

Conforme observa-se no quadro 5 Anastasiia Moldvska é a quarta em citações. O artigo “*A Holistic approach to corporate sustainability assessment: Incorporating sustainable development goals into sustainable manufacturing performance evaluation*” Moldvska (2019) tem com foco no desenvolvimento de métricas para questões ambientais em organizações manufatureiras.

O quinto autor em citações (quadro 5) é Laurence Stamford. A publicação mais citada desse autor é o artigo “*Enhanced data envelopment analysis for sustainability*

assessment: A novel methodology and application to electricity technologies” Stamford (2014). Este artigo traz uma proposta de análise de sustentabilidade correlata ao uso de tecnologias elétricas.

Avaliando as referências citadas pelos artigos 50 artigos selecionados para leitura completa, observou-se que esses utilizaram 1.422 referências, dentro dessas, as que mais se repetiram como base das fontes avaliadas foram listadas no quadro 6.

Quadro 6 - Análise das referências.

%/50	Título	Ano	País	Citações
36%	<i>Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels</i> A.D. Jayal, F. Badurdeen, O.W. Dillon Jr., I.S. Jawahir	2010	Estados Unidos da América	761
22%	<i>Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows</i> Leigh Smith, Peter Ball	2012	Reino Unido	235
20%	<i>Sustainable Manufacturing and Design: Concepts, Practices and Needs</i> Marc A. Rosen and Hossam A. Kishawy	2012	Canada	279
12%	<i>Partnerships from Cannibals with Forks: The Triple bottom line of 21 Century Business</i> John Elkington	1998	Reino Unido	16.035
10%	<i>Sustainability of manufacturing and services: Investigations for research and applications</i> Angappa Gunasekaran, Alain Spalanzani	2011	Alemanha	509
10%	<i>Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance</i> William Faulkner, Fazleena Badurdeen	2014	Estados Unidos da América	297
8%	<i>Green Manufacturing: An Evaluation of Sustainable Manuf. Practices and Their Impact on Competitive Outcomes</i> Cathy A. Rusinko	2007	Estados Unidos da América	384
6%	<i>Fuzzy-based sustainable manufacturing assessment for SMEs</i> Sujit Singh; Ezutah Udony Oluju; Alireza Fallahpour	2013	Alemanha	82
6%	<i>Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2)</i> Serenella Sala; Francesca Farioli; Alessandra Zamagni	2012	Alemanha	176
6%	<i>A holistic and rapid sustainability assessment tool</i> Danfang Chen, Sebastian Thiede, Timo Schudeleit, Christoph Herrmann	2014	Suécia	66
6%	<i>Sustainable manufacturing: trends and research challenges</i> Marco Garetti; Marco Taisch	2013	Reino Unido	580

Fonte: Do autor, 2022.

A publicação mais citada pelos artigos selecionados para a leitura completa 36% (18/50), escrito por Badurdeen *et al.* (2010) conta com 761 citações entre os portais Google acadêmico, WOS e Scopus, sendo um artigo com grande relevância para pesquisas voltadas a manufatura sustentável. Os autores salientam a importância de métricas de sustentabilidade, enfatizam que toda a cadeia de suprimentos da organização deve focar em questões ambientais.

A segunda publicação com maior número de citações pelos artigos selecionados, 22% (11/50). Nesta os autores Leigh Smith e Peter Ball (2012) advogam que uma sociedade sustentável pode ser alcançada através de técnicas eficientes de produção, para tanto, os autores fornecem uma proposta de métrica avaliação de consumo de material, energia e geração de resíduos possibilitando avaliação qualitativa e quantitativa e o validam com um estudo de caso.

O artigo com maior número de citações nas bases de pesquisa supracitadas (16.035) foi citado por 12% dos artigos selecionados para leitura completa. Escrito por John Elkington (1998), precursor do termo *Triple bottom line* (TBL), é um clássico das pesquisas voltadas para questões ambientais em organizações produtoras de bens. O artigo mostra a importância da parceria entre toda a cadeia de suprimentos para que as organizações possam alcançar sucesso a nível TBL (econômico, social e ambiental), ganhando assim maior eficiência e lealdade dos seus parceiros e colaboradores.

Seguindo a Fase 1 – Exploração, conforme quadro 1, o próximo tópico trará a revisão da literatura sobre indicadores de sustentabilidade, com foco na análise do conteúdo dos 50 artigos selecionados a partir da revisão sistemática da literatura.

### **3.2 Reporte da revisão sistemática: Análise de conteúdo**

Conforme análise da rede de palavras-chave (figura 4), feita com o *software* VOSviewer® agrupou-se os 50 artigos para leitura completa em *Clusters*, com foco em identificar os conceitos chave em cada um dos agrupamentos. O quadro 7 fornece uma visão geral dos artigos selecionados para leitura completa, com o *cluster* e as metodologias da pesquisa.

Quadro 7 – Estratificação dos artigos por *Cluster*.

Os quatro <i>Clusters</i>	Total
<b>1 - Desenvolvimento sustentável</b>	<b>10</b>
Estudo de caso	7
<i>Survey</i>	2
Revisão da literatura	1
<b>2 - Impacto Ambiental</b>	<b>5</b>
Estudo de caso	3
<i>Survey</i>	2
<b>3 - Manufatura sustentável</b>	<b>26</b>
Estudo de caso	14
Revisão da literatura	8
<i>Survey</i>	4
<b>4 - Produção Sustentável</b>	<b>9</b>
Estudo de caso	9
<b>Total Geral</b>	<b>50</b>

Fonte: Do autor, 2022.

O objetivo principal desses quatro agrupamentos é facilitar a exploração da literatura por meio da análise de conteúdo, conduzindo à resposta da questão de pesquisa **Q1- Como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras?** Os próximos tópicos trarão as principais contribuições de cada *cluster*.

### 3.2.1 Desenvolvimento sustentável

Observa-se que no *cluster* “Desenvolvimento sustentável” foram selecionados 10 artigos para leitura completa, onde houve predominância de estudos de caso (70%), seguido pela metodologia *Survey* (20%) e revisão da literatura (10%). O principal tipo de organização estudada foi a indústria de manufatura, seguida pela indústria de óleo e gás e por uma análise de toda a cadeia de consumo.

Avaliando os pontos principais dos artigos desse *cluster*, a maioria dos artigos tem foco no desenvolvimento sustentável industrial baseado em informações geradas por indicadores. Os autores Azapagic *et al.* (2016) enfatizaram que embora a ideia de sustentabilidade seja amplamente divulgada ao redor do mundo, a implantação de programas de sustentabilidade continua sendo lenta enquanto o consumo de recursos é cada vez mais veloz. Para Badurdeena e Huanga (2017) existe um gap na literatura para indicadores holísticos de manufatura sustentável, ainda afirmam que os indicadores de sustentabilidade podem ser construídos em três grandes níveis, a nível

de produto ou processo, a nível empresarial, onde toda a organização é avaliada e a nível global, qual avalia toda a cadeia de suprimentos. Para Moldavska e Welo (2018) a função de um indicador sustentável é fornecer suporte a decisões e governança para o desenvolvimento sustentável, permitindo avaliação de tendências, riscos e oportunidades. O quadro 8 sintetiza os trabalhos identificados nesse *cluster*.

Quadro 8 – Contribuições do *Cluster* desenvolvimento sustentável.

<b>Autoria</b>	<b>Método</b>	<b>Contribuição para o tema</b>
Azapagic <i>et al.</i> (2016)	Estudo de caso	Criação de indicador para medição do ciclo de vida de produtos, enfatizando através do pensamento TBL a necessidade de se ter um novo paradigma de consumo e, por conseguinte, de produção.
Badurdeena e Huang (2017)	Estudo de caso	Após aplicações do indicador para avaliação de toda cadeia de suprimentos notou-se que, embora algumas métricas fossem conflitantes, o desempenho TBL apresentou melhoras pois o indicador direcionou os esforços para os pontos mais críticos.
Moldavska e Welo (2018)	Estudo de caso	A função de um indicador é fornecer suporte a decisões e governança para o desenvolvimento sustentável, permitindo avaliação de tendências, riscos e oportunidades.
Moldavska e Welo (2019)	Estudo de caso	Os métodos existentes de avaliação falham em medir o desempenho do sistema como um todo e que os métodos extremamente teóricos não são corretamente traduzidos para a linguagem corporativa.
Subic, Crossin, Hedayati e Shabani (2013)	Estudo de caso	Com base no indicador construído foi possível mapear os principais emissores de poluentes da cadeia, bem como identificar as causas raízes das principais emissões.
Watanabe <i>et al.</i> (2016)	Estudo de caso	O artigo propõe um indicador qualitativo e quantitativo a fim de avaliar os impactos ambientais e direcionar à manufatura sustentável.
Zhou <i>et al.</i> (2017)	Estudo de caso	Através de indicador proposto, evidenciam que linhas de produção sustentáveis propiciam baixos custos, bons ambientes de produção além de conduzir a baixos impactos ambientais.
Ahmadb e Elhuni (2017)	Revisão da literatura	Os autores desenvolveram um indicador a nível TBL com o propósito de tornar a avaliação do atual estado dessa indústria no oriente médio e dar direcionamento sustentável para as organizações.
Chen <i>et al.</i> (2019)	<i>Survey</i>	Buscaram entender o impacto do <i>Lean Manufacturing</i> em indicadores ambientais. Notou-se que nem todos os indicadores ambientais são influenciados por práticas do LM, porém essa técnica propicia melhoria incremental, como o consumo de materiais.
Sutthichaimethee <i>et al.</i> (2015)	<i>Survey</i>	Os autores com foco em pequenas e médias empresas criam um indicador TBL. Após a aplicação direcionam os usuários quanto a criação de políticas de redução custos ambientais.

Fonte: Do autor, 2022.

### 3.2.2 Impacto ambiental

No *cluster* “Impacto ambiental”, 5 artigos foram selecionados com predominância de estudos de caso (60%) e *Surveys* com (20%). Os focos dos artigos

são variados, os que aplicaram *Surveys* focaram em analisar toda a cadeia de consumo, enquanto os estudos de casos focaram em indústria de manufatura, agronegócio e construtora.

Avaliando os artigos desse *cluster* observou-se a importância da avaliação do comportamento do consumidor final através de indicadores que gerem informações que permitam o aprimoramento de produtos com a menor geração de impacto ambiental em toda a sua vida útil. O quadro 9 fornece uma síntese dos trabalhos identificados nesse *cluster*.

Quadro 9 – Contribuições do *Cluster* Impacto Ambiental.

Autoria	Método	Contribuição para o tema
Hofstetter, Madjar e Ozawa (2005)	<i>Survey</i>	Através de indicador voltado para toda a cadeia de consumo evidenciam a necessidade de determinar o perfil dos consumidores a fim de desenvolver produtos que satisfaçam as necessidades desses de forma a incentivar o consumo sustentável.
Biengen <i>et al.</i> (2018)	<i>Survey</i> .	O indicador voltado para toda a cadeia de consumo permite visão holística das tendências de consumo através das diversas camadas sociais e permite que os governos criem políticas de monitoramento e restrições no consumo de recursos.
Cacho <i>et al.</i> (2018)	Estudo de caso	Os autores desenvolveram instrumento de medição com 4 dimensões como foco na construção civil baseado em economia circular. A primeira dimensão com foco em gestão de recursos, outras duas dimensões com foco em impactos ambientais e outra com foco na gestão total da transição para a economia circular.
Blanc <i>et al.</i> (2019)	Estudo de caso	Através de técnicas como o LCA, LCC os autores mediram o impacto do uso de recursos renováveis na cadeia de produção de frutas na Europa, tendo resultados positivos no uso de recursos renováveis com baixo impacto para o meio ambiente e sociedade
Subharaj, Natarajan e Suganthi (2019)	Estudo de caso	Com a proposição e aplicação de indicador TBL. Os autores concluem que ganhos em fatores econômicos podem ser potencializados por ações ambientais.

Fonte: Do autor, 2022.

### 3.2.3 Manufatura sustentável

Para o *cluster* “Manufatura sustentável” foram selecionados 26 artigos, desses, 53% utilizaram a técnica de estudos de caso, 30% a técnica de revisão da literatura e 15% foram *Surveys*. O foco dos artigos foi específico em indústrias de manufatura e duas análises englobando toda a cadeia de consumo.

Avaliando os pontos principais dos artigos desse *cluster*, os autores Yazdi *et al.* (2018) advogam que pequenas e médias empresas estão rumando a produção sustentável por pressões de seus clientes e leis ambientais. Shahbazi *et al.* (2019) afirmam que diversos indicadores para avaliação de produtividade e lucratividade são detalhados na literatura, porém há uma lacuna em estudos detalhados voltados à indicadores de sustentabilidade em processos. Abubakr *et al.* (2020) reforçam que é fundamental que os indicadores integrem todos os fatores da sustentabilidade a nível TBL (ambiental, social e econômico), tendo claramente especificado um horizonte de tempo. O quadro 10 fornece uma síntese dos trabalhos identificados nesse *cluster*.

Quadro 10 – Contribuições do *Cluster* Manufatura Sustentável.

<b>Autoria</b>	<b>Método</b>	<b>Contribuição para o tema</b>
Weiss <i>et al.</i> (2007)	Estudo de caso	Os autores propõem um indicador para ajudar na tomada de decisão sobre qual o melhor tipo de combustível é mais adequado para o processo avaliado (Biomassa x Combustíveis fosseis).
Subic <i>et al.</i> (2012)	Estudo de caso	Desenvolveram um indicador que possibilita uma visão holística de toda a cadeia de suprimentos, mapeando os principais agressores ambientais de forma a direcionar os tomadores de decisão nos pontos mais críticos.
Aravossis <i>et al.</i> (2019)	Estudo de caso	Os autores propõem um indicador com 9 aspectos qualitativos a fim de medir o desempenho industrial a luz da visão ambiental em uma indústria fabricante de alimentos.
Cochran (2016)	Estudo de caso	O artigo desenvolve um indicador que permite monitorar os impactos ambientais, indicam propostas de melhoria por mapear o ciclo de vida dos produtos e aplicar técnicas do LM para redução dos impactos ambientais.
Yazdi <i>et al.</i> (2018)	Estudo de caso	Com base na <i>Organization for Economic Cooperation and Development-OECD</i> (2018), os autores definem um indicador para avaliar melhorias no processo de produção de forma transversal.
Miller <i>et al.</i> (2010)	Estudo de caso	Os autores advogam que o LM quando aplicado junto com práticas <i>green</i> tem maior efeito significativo positivo no desempenho ambiental do que quando aplicado de maneira de maneira separada, em estudos de casos os autores mostram esses impactos e os validam através de indicador.
Fatimah <i>et al.</i> (2013),	Estudo de caso	Propõem um indicador estratégico a fim de direcionar essas organizações a fim de medir e aprimorar seu desempenho a nível TBL, através de estudo de caso após a implementação direcionam medidas de remanufatura de alternadores, gerando vantagens ambientais e socioeconômicas.
Ho <i>et al.</i> (2019)	Estudo de caso	Os autores conduziram entrevistas semiestruturadas a fim de validar os pontos identificados, trazendo um indicador com 11 aspectos para intensificar práticas de reuso.
Badrul e Lee (2014)	Estudo de caso	O artigo indica que os parâmetros do processo influenciam grandemente no indicador de sustentabilidade. Os autores advogam que é necessário além do controle e mapeamento dos processos, princípios sustentáveis devem ser incorporados em conjunto com as tecnologias mecânicas.
Park, Lee e Noh (2020)	Estudo de caso	Os autores trazem um indicador sustentável e utilizam a técnica DT para determinar o melhor consumo de energia, após isso refazem as medições e apresentam resultados ótimos em relação à eficiência energética.

Raoufi <i>et al.</i> (2017)	Estudo de caso	Os autores propõem um indicador sustentável para avaliação de projetos de produtos a fim de iniciar projetos com foco em sustentabilidade.
Girubha e Vinodh (2012)	Estudo de caso	Classificando sustentabilidade a nível TBL os autores através da técnica PROMETHEE ( <i>Preference Ranking Organisational Method for Enrichment Evaluation</i> ) após avaliação em estudo de caso identificaram que o foco em materiais é a melhor orientação para alcançar a sustentabilidade.
Wang <i>et al.</i> (2017)	Estudo de caso	Através da técnica <i>Material Flow Cost Accounting</i> (MFCA) foi possível mapear os principais pontos de perdas no processo e atuar nas causas.
Cherrafi <i>et al.</i> (2016)	Estudo de caso	Integrando técnicas <i>Green e lean six sigma</i> ótimos resultados podem ser alcançados em nível TBL. Através de estudo de caso indica que a integração entre os dois programas propicia redução no consumo de materiais em até 40% e minimiza o custo de energia em até 12%.
Shahbazi <i>et al.</i> (2019)	Estudo de caso	Os autores advogam a necessidade do envolvimento da alta gestão para definição dos indicadores pois há muitos relatos de programas de manufatura sustentável que falharam devido à falta de suporte
Salim <i>et al.</i> (2018)	Revisão da literatura	A luz da ISO 14001, mapeando o estado atual da arte e avaliando as motivações para implantações de técnicas sustentáveis. Os autores salientam que pressões por parte dos governos são os principais fatores para ações ambientais, seguido por requisitos de clientes.
Layton, Bras e Weissbug (2016)	Revisão da literatura	Trazem uma visão geral de casos e propõem <i>Key Performance Indicators</i> para monitorar e aprimorá-los, ainda ressaltam a importância de mapear as estruturas organizacionais e desenhar o fluxo de materiais e resíduos.
Dewulf <i>et al.</i> (2015)	Revisão da literatura	Classificam materiais entre os não energéticos e os energéticos. Após essa classificação, elaboram um indicador com 15 níveis, esse permite avaliação quantitativa da sustentabilidade na produção.
Despeisse <i>et al.</i> (2012)	Revisão da literatura	Os autores advogam que o conceito de manufatura sustentável é uma forma eficiente à prevenção da poluição uma vez que tem foco no consumo eficiente e redução de efluentes. O mapeamento do fluxo dos recursos é uma saída produtiva para controlar os impactos ambientais
Bhanot <i>et al.</i> (2020)	Revisão da literatura	Os autores visam através do artigo a criação de um quadro para relação de causa e efeito entre os fatores críticos para a manufatura sustentável.
Abubakr <i>et al.</i> (2020)	Revisão da literatura	O advento da indústria 4.0 e o aumento da necessidade de medidas efetivas para sanar problemas ambientais forçam mudanças de paradigmas. Propõem a integração de manufatura sustentável e indústria 4.0, avaliando o impacto dessa integração em aspecto da visão TBL.
Abedini, Li, Badurdeen e Jawahir (2020)	Revisão da literatura	O objetivo do artigo foi a criação de um instrumento de medição da produção para facilitar a tomada de decisão dos gestores.
Junsheng <i>et al.</i> (2020)	Survey.	Em estudo na Malásia mostrou que o suporte da gestão das organizações tem correlação positiva e significativa na motivação dos funcionários quanto às questões ambientais, e da mesma forma, a motivação dos funcionários tem papel mediador nos resultados ambientais das organizações.
Park, Jung e Lee (2019)	Survey.	Utilizando a teoria da troca social, os autores observaram que o comprometimento dos empregados tem relação direta no sucesso de práticas e melhorias de processos.
Qureshi <i>et al.</i> (2019)	Survey.	Os resultados mostram que o suporte da gestão tem relação significativa e positiva no desempenho sustentável, enquanto técnicas de melhoria como o TPM, TQM e JIT tem papel mediador.
Ceptureanu <i>et al.</i> (2018)	Survey.	Advogam sobre a importância de iniciativas para reduções de impactos ambientais e o acompanhamento através de indicadores, geram vantagens competitivas mesmo para pequenas e médias empresas.

Fonte: Do autor, 2022.

### 3.2.4 Produção sustentável

Para o *cluster* “Produção sustentável” foram selecionados 9 artigos, todos eles estudos de caso. Avaliando os artigos desse *cluster* observou-se o foco em ações a nível de toda a cadeia de produção voltados desde a produção agrícola e sua integração com cooperativas manufatureiras para alcançar melhorias a nível TBL. Dentre as contribuições se destacam Jolliet *et al.* (2018) que trazem a importância de após a criação do indicador, ter metas alcançáveis a fim de que a melhoria contínua se torne prática, aprimorando continuamente também as métricas. Pagone, Jolly e Salonitis (2020) destacam a existência de um gap na literatura para indicadores com maior validade externa e que dentre os indicadores disponíveis para esse tipo de indústria há pouco rigor científico. O quadro 11 fornece uma síntese dos trabalhos identificados nesse *cluster*.

Quadro 11 – Contribuições do *Cluster* Produção Sustentável.

<b>Autoria</b>	<b>Método</b>	<b>Contribuição para o tema</b>
Chukalla <i>et al.</i> (2020)	Estudo de caso	Com base em dados coletados de 1980 a 2014 foi desenvolvido um indicador a fim de medir o impacto do agronegócio na água e solo, os autores concluem que o indicador gerado permite a melhoria do meio ambiente através da gestão do uso eficiente de recursos.
Lehmann <i>et al.</i> (2020),	Estudo de caso	Os autores analisam a produção do agronegócio na Europa e fornecem uma robusta análise de campo com técnicas e indicadores, permitindo maior produtividade e viabilidade econômica.
Olba-Ziety <i>et al.</i> (2020)	Estudo de caso	A produção sustentável deve avaliar os custos ambientais, mas também os econômicos. Analisam toda a cadeia de produção de madeira e constroem um indicador visando minimizar os impactos ambientais.
Pagone, Jolly e Salonitis (2020)	Estudo de caso	Os autores propõem um indicador que de maneira rápida, racional e sistemático avalia custo, tempo e sustentabilidade ambiental, com foco em análise de ciclo de vida
Jolliet <i>et al.</i> (2018)	Estudo de caso	Trazem a importância de após a criação do indicador, ter metas alcançáveis a fim de que a melhoria contínua se torne prática.
Stamford e Shapira (2019)	Estudo de caso	Proposta métricas baseado em técnicas de governança avaliando os impactos ambientais. O artigo formula o indicador de sustentabilidade, aplica na prática e avalia os impactos gerados.
Ewijk, Stegemann e Ekins (2017)	Estudo de caso	Os autores trazem através de indicador uma visão holística do consumo de papel a nível global. No instrumento a avaliação é feita pelo total de fibra de madeira consumida em contraste a produção total de papel o que estimula a redução de papel vigem produzida.
Velenturf e Purnell (2017)	Estudo de caso	Os autores trazem um estudo de caso que mostra que é possível reverter o atual quadro crítico global desde que técnicas que recuperem os resíduos sejam empregadas pelas organizações.

Fonte: Do autor, 2022.

O próximo capítulo discute à luz da revisão sistemática da literatura, os resultados das redes de análise bibliométrica que contribuíram para o desenvolvimento da análise de conteúdo, visando responder à questão **Q1- Como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras?**

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O presente capítulo discute os resultados obtidos na revisão sistemática da literatura e propõe um indicador de sustentabilidade, de acordo com a fase dois “Elaboração”, apresentada no quadro 1.

A aplicação desse indicador, é descrita de acordo com a fase três “Aplicação” (quadro 1). Com base na metodologia de pesquisa-ação baseada em Coughlan e Coughlan (2002), o objetivo desta fase é responder à segunda questão de pesquisa: **Q2- A partir do direcionamento dado por métricas, é possível a mitigação dos impactos ambientais na produção de materiais de fricção?**

### **4.1 Discussões a respeito da fundamentação teórica**

Dentre as contribuições teóricas da pesquisa, no capítulo 3, foi possível triangulando técnicas de revisão sistemática da literatura, análise bibliométrica, e análise de conteúdo, mapear o estado atual da arte e chegar às respostas para a questão **Q1- Como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras?**

Importantes *insights* foram obtidos como o descrito por Badurdeena e Huanga (2017) em que os indicadores de sustentabilidade podem ser divididos em três níveis: produtos ou processos, nível empresarial ou voltado para medir toda a cadeia de suprimentos. Outro ponto, conforme Abubakr *et al.* (2020) é que os indicadores integrem todos os fatores TBL, tendo claramente especificado um horizonte de tempo.

Badurdeena e Huanga (2017) advogam que embora os métodos de avaliação geral da sustentabilidade (econômico, ambiental e social) de organizações sejam bem estabelecidos, o principal desafio é a sua normalização. Essa é necessária a fim de que esse seja harmônico como um todo, sugerindo notas com números inteiros de 1 a 5, onde 1 indica total deficiência e 5 uma situação de grande estabilidade.

Quadro 12 – Descrição das notas do indicador.

Notas	Descrição	Exemplo
1	Insatisfatório	Falho - Sem capacidade, insustentável.
2	Satisfatório	Passa – Apenas o suficiente, mínimo ou marginal.
3	Bom	Desempenho acima do mínimo.
4	Muito Bom	Desempenho superior, apresenta constante melhoria.
5	Excelente	Maestria – Planeja melhorias, processo estável e em constante melhoria.

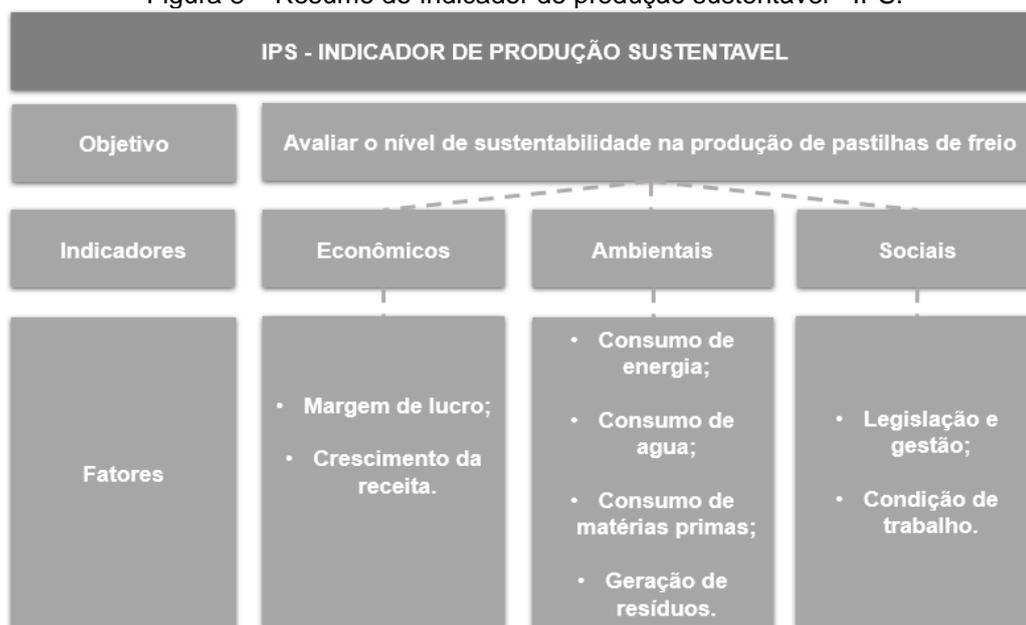
Fonte: Adaptado de Badurdeena e Huanga, 2017.

Entretanto, Moldavska e Welo (2018) e Pagone, Jolly e Salonitis (2020) enfatizam que há uma lacuna na literatura para indicadores de sustentabilidade com validade externa, visto que, embora para diferentes indústrias tenham características semelhantes, existe a especificidade quanto aos parâmetros desses. Em alinhamento com isso, durante a revisão da literatura encontrou-se predominância de estudos de caso voltados a proposição de diversos indicadores de sustentabilidade específicos para determinadas indústrias. Segundo Gil (2008) uma das principais vantagens dos estudos de caso é a capacidade de descrever uma situação em que está sendo feita determinada investigação, mas a falta de validade externa restringe a generalização dos resultados para diferentes situações.

Entre os indicadores de sustentabilidade encontrados na revisão da literatura o instrumento “*Capability Assessment Tool (CAT)*” proposto por Subic *et al.* (2012) se destacou, pois, embora delineado para medir toda a cadeia de suprimentos de uma indústria produtora de artigos esportivos, não é demasiadamente específico nos seus fatores, o que permite ser adaptado com maior facilidade em outros tipos de indústria. O indicador proposto por Subic *et al.* (2012) permite a identificação dos pontos com maior ineficiência baseando-se nos três pilares *triple-bottom-line* (TBL) propostos por Elkington (1998), a saber, ambiental, caráter social e caráter econômico.

Neste estudo, o indicador CAT (Subic *et al.* 2012) foi adaptado de forma que pudesse ser aplicável a nível empresarial para medir os parâmetros de sustentabilidade da indústria de materiais de fricção, iniciando assim a Fase 2-Elaboração (Quadro 1). A figura 8 ilustra de maneira ampla o indicador proposto e nos tópicos subsequentes serão detalhados todos os níveis do Indicador de produção Sustentável – IPS proposto neste trabalho.

Figura 8 – Resumo do Indicador de produção sustentável - IPS.



Fonte: Do autor, 2022.

#### 4.1.1 Construção do indicador IPS - Indicador Ambiental

Referente ao pilar TBL Ambiental, Subic *et al.* (2012), indicam que a organização deve constantemente auditar os processos e monitorar o desempenho através de instrumentos de medição, bem como ter iniciativas de melhoria contínua nos resultados. Segundo Yazdi *et al.* (2018) as principais motivações para essas ações de mitigações de impactos ambientais são pressões de clientes e legislações. Dentro deste contexto, os autores Ahmadb e Elhuni (2017) indicam o uso de controle estatístico do processo de peças não conforme, além do consumo de água e gestão de resíduos como índices importantes. Para Olba-Ziety *et al.* (2020) os fatores ambientais que devem ser levados em consideração são correlatos ao uso de energia alternativa e a redução no consumo total, corroborado por Qureshi *et al.* (2019) e Matthews, Stamford e Shapira (2019). Despeisse *et al.* (2012), Bhanot *et al.* (2020) e Layton, Bras e Weissbug (2016) indicam a necessidade da otimização do fluxo de matérias primas e coleta seletiva de resíduos.

Diante do supracitado, o indicador do pilar ambiental foi dividido em quatro grandes parâmetros, a saber: correlatos ao consumo de energia, correlatos ao consumo de água, correlatos ao uso de materiais e correlatos à gestão de resíduos. Dentro de cada parâmetro foram listados fatores quantificáveis. A partir dos direcionamentos colhidos na revisão sistemática da literatura, os quadros 13 a 16

fornece uma visão geral dos parâmetros e respectivos fatores que compõem o indicador do pilar TBL Ambiental.

Quadro 13 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 1: Energia.

<b>PARÂMETRO 1 - ENERGIA:</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 1 - Redução do uso de energia</b>
1	Aumento no consumo de energia
2	Sem variação em relação ao ano anterior
3	Redução de 0% até 2% no último ano
4	Redução de 2,1% até 5% no último ano
5	Redução superior a 5% no último ano
<b>Nota</b>	<b>FATOR 2 - Uso de energias alternativas</b>
1	Sem uso de energias renováveis ou previsão de uso
2	Projeto sólido de uso de renovável a ser implantado nos próximos 5 anos
3	Uso de energias renováveis implantado
4	Uso de energias renováveis representa até 5% do consumo total
5	Uso de energias renováveis representa >5,1% do consumo total

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 14 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 2: Água.

<b>PARÂMETRO 2 - ÁGUA:</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 3 - Redução do uso de água</b>
1	Sem redução no último ano
2	Redução de 0% até 2% no último ano
3	Redução de 2,1% até 5% no último ano
4	Redução de 5,1% até 10% no último ano
5	Redução superior a 10% no último ano
<b>Nota</b>	<b>FATOR 4 - Política de reutilização de água</b>
1	Sem política de reutilização
2	Reutiliza em áreas não produtivas
3	Reutiliza em áreas produtivas
4	Reuso representa até 5% do consumo total
5	Reuso representa >5,1% do consumo total

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 15 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 1: Materiais

<b>PARÂMETRO 3 - MATERIAIS:</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 5 - Gestão de inventário e compra</b>
1	Sem política de gestão
2	Política de gestão empregada com inventário superior ao consumo semestral
3	Política de gestão empregada e inventário inferior ao consumo semestral
4	Política de gestão empregada e inventário inferior ao consumo trimestral
5	Política de gestão empregada e inventário inferior ao consumo bimestral
<b>Nota</b>	<b>FATOR 6 - Controle de peças não conforme</b>
1	Sem política de gestão
2	Política de controle empregada e resultados anuais de 1 sigma – (134.000ppm)
3	Política de controle empregada e resultados anuais de 2 sigmas – (<71.860ppm)
4	Política de controle empregada e resultados anuais entre 3 e 4 sigmas – (96 a 2700ppm)
5	Política de controle empregada e resultados anuais entre 5 e 6 sigmas – (>2ppm)

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 16 – Indicador do pilar TBL Ambiental – IA, parâmetro 4: Resíduos.

<b>PARÂMETRO 4 - RESÍDUOS:</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 7 - Coleta seletiva de resíduos</b>
1	Sem política de coleta de resíduos
2	Política de coleta seletiva de resíduos em implantação
3	Tem política de coleta de resíduos no ambiente administrativo
4	Tem política de coleta de resíduos no ambiente administrativo e produtivo
5	Tem política de coleta de resíduos já implantada em todo a planta
<b>Nota</b>	<b>FATOR 8 - Descarte de resíduos</b>
1	Sem procedimento de descarte de resíduos
2	Descarta resíduos de maneira correta, mas sem prévia análise de reuso
3	Descarta resíduos de maneira correta após análise prévia de reuso
4	Remanufatura parte do resíduo gerado e descarta de maneira correta o restante
5	A empresa faz parte de uma simbiose de organizações

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

A média aritmética dos resultados colhidos dos oito fatores ambientais (FA) dentro dos quatro parâmetros (Energia, Água, Materiais e Resíduos) fornecerá o valor global do indicador ambiental - IA, conforme equação (1):

$$IA = \frac{FA1+FA2+FA3+FA4+FA5+FA6+FA7+FA8}{8} \quad (1)$$

#### 4.1.2 IPS - Indicador Social

Durante a revisão da literatura observou-se dois nichos principais de indicadores sociais, correlatos ao cumprimento de legislações ambientais e correlatos às condições de trabalho (ABEDINI; LI; BADURDEEN; JAWAHIR, 2020; LEHMANN *et al.* 2020; VELENTURF; PURNELL, 2017)

Segundo Carmeli e Freund (2004) a satisfação de trabalhadores contribui para o aumento do desempenho, enquanto o absenteísmo tem correlação positiva com trabalhadores insatisfeitos. Junsheng *et al.* (2020) mostraram a que o suporte da gestão tem correlação positiva e significativa na motivação dos funcionários e que a motivação dos funcionários tem papel no desempenho ambiental das organizações. Para Park, Jung e Lee (2019) utilizando a teoria da troca social, o comprometimento dos empregados tem relação direta no sucesso de práticas e melhorias de processos.

O indicador do pilar TBL Social foi dividido em dois parâmetros, a saber: correlatos a legislações ambientais e correlatos à condição do trabalho. Utilizando os parâmetros colhidos na revisão sistemática da literatura, os quadros 17 e 18 fornecem uma visão geral dos parâmetros e respectivos fatores.

Quadro 17 – Indicador do pilar TBL Social, parâmetro 1: Legais, norma e gestão.

<b>PARÂMETRO 1 - Legislação, norma e gestão</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 1 - Legislações ambientais e certificados</b>
1	Não possui nenhum certificado ambiental
2	Possui certificado, porém apresentou não conformidades maiores na última auditoria
3	Possui certificado, porém apresentou não conformidades menores na última auditoria
4	Possui certificado e não apresentou nenhuma não conformidade na última auditoria
5	Possui certificado e não apresentou nenhuma não conformidade nas últimas três auditorias
<b>Nota</b>	<b>FATOR 2 - Gestão ambiental</b>
1	Leva em conta questões relativas ao meio ambiente ao tomar decisões estratégicas
2	Audita e monitora desempenho ambiental
3	Identifica e monta business cases para melhorar a sustentabilidade
4	Envolve a localidade e trabalhadores programas de conscientização ambiental
5	Tem evidências sólidas de trabalhar em todas as frentes supracitadas

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 18 – Indicador do pilar TBL Social, parâmetro 2: Condição de trabalho.

<b>PARÂMETRO 2 - SOCIAL: Condições de trabalho</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 3 - Condições de trabalho</b>
1	A empresa não faz gestão de acidentes ou incidentes e há processos trabalhistas
2	A empresa não faz gestão de acidentes ou incidentes, mas sem processos trabalhistas
3	Há histórico de afastamento por acidentes de trabalho e há incidentes reportados
4	Não há histórico de afastamento por acidentes de trabalho, mas há incidentes reportados
5	Não há histórico de afastamento por acidentes de trabalho e nenhum incidente foi reportado
<b>Nota</b>	<b>FATOR 4 - Investimento no trabalhador</b>
1	Não existe nenhuma evidência de investimento no bem-estar do trabalhador
2	Faz investimentos em bem-estar e desenvolvimento pessoal em parte dos trabalhadores
3	Faz investimentos no bem-estar e desenvolvimento pessoal de livre acesso para todos
4	Há cultura de conscientização (ex. prevenção de doenças) e investimento em desenvolvimento
5	Há evidências sólidas de que a empresa executa todas as frentes supracitadas

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

A média aritmética dos resultados colhidos dos quatro fatores sociais (FS) dentro dos dois parâmetros (Legislação, normas e Gestão, e, Condições de trabalho) fornecerá o valor global do indicador social - IS, conforme equação (2).

$$IS = \frac{FS1+FS2+FS3+FS4}{4} \quad (2)$$

#### 4.1.3 IPS - Indicador Econômico

Segundo Moldavska (2018), ferramentas de medição de sustentabilidade são amplamente reconhecidas como mecanismo de governança e desenvolvimento sustentável. Quanto aos fatores econômicos, Ahmadb e Elhuni (2017) identificaram

como principal indicador de desempenho financeiro para organizações a margem de lucro líquida, corroborado por Ceptureanu *et al.* (2018) e Arifatul *et al.* (2013).

Os autores Badurdeena e Huang (2017) e Zhou *et al.* (2017) indicam que além da margem de lucro líquido, o crescimento da receita é outro importante indicador econômico industrial, portanto as supracitadas métricas foram escolhidas como indicadores financeiros. Para a margem de lucro, utilizando a classificação das notas no quadro 12, foram considerados como insatisfatórios, resultados negativos e excelentes resultados positivos superiores aos dois últimos anos. Quanto ao crescimento da receita, considerou-se insatisfatórios resultados inferiores aos dois últimos anos e resultados excelentes resultados maiores que os dois últimos anos.

Quadro 19 – Indicador do pilar TBL econômico - IE.

<b>PARÂMETRO Econômico</b>	
<b>Nota</b>	<b>FATOR 1 - Lucro líquido</b>
1	Margem negativa
2	<i>Break even</i>
3	Margem marginalmente positiva
4	Margem entre 5 e 15%
5	Margem acima de 15%
<b>Nota</b>	<b>FATOR 2 - Crescimento da receita</b>
1	Receita inferior ao último ano
2	Receita igual ao último ano
3	Receita marginalmente maior que os últimos anos
4	Receita superior entre 5 e 15% em relação ao último ano
5	Receita com crescimento maior do que 15% em relação ao último ano

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

A média aritmética dos resultados colhidos dos dois fatores econômicos (FE) dentro do parâmetro único delineado para medição da sustentabilidade econômica fornecerá o valor global do indicador econômico - IE, conforme equação (3).

$$IE = \frac{FE_1 + FE_2}{2} \quad (3)$$

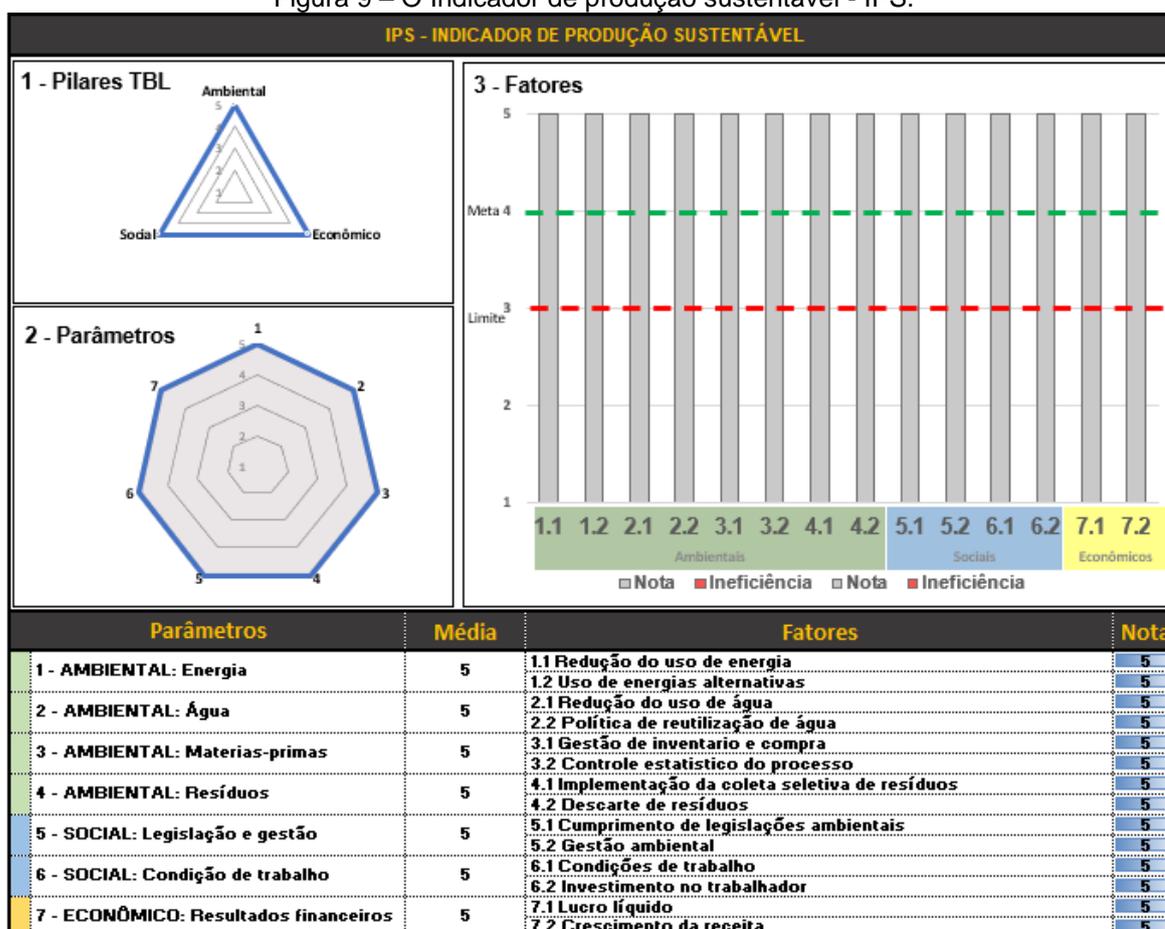
#### 4.1.4 O Indicador de sustentabilidade IPS

Os autores Jolliet *et al.* (2018) advogam sobre a importância de ter métricas alcançáveis para os indicadores criados a fim direcionar a organização quanto aos pontos de melhoria ou da manutenção dos resultados. Com base nisso, definiu-se metas para os fatores a partir das notas definidas no quadro 7.

Conforme Subic *et al.* (2012) definiu-se o limite mínimo aceitável para todos os fatores como nota três, os fatores com nota abaixo de três serão considerados críticos e necessária ação urgente. A meta geral para fatores é definida como nota quatro, os fatores com notas entre três e quatro serão considerados como pontos de atenção e de melhoria, fatores com nota entre quatro e cinco deverão ser monitorados e aprimorados após serem sanados todos os fatores com notas abaixo dessa meta.

A figura 9 ilustra o indicador de produção sustentável – IPS com as metas estabelecidas. O IPS, adaptado do CAT (Subic *et al.* (2012) foi desenvolvido para medição da sustentabilidade a nível empresarial, com foco nos pilares econômicos, sociais e ambientais (gráfico 1, da figura 9), impactados pelos parâmetros (gráfico 2, da figura 9) que por sua vez são impactados pelos fatores (gráfico 3, da figura 9).

Figura 9 – O Indicador de produção sustentável - IPS.



Fonte: Do autor, 2022.

Os tópicos seguintes detalharão as técnicas utilizadas para a aplicação e validação do IPS em uma organização produtora de pastilhas de freio, concluindo assim a Fase 2- “Elaboração” (Quadro 1).

## 4.2 Aplicação do indicador

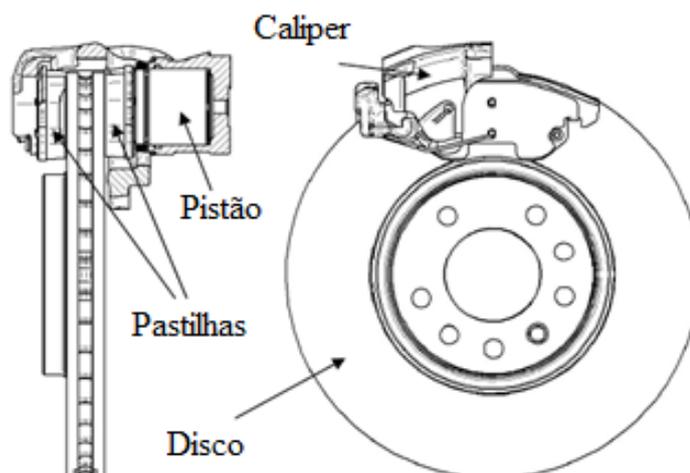
Neste tópico inicia-se a Fase 3 - “Aplicação” e conforme descrito no quadro 1, a fase é dividida em quatro etapas, descritas a seguir:

- Primeira etapa: Caracterizar o produto e a organização da indústria de materiais de fricção produtora de pastilhas de freio;
- Segunda etapa: Aplicar o Indicador de Produção Sustentável - IPS e identificar os pontos críticos do processo;
- Terceira etapa: A partir de técnicas de logística reversa e pesquisa-operacional propor e aplicar soluções para a mitigação dos impactos ambientais gerados;
- Quarta etapa: Nova coleta de dados a fim de evidenciar a eficácia das soluções propostas.

### 4.2.1 Caracterização do produto

Segundo Wahlström (2011), os sistemas de freio a disco são um conjunto de componentes interligados que tem por finalidade a frenagem de veículos através do atrito das pastilhas de freio com as paredes dos discos, convertendo a força hidráulica, em força de atrito, a figura 10 ilustra o sistema de freio e seus componentes, com a pastilha de freio montada no *Caliper*.

Figura 10 – Componentes do sistema de freio.



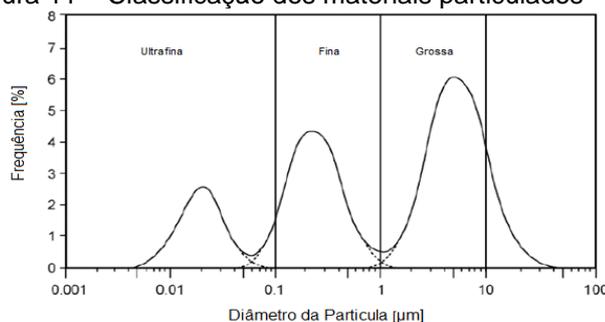
Fonte: Adaptado de Wahlström, 2011.

Conforme Matté, Menetrier e Perottoni (2018) as pastilhas de freio são basicamente compostas por base em aço SAE 1010 e material de atrito unidos pelo processo de prensagem. Os materiais de atrito são os diferenciais de cada fabricante de pastilhas de freio, diferentes das bases metálicas que tem a geometria determinada pelos fabricantes de sistemas de freios, a composição química detalhada dos materiais de atrito de pastilha de freio é segredo industrial (HAGINO *et al.* 2016, MILORADOVIC, 2016).

Segundo estudo realizado por Nogueira (2020) atualmente, as composições dos materiais de atrito para pastilhas de freio chegam a mais de 20 componentes, sendo os principais: fibras sintéticas e metálicas (Cobre, latão, óxidos de cobre etc.), resinas fenólicas, borrachas em pó, lubrificantes e abrasivos (SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO). Sterle *et al.* (2010) em seu estudo tribológico constataram que os metais são os principais componentes para garantir a estabilidade da frenagem em materiais de atrito para pastilhas de freios automotivas. Esses materiais, tais como o cobre, além da vantagem de ter alta capacidade de condução térmica, agem como lubrificantes sólidos, permitindo frenagens em condições severas a altas temperaturas, além disso, suas micropartículas agem como material de primeiro contato, permitindo melhor estabilidade e reduzindo o ruído das frenagens.

Segundo Wahlström (2011) durante a frenagem as pastilhas de freio liberam Material Particulado - MP. Essas partículas sólidas, dependendo do seu diâmetro aerodinâmico, podem ficar suspensas na atmosfera ou concentrar-se no solo. Segundo EPA (2021) os MP contribuem para a alteração do Ph de lagos, aumento de doenças respiratórias e dermatologias, contaminação do lençol freático e solo. Os MP podem ser divididos em fração grossa (>1 µm), fração fina (<1 µm) e fração ultrafina (<0.1 µm).

Figura 11 – Classificação dos materiais particulados - MP.



Fonte: Adaptado de Wahlström, 2011.

#### 4.2.2 Caracterização da empresa

Conforme contextualizado no capítulo 1 do presente trabalho, pastilhas de freio são responsáveis por diversos impactos ambientais por usar materiais como metais pesados em sua composição, além de outros considerados críticos ao meio ambiente pela ECHA (2021). Diante disso, escolheu-se uma empresa produtora de pastilhas de freio para condução da pesquisa-ação, pois além do produto ser crítico ao meio ambiente, segundo Wahlström (2011) o processo de produção das pastilhas de freio também gera impactos ambientais. A fim de garantir a confidencialidade, a empresa estudada será denominada como “ $\alpha$ ”, localizada no Brasil.

Porter (1999) advoga que organizações utilizam cada vez mais sistemas de produção híbridos frente a uma economia em constante variação, desta forma uma classificação multifuncional é indicada para se conhecer o objeto de estudo. Com base na classificação proposta por MacCarthy e Fernandes (2000), o quadro 20 fornece dados que proporcionam ao pesquisador, leitores e futuros estudos base detalhada para comparação, além de maior compreensão do processo de produção de maneira holística, respeitando a confidencialidade da empresa.

Quadro 20 – Caracterização geral da organização  $\alpha$ .

1. Caracterização geral		Dados coletados
Tamanho da empresa (Nº de funcionários)		150
Localização		Brasil
Tipo de Produção	Produção repetitiva (baixa diversidade, alto volume). Produção não repetitiva (alta diversidade, baixo volume).	● Produção não repetitiva.
Nível de automação	Normal - alto nível de participação humana; Flexível - computadores tendo as principais decisões; Misto - processos com diferentes níveis de automação	● Misto - processos com diferentes níveis de automação.

Fonte: Adaptado MacCarthy e Fernandes (2000), Do autor, 2022.

A classificação proposta por MacCarthy e Fernandes (2000) possibilitou melhor entendimento da organização estudada e forneceu uma visão ampla e esclarecedora de todos os processos produtivos, facilitando o entendimento do fluxo de produção bem como possíveis pontos de melhoria.

#### 4.2.3. Primeira coleta de dados

Coughlan e Coughlan (2002) advogam que a pesquisa-ação pode incluir diversos instrumentos de coleta de dados, porém o fator mais importante, segundo os autores, é que os membros da organização tenham em mente o objetivo da coleta de dados. Os autores ainda salientam que para a metodologia de pesquisa-ação meios comuns de coleta de dados como Surveys podem gerar ansiedade ou hostilidade por parte dos entrevistados. Neste sentido, a aplicação do indicador IPS tem menor impacto uma vez que usa questões objetivas estruturadas e não questões subjetivas.

Após conseguir o consentimento para a aplicação do indicador por parte da gestão da empresa, que para manter a confidencialidade dessa, denominou-se “ $\alpha$ ”, realizou-se os agendamentos de reuniões para coletas de dados com os respondentes. A empresa indicou quatro respondentes para o processo de coleta de dados, o quadro 21 ilustra a identificação dos respondentes e suas funções.

Quadro 21 – Identificação dos respondentes.

Identificação	Descrição
<b>Respondente 1</b>	Supervisor de qualidade, área responsável pela gestão da qualidade, segurança e meio ambiente. Este funcionário atua na organização desde 2013 e está na posição desde 2019.
<b>Respondente 2</b>	O respondente 2 tem a função de gestor de logística e atua na empresa desde 2005 e está na posição desde 2018.
<b>Respondente 3</b>	Analista de recursos humanos e atua na organização desde 2019 e está na posição desde então.
<b>Respondente 4</b>	Analista de estratégia e desempenho. O funcionário atua na organização desde 2019 e está na posição desde então.

Fonte: Do autor, 2022.

A primeira etapa da coleta de dados foi uma reunião introdutória com os respondentes com a fim de explicar de maneira detalhada o objetivo da aplicação do instrumento de avaliação de sustentabilidade e uma previa explicação dos parâmetros deste instrumento e do tripé de sustentabilidade. Esta reunião inicial foi fundamental pois estimulou os respondentes a terem os documentos fonte de dados preparados para as reuniões subsequentes, essas feitas apenas entre o pesquisador e o respondente de cada processo. O período avaliado na primeira aplicação do indicador foram os dados de 2020 em comparação com os dados de 2019.

#### 4.2.3.1 Dados para o indicador ambiental

O indicador ambiental – IA tem três parâmetros. O primeiro voltado ao consumo de recursos ambientais como energia e água, o segundo voltado para impactos ambientais e a terceira voltada ao consumo de matérias primas. Dois respondentes foram indicados pela empresa para responder as informações do indicador ambiental.

Os quadros 22 a 25 ilustram as notas colhidas pelo pesquisador dadas pelos respondentes, revisando os dados colhidos em documentos de arquivos devido a necessidade de comparar os parâmetros atuais com os parâmetros históricos.

Quadro 22 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 1: Energia.

<b>PARÂMETRO 1 - ENERGIA:</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 1 - Redução do uso de energia</b>	<b>Fonte</b>
4	Redução de 2,1% até 5% no último ano	Respondente 1
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 2 - Uso de energias alternativas</b>	<b>Fonte</b>
3	Uso de energias renováveis implantado	Respondente 1

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 23 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 2: Água.

<b>PARÂMETRO 2 - ÁGUA:</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 3 - Redução do uso de água</b>	<b>Fonte</b>
4	Redução de 5,1% até 10% no último ano	Respondente 1
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 4 - Política de reutilização de água</b>	<b>Fonte</b>
5	Reuso representa >5,1% do consumo total	Respondente 1

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 24 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 3: Materiais.

<b>PARÂMETRO 3 - MATERIAIS:</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 5 - Gestão de inventario e compra</b>	<b>Fonte</b>
3	Política de gestão empregada e inventario inferior ao consumo semestral	Respondente 2
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 6 - Controle de peças não conforme</b>	<b>Fonte</b>
3	Política de controle empregada e resultados anuais de 2 sigmas	Respondente 1

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 25 – Resposta obtida ao Indicador Ambiental – IA, parâmetro 4: Resíduos.

<b>PARÂMETRO 4 - RESÍDUOS:</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 7 - Coleta seletiva de resíduos</b>	<b>Fonte</b>
5	Tem política de coleta de resíduos já implantada em todo a planta	Respondente 2
<b>Nota obtida</b>	<b>Fator 8 - Descarte de resíduos</b>	<b>Fonte</b>
2	Descarta resíduos de maneira correta, mas sem prévia análise de reuso	Respondente 1

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

O desempenho global do indicador ambiental (IA) é dado pela equação (1), conforme indicado no tópico 4.1.1. A discussão mais ampla do resultado está descrita no tópico 4.2.3 do presente capítulo.

$$IA = \frac{4+3+3+5+3+3+5+2}{8} = 3,5 \quad (1)$$

#### 4.2.3.2 Dados para o indicador social

O indicador social - IS tem dois parâmetros. O primeiro voltado ao papel da organização para com a comunidade quanto ao cumprimento de requisitos legais e o segundo parâmetro voltado aos recursos humanos da empresa.

Os quadros 26 e 27 ilustram as notas colhidas pelo pesquisador dadas pelos respondentes, revisando os dados colhidos em documentos devido a necessidade de comparar os parâmetros atuais com os parâmetros históricos.

Quadro 26 – Indicador Social, parâmetro 1: Legislação, norma e gestão.

<b>PARÂMETRO 1 - Legislação, norma e gestão</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 1 - Legislações ambientais e certificados</b>	<b>Fonte</b>
4	Possuí certificado e não apresentou nenhuma não conformidade na última auditoria	Respondente 1
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 2 - Gestão ambiental</b>	<b>Fonte</b>
5	Tem evidências sólidas de trabalhar em todas as frentes supracitadas	Respondente 1

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

Quadro 27 – Indicador Social, parâmetro 2: Condição de trabalho.

<b>PARÂMETRO 2 - SOCIAL: Condições de trabalho</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 3 - Condições de trabalho</b>	<b>Fonte</b>
4	Não há histórico de afastamento por acidentes de trabalho, mas há incidentes reportados	Respondente 3
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 4 - Investimento no trabalhador</b>	<b>Fonte</b>
5	Há evidências sólidas de que a empresa executa todas as frentes supracitadas	Respondente 3

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

O desempenho global do Indicador Social (IS) é dado pela equação (2), conforme indicado no tópico 4.1.2. A discussão mais ampla do resultado está descrita no tópico 4.2.3 do presente capítulo.

$$IS = \frac{4+5+4+5}{4} = 4,5 \quad (2)$$

#### 4.2.3.2 Dados para o indicador econômico

O indicador econômico tem dois fatores, o primeiro voltado ao lucro líquido organizacional e o segundo voltado ao crescimento da receita. O quadro 28 ilustra as notas colhidas pelo pesquisador dadas pelo entrevistado, revisando os dados colhidos em documentos de arquivos devido a necessidade de comparar os parâmetros atuais com os parâmetros históricos.

Quadro 28 – Indicador econômico - IE.

<b>PARÂMETRO – Econômico</b>		
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 1 - Lucro líquido</b>	<b>Fonte</b>
4	Margem entre 5 e 15% no último ano	Respondente 4
<b>Nota obtida</b>	<b>FATOR 2 - Crescimento da receita</b>	<b>Fonte</b>
5	Receita com crescimento maior do que 15% em	Respondente 4

Fonte: Adaptado de Subic *et al.* 2012.

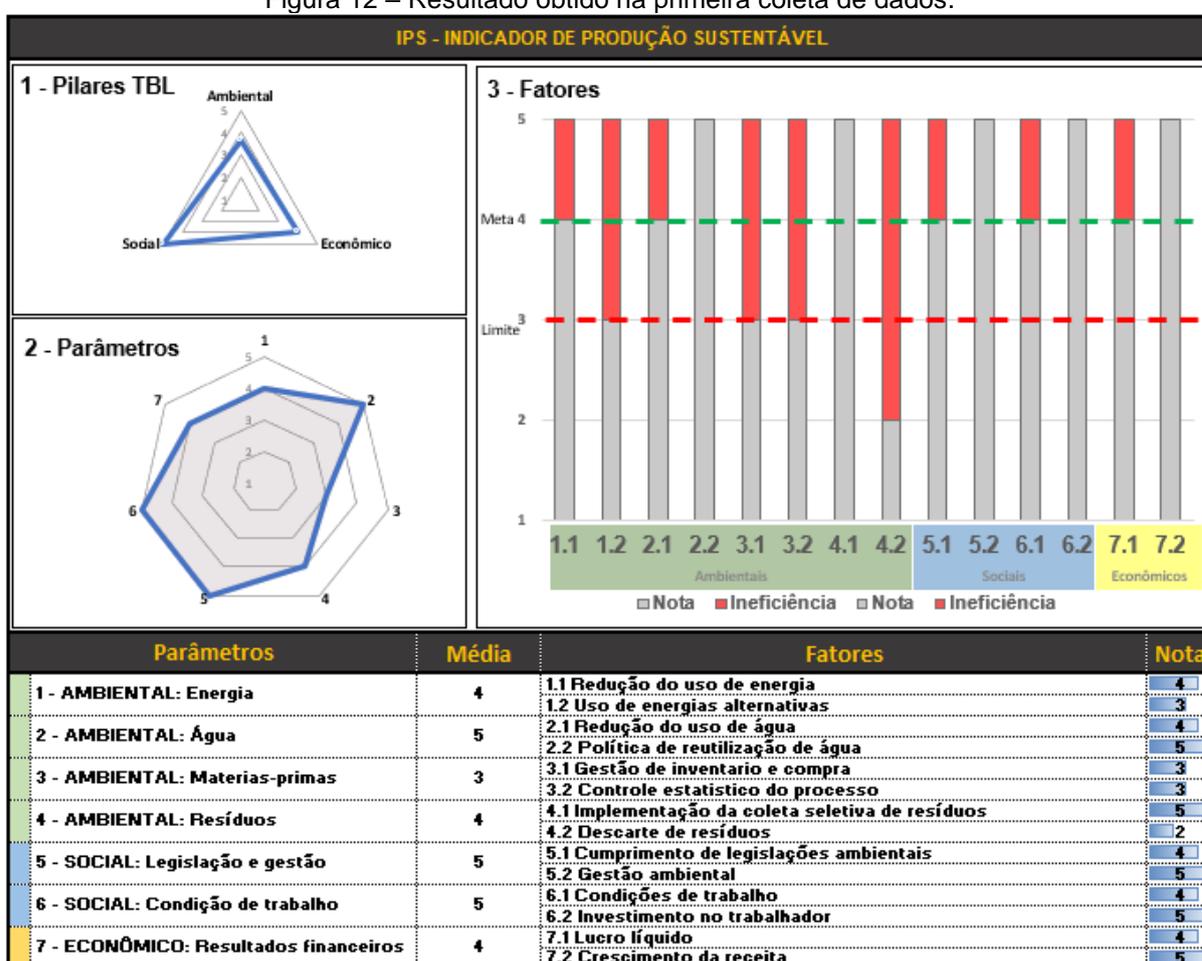
O desempenho global do Indicador Econômico (IE) é dado pela equação (3), conforme indicado no tópico 4.1.3. A discussão mais ampla do resultado está descrita no tópico 4.2.3 do presente capítulo.

$$IE = \frac{4+5}{2} = 4,5 \quad (3)$$

### 4.2.3 Análise dos dados

A análise aprofundada dos resultados obtidos na coleta de dados será discorrida neste tópico. A figura 12 ilustra graficamente o IPS com base nos resultados colhidos, apresentados no tópico 4.2.3. Cada um dos fatores e parâmetros foram tabulados e organizados para melhor gestão visual dos resultados da organização, permitindo direcionamento para as futuras ações de melhoria.

Figura 12 – Resultado obtido na primeira coleta de dados.



Fonte: Do autor, 2022.

#### 4.2.3.1 Análise dos gráficos de radar

O primeiro gráfico de radar “1- Pilares TBL”, ilustrado na figura 12, demonstra que a organização tem resultados superiores à média de 4 na escala de 1 a 5 referente

aos valores médios dos sete parâmetros analisados, é possível verificar que o pilar social teve média máxima 5, já os pilares ambiental e econômico tiveram média 4, indicando já neste primeiro gráfico um ponto de atenção para esses dois pilares.

O segundo gráfico de radar “2 – Parâmetros” (figura 12) ilustra o resultado médio dos quatorze fatores. A organização teve nota média máxima no parâmetro 2 – referente ao consumo e utilização de recursos hídricos e nos parâmetros 5 e 6 que são referentes às questões sociais da organização. O pior desempenho registrado no segundo gráfico foi no parâmetro ambiental: “3 - Matérias primas”.

Já o terceiro gráfico “3 – Fatores” (figura 12) ilustra as notas obtidas em cada fator durante a aplicação do indicador na organização. Esse gráfico contém quatorze colunas, representando cada uma das quatorze questões do indicador, que impactam diretamente os resultados dos gráficos de radar, neste é possível verificar as eficiências para cada um dos fatores além de visualmente direcionar aos pontos de maior ineficiência, este gráfico será discutido com profundidade no próximo tópico.

#### 4.2.3.2 Análise do gráfico de barras

##### 4.2.3.2.1 Fatores ambientais

A primeira e a segunda barra do gráfico 3, figura 12, são ligadas ao pilar TBL “Ambiental”, parâmetro 1 – Energia. A organização utiliza energia elétrica para suprir os equipamentos do setor produtivo e administrativo. O fator 1.1 “Redução do uso de energia” teve nota 5, onde o consumo de energia médio da organização no ano de 2019 foi de 440MW ao mês e o resultado de 2020 foi de 403MW ao mês. Segundo o respondente essa redução se deu principalmente devido a uma melhoria feita no processo de cura do material de atrito onde eram anteriormente necessárias 4 horas de cozimento e passou, depois de estudos, para 3 horas, possibilitando redução de 9,18% em relação ao ano anterior. O fator 1.2 “Uso de energias alternativas” teve nota 3 onde a organização utiliza para os vestiários e banheiros energia solar para aquecimento de água, porém este consumo não chega aos 5% do consumo total, gerando um gap de eficiência de 2 pontos.

A terceira e a quarta barra são ligadas ao pilar TBL “Ambiental”, parâmetro 2 – Água. Conforme evidenciado pelo respondente, o principal consumo de água no

processo produtivo da empresa é para o sistema de arrefecimento no processo de fabricação do material de atrito que por característica abrasiva necessita água para resfriar o equipamento de mistura dos componentes, este deve trabalhar entre 35°C a 50°C, a organização conta com um poço artesiano para extração da água que é utilizada nesse processo. Segundo a empresa o grande desafio é manter toda a água utilizada no processo e não a descartar como era feito até 2019, conforme evidenciado pelo respondente, houve redução de 8% no consumo da água em 2020 em relação ao ano de 2019 quando foi instalada uma torre de resfriamento que mantém a água no sistema diminuindo assim o consumo, portanto a nota do fator 2.1 “Redução do uso de água” foi 4. Com a medida supracitada, o fator 2.2 “Reutilização de água” obteve nota 5 uma vez que o consumo de água reutilizada representa um volume maior que 5% do total utilizado.

A quinta e a sexta barra são ligadas ao pilar TBL “Ambiental”, parâmetro 3 – Matérias primas. A organização tem um grande desafio nestes aspectos uma vez que conforme citado no quadro 15 muitas de suas matérias primas são importadas, gerando um *lead time* de fornecedores médio de 42 dias, além disso a organização tem um portfólio com mais de 500 produtos, forçando com que tenha um inventário maior do que 4 meses, conforme justificativa a nota dada pelo respondente, gestor do setor de logística ao fator 3.1 “Gestão de inventário e compra”. Para o fator 3.2 “Controle estatístico do processo” o desempenho foi nota 3, conforme análise histórica do parâmetro de processo chave para a qualidade das pastilhas “compressibilidade” o índice de peças não conforme é de 3.000ppm.

Já a sétima e a oitava barra, fechando os fatores ambientais do indicador são referentes à gestão de resíduos da organização. Embora para o fator 4.1 a organização tenha desempenho excelente uma vez que tem em todos os setores, tanto no administrativo quanto no produtivo há coleta seletiva de resíduos e os descarta corretamente, no fator 4.2 “Descarte de resíduos” a organização tem a maior ineficiência encontrada pois descarta os resíduos sem prévia análise de reuso.

#### 4.2.3.2.2 Fatores sociais

Referentes ao pilar TBL “Social”, o parâmetro 5 “Legislação e gestão” e o 6 “Condições de trabalho” são os parâmetros de melhor desempenho da organização no IPS. O primeiro parâmetro de quatro é o 5.1 “Cumprimento de legislações

ambientais”. Este visa avaliar a preocupação da organização com a sociedade ao cumprir legislações e obter certificados ambientais a fim de externar à sociedade essa preocupação. A organização tem certificado ambiental NBR ISO-14001 com o número de registro TNBR-25163, com certificação desde 2014, passando por auditorias externas periodicamente a fim de revalidar esse certificado. A nota para o parâmetro 5.1 é 4 pois embora possua certificações e não tenha sido encontrada nenhuma não conformidade nas últimas auditorias, conforme documentos apresentados pelo respondente, na auditoria realizada em 2019 apresentou uma não conformidade menor a respeito de um plano de ação não finalizado no prazo. Já para o fator 5.2 “Gestão ambiental”, a empresa mostrou evidências sólidas em atas de reuniões e nos diagramas de processos dos setores de que leva em conta o meio ambiente ao tomar decisões estratégicas além de ter programas que envolvem não só a empresa, mas também a comunidade ao redor na questão ambiental, como programas de coleta de óleo de cozinha, pilhas e baterias para o correto descarte, portanto nota 5 nesse fator.

Para o fator 6.1 “Condições de trabalho”, a empresa teve desempenho nota 5 uma vez que não apresenta histórico de afastamentos por acidentes e nenhum incidente foi reportado no último ano conforme evidências no portal do governo federal CAT-Comunicação de Acidente de Trabalho. O último fator do pilar TBL social, 6.2 “Investimento no trabalhador” a empresa também reportou nota 5, o respondente com função de gestor de recursos humanos apresentou dados de campanhas internas de prevenções de doenças, campanhas de vacinações, treinamentos internos e externos além de semanalmente realizar atividades disponíveis a todos como ginastica laboral assistida por profissional de educação física e quiropraxia onde qualquer trabalhador pode agendar um horário previamente durante a jornada de trabalho e usufruir desse benefício. Segundo fala do responsável pela gestão de SSMA, atividades físicas como ginastica laboral tornam os trabalhadores mais dispostos e menos sujeitos a doenças ocupacionais, refletidas na nota do fator 6.1.

#### 4.2.3.2.3 Fatores econômicos

Referentes ao pilar TBL “Financeiro”, o parâmetro sete “Resultados financeiros” teve desempenho nota quatro. Para este parâmetro foram considerados dois fatores: 7.1 “Lucro líquido” e 7.2 “Crescimento da receita”. Embora existam diversas métricas

a serem levadas em conta para medir o desempenho financeiro de uma organização, por parcimônia foram levados em conta esses dois fatores pois permitem uma visão geral do paradigma da organização e outros indicadores muitas vezes podem medir as mesmas variáveis, porém de outra maneira. Para o fator 7.1 “Lucro líquido”, o respondente gestor da área de controladoria apresentou o resultado do DRE da empresa no final de 2020 com lucro líquido de 10%, portando desempenho nota quatro nesse fator, destaque para o aumento de negócios *intercompany* com outras unidades do conglomerado que fizeram com que o custo de aquisição de matérias primas caísse em 20% em relação ao ano anterior e também por melhorias de processos conforme evidenciadas no indicador ambiental, onde houve redução no consumo de água e de energia. Com respeito ao fator “Crescimento da receita” comparando os resultados apresentados do fechamento do ano de 2020 em comparação ao de 2019, houve crescimento da receita em 18%, mesmo em face da situação de pandemia, a empresa apresentou aumento na receita para o mercado de reposição, embora houve queda na captação de receita para o mercado de montadoras.

#### 4.2.4 Análise geral e direcionamentos

A aplicação do indicador por si só trouxe contribuições para a literatura, tanto de caráter confirmatório quanto de caráter descritivo. Observou-se através da aplicação do indicador que a organização estudada já tem dentre suas estratégias a busca pela melhoria contínua de seus processos além da preocupação com questões ambientais. Corroborando com os autores encontrados na revisão sistemática da literatura como Salim *et al.* (2017) que indicaram que organizações com ISO 14001 tem desempenho superior em fatores sustentáveis, também com Chen *et al.* (2019), Miller *et al.* (2010) e Qureshi *et al.* (2019) que indicaram em suas pesquisas a importância do papel do suporte dos gestores no desempenho sustentável e de técnicas de melhoria contínua que exercem papel mediador nos resultados de sustentabilidade, confirmado através do indicador onde mostrou-se evolução dos resultados comparados ao período anterior após a aplicação de técnicas de melhoria no pilar TBL “Ambiental”, parâmetro 2 – Água e no parâmetro 5 “Legislação e gestão”.

Outro ponto a se destacar é que por aplicar o protocolo de coleta de dados proposto por Coughlan e Goghlan (2002) onde após ter o indicador pronto foi realizada

uma reunião de abertura com os respondentes a fim de que esses pudessem entender o motivo do estudo conduzido permitindo que esses quando questionados já estivessem familiarizados com o indicador e com todas as evidências necessárias em mãos, facilitando a coleta de dados, corroborando também com Moldavska e Welo (2018) que enfatizam a criação de protocolos de coleta de dados.

Como a característica do presente trabalho é a pesquisa-ação, a próxima etapa proposta por Coughlan e Goghlan (2002) após a coleta de dados é estabelecer um plano de ação para as melhorias a serem feitas, com foco nas mais críticas uma vez que esse método de pesquisa é cíclico, conforme quadro 1.

Conforme metas estabelecidas e observadas na figura 12, dentre os principais pontos de ineficiência encontrados na coleta de dados estão o fator 1.2 “Uso de energias alternativas” com nota três, porém como o desempenho médio do parâmetro 1 – Ambiental “Energia” é nota quatro o torna menos crítico do que o parâmetro 3 – Ambiental “Matérias primas” onde para os fatores 3.1 “Gestão de inventário e compra” e 3.2 “Controle estatístico do processo” o desempenho médio foi nota três. Já o fator 4.2 “Descarte de resíduos” teve o pior desempenho no IPS uma vez que a empresa descarta os resíduos de produção embora de forma seletiva sem prévia análise de reuso. Portanto com base nos dados supracitados o foco das ações tomadas para este primeiro ciclo de pesquisa-ação será o fator 4.2 “Descarte de resíduos” e o fator 3.2 “Controle estatístico do processo”.

Conforme os direcionamentos para os pontos de melhoria observados na figura 12 o próximo tópico abordará as ferramentas utilizadas para o mapeamento do processo de produção a fim de alcançar as metas estabelecidas.

### **4.3 Proposição de melhorias**

Para aprimorar a sustentabilidade em sistemas de manufatura é importante o mapeamento do fluxo dos recursos conforme Badurdeena e Huang (2017) que também indicam que técnicas de logística reversa como o 6R e o LCA são importantes ferramentas para o aprimoramento da sustentabilidade. Cherrafi *et al.* (2016) indicaram que programas de melhoria contínua como o *lean six sigma* propiciam redução no desperdício de materiais em até 40%, corroborando com esses dados Shahbazi *et al.* (2019) indicam ferramentas como o *Environmental Value Stream*

*Mapping* (EVSM) combinadas com ferramentas como o *Waste Flow Mapping* (WFM) para o mapeamento do fluxo de resíduos.

Segundo Naser e Gunduz (2017) o EVSM que é uma ferramenta que vai além do VSM comum utilizado no *Lean manufacturing*, esta ferramenta não foca apenas no fluxo de valor de produção, mas também ajuda a reconhecer os possíveis impactos ambientais no fluxo, quantificar desperdícios de matérias primas e direcionar à identificação das causas raízes de ineficiências (KURDVE *et al.* 2015; BAIT *et al.* 2020; MÜLLER; SCHILLIG; STOCK; SCHMEILER. 2014).

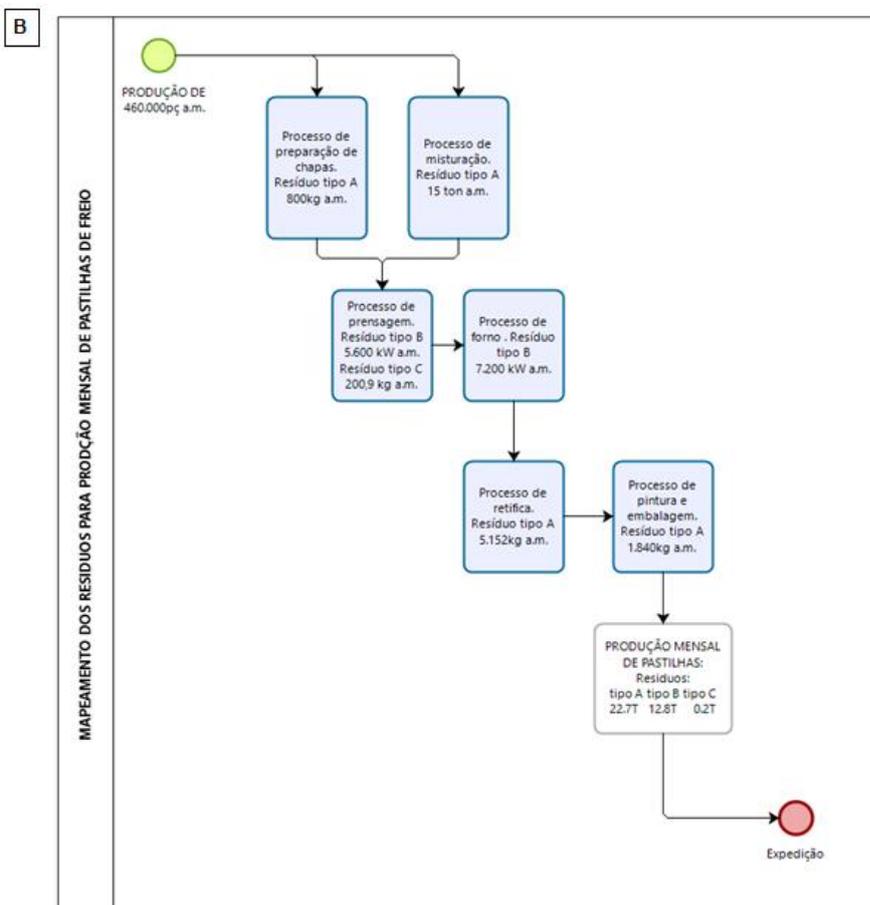
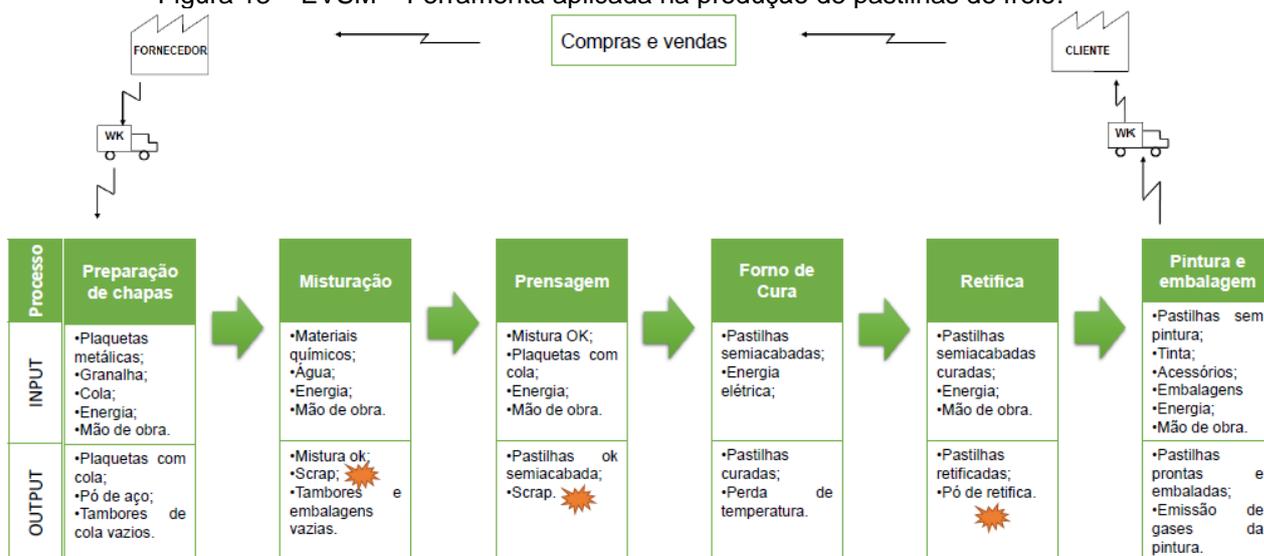
Shahbazi *et al.* (2019) propõe identificar no mapeamento das entradas e saídas de cada operação as principais fontes de geração de resíduos. Para isso classificou-se as perdas no processo em três classes, a saber:

- Resíduo padrão (A): Aqueles que são esperados desde o desenvolvimento do produto e inevitáveis ou inerentes aos equipamentos, como recipientes de matérias primas e arestas de materiais removidas no processo de acabamento;
- Perdas de energia (B): Perdas geradas a cada troca de ferramenta e peças geradas até a estabilização dos parâmetros dos equipamentos;
- Resíduos de qualidade (C): Peças geradas com desvio das especificações propostas e que não atendam os critérios de qualidade.

Shahbazi *et al.* (2019) afirmam ser necessários para a construção do EVSM e do WFM o envolvimento da equipe multifuncional e visitas ao chão de fábrica, portanto com o suporte da engenharia de processos da empresa “ $\alpha$ ”, com vista a aprimorar os resultados do IPS, mapeou-se o processo de fabricação de pastilhas de freio para aplicação das técnicas supracitadas.

A figura 13-A ilustra o mapeamento do fluxo de produção e as principais entradas e saídas do processo através do EVSM, bem como a classificação dos resíduos (A, B e C) conforme indicado por Shahbazi *et al.* (2019). Na figura 13-B ilustra-se a ferramenta WFM, com o mapeamento dos resíduos gerados levando-se em conta uma produção média mensal de 460.000 pastilhas de freio.

Figura 13 – EVSM – Ferramenta aplicada na produção de pastilhas de freio.



Fonte: Do autor, 2022.

Observa-se no EVSM que o principal tipo de resíduo gerado na produção de pastilhas de freio mapeado na ferramenta foi o tipo A Resíduos Padrão. Observa-se no WFM (figura 13-B) que é gerado um total de 22.7 toneladas de resíduos em uma produção mensal de 460.000 peças (necessário 77.9 toneladas de material de atrito).

Conforme observa-se no EVSM (figura 13-A) o processo com maior índice de geração de resíduos tipo A é o processo de “Misturação”. Em conversa com o responsável da área da engenharia da empresa esse resíduo é composto por materiais granulados que se formam devido a aglutinação da resina fenólica e dos componentes metálicos, esse material fica retido pós misturados na etapa de peneiramento do processo de “Misturação”, conforme figura 14. O segundo maior processo gerador de resíduos tipo A é o processo de retifica onde parte do material de atrito prensado é descartado no acabamento das pastilhas.

Figura 14 – Resíduos tipo A gerados no processo.



Fonte: Do autor, 2022.

Caracterizando os resíduos no laboratório da empresa observou-se a mesma composição do material de atrito atual com pequena variação do percentual de umidade de 1,1% para 1,3% e de densidade de 2,7g/cm<sup>3</sup> para 2,6g/cm<sup>3</sup>. Essas variações acontecem devido ao armazenamento do resíduo sujeito a intempéries, impactando no aumento da umidade, bem como às características do material segregado na peneira, menos denso devido a estar aglutinado.

Referentes aos resíduos tipo B, perda de energia os processos com maiores perdas são o processo de prensagem com 5.600kW ao mês e o processo de cura com 7.200kW ao mês. Segundo o respondente responsável essas perdas são inerentes ao processo pois a fábrica trabalha em dois turnos e durante o período da madrugada o forno e as prensas ficam desligadas, sendo necessário consumo adicional de energia para estabelecer a temperatura dos equipamentos diariamente.

Para os resíduos do tipo C, gerados por problemas de qualidade, mensalmente são descartados 200kg de material de atrito no processo de prensagem devido a problemas referentes a alta compressibilidade nas pastilhas, com um índice de peças não conforme de 3.000 peças por milhão. O quadro 29 ilustra os principais pontos geradores de resíduos.

Quadro 29 – Principais geradores de resíduos.

ID	Processo	A (kg)	B (kW)	C (kg)
1	Preparação de Chapas	800,00		
2	Processo de Misturação	15.134,72		
3	Processo de Prensagem		5.600,00	200,90
4	Processo de Forno		7.200,00	
5	Processo de Retífica	5.152,00		
6	Processo de Acabamento	1.840,00		
Total		22.792,00	12.800,00	200,90

Fonte: Do autor, 2022.

Usar a ferramenta EVSM e a WFM como proposto por Shahbazi *et al.* (2019) direcionou aos principais processos geradores de resíduos, mostrando que mais de 22 toneladas de resíduos de material de atrito são descartadas sem a previa análise de reuso. Despeisse *et al.* (2012) salientam que para aprimorar a sustentabilidade em sistemas de manufatura é importante após o mapeamento do fluxo dos recursos, criações de modelos matemáticos para o aprimoramento dos resultados, o próximo tópico ilustrará a luz de técnica de pesquisa operacional uma alternativa para redução de impactos ambientais.

#### 4.3.1 Aplicando pesquisa operacional

Analisando o indicador IPS observou-se que a empresa  $\alpha$  no fator 4.2 “Descarte de resíduos” tem a maior ineficiência encontrada. Com o mapeamento realizado no processo de produção da empresa  $\alpha$  utilizando as ferramentas EVSM e WFM

conforme Shahbazi *et al.* (2019) observou-se que mais de 22 toneladas de resíduos tipo A são descartadas mensalmente. Analisando a figura 14 e os dados do quadro 25 é possível identificar que os principais geradores de resíduos são o processo de Misturação que gera 15 toneladas ao mês e o processo de retifica gera 5,1 toneladas ao mês. Somados, somente esses dois processos geram 240 toneladas de material de atrito não reutilizados e que são descartados ao ano.

Além disso, conforme descrito no capítulo 1, muitos dos componentes para fabricar materiais de atrito são nocivos ao meio ambiente e a seres humanos. Segundo Wahlström (2011), durante a frenagem as pastilhas de freio liberam partículas poluentes. Conforme dados da EPA (2021), essas partículas contribuem para a alteração do Ph de lagos, aumento de doenças, contaminação do lençol freático e contaminação de nutrientes do solo.

Avaliando a quantidade média mensal de pastilhas produzidas e comercializadas pela empresa  $\alpha$ , chega-se a um montante de 460.000 pastilhas ao mês. Considerando uma pastilha de freio média de 50cm<sup>2</sup> de área e 18mm de espessura utilize material de atrito com peso específico de 2,8g/cm<sup>3</sup> cada pastilha utilizará em média 252g de material de atrito, sendo que pelo menos 20% dessa composição são materiais críticos ao meio ambiente, anualmente as pastilhas da empresa geram ao meio ambiente 278 toneladas de matérias-primas críticas.

Diante do impacto gerado pela empresa, tanto na questão do descarte de resíduos gerados na produção quanto nos impactos ambientais gerados pelas pastilhas de freio comercializadas, utilizando o método de pesquisa operacional “Problema de misturas” (CHAOUCH; BEM; KULKARNI, 2015; PROIETTI; REGNI; CALISTI, 2020; MOUSSA, 2021), buscou-se formular um modelo matemático específico para mitigá-los.

Avaliando o resultado obtido na aplicação do modelo matemático para o problema de mistura proposto executado através do *software* GAMS® foi possível chegar a um resultado ótimo em 0.078 segundos. De maneira objetiva, avaliando a produção média prevista para o ano de 2021 de 77.8 toneladas ao mês de material de atrito, com os resultados gerados pelo modelo, a saber, um material de atrito que utilizará em sua composição 15% de materiais que eram considerados resíduos, permitindo que com a adoção do modelo a empresa deixe de descartar em aterros em

média 240 toneladas ao ano, ou seja, consumir totalmente os resíduos gerados nos processos mais críticos mapeados na figura 14.

Outro ponto a salientar é que o modelo considerou as quantidades limites propostas pela ECHA (2021), reduzindo assim a quantidade de materiais críticos ao meio ambiente, conforme quadro 30, esses materiais representam na composição atual 24,20% e o modelo gerou 17,41%, isso significará anualmente menos 63,4 toneladas desses materiais críticos no meio ambiente. O modelo também gerou a possibilidade de minimizar o custo total da mistura em 4,11%.

Quadro 30 – Composição do material proposto pelo GAMS.

Índice	Id	% Anterior	% Proposta GAMS	Diferença
i	M1	4,00%	3,60%	-10,00%
i	M2	7,00%	0,01%	-99,86%
i	M3	7,20%	7,50%	4,17%
I	M4	6,00%	6,30%	5,00%
j	N1	12,00%	13,20%	10,00%
j	N2	7,00%	7,70%	10,00%
j	N3	5,00%	5,50%	10,00%
j	N4	21,00%	19,70%	-6,19%
J	N5	5,80%	6,40%	10,34%
J	N6	25%	15%	-40%
J	N7	0%	15%	100%

Fonte: Do autor, 2022.

O material de atrito proposto através da modelagem matemática deverá ser validado uma vez que houve algumas variações nos componentes estruturantes da formulação, principalmente a diminuição de componentes metálicos e o aumento de cargas, conforme verifica-se no quadro 26.

#### 4.3.2 Validação através de análises estatísticas

Segundo o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO (2021), pastilhas de freio são classificados como itens de segurança para veículos, portanto, o desafio após a proposição do material de atrito via modelagem matemática utilizando o GAMS® é a validação através dos testes descritos no quadro 31. Esses testes definem determinados requisitos mínimos para que pastilhas de freio de veículos comerciais leves sejam comercializadas no Brasil.

Após a fabricação das amostras, passou-se a realizar os dez testes descritos no quadro 31. Esses testes visaram além da validação conforme as diretrizes das normas gerar dados para a comparação do desempenho entre o material de atrito atual utilizado pela empresa denominado “MATERIAL A”, com o material gerado pelo modelo GAMS denominado “MATERIAL B”.

Utilizando o software Minitab® analisou-se os resultados de ambos os materiais de maneira separada a fim de caracterizá-los com a ferramenta estatística *Capability sixpack* (MONTGOMERY, 200; BROOK, 2017). Após caracterização estatística dos materiais, passou-se a avaliar se havia evidências estatísticas com nível de significância  $\alpha=0,05$  para afirmar se os resultados são estatisticamente diferentes, utilizando o gráfico boxplot e análise variância ANOVA (HAIR *et al.* 2009).

O quadro 27 traz um resumo dos resultados das análises estatísticas. Observa-se que nos dez testes realizados, os materiais tiveram desempenho aceitável em nove. Na análise de capacidade o MATERIAL B teve Cpk superior a 1,33 em 7 testes, enquanto o MATERIAL A teve Cpk superior a 1,33 em apenas 3 testes, porém no teste ANOVA só houve evidência com nível  $\alpha=0,05$  de diferença em apenas 2 testes, no teste de Densidade Relativa já era esperado pois os materiais têm composições diferentes (quadro 31) e no teste de Resistência ao Cisalhamento em que o material B teve resultado superior ao material A com nível de significância  $P=0,003$  e  $F=9,33$ .

Conforme avaliado no indicador IPS, os resultados para compressibilidade do “MATERIAL A” já apresentavam desempenho baixo. Nos testes realizados encontrou-se valores com alta dispersão e baixa capacidade, inclusive para o “MATERIAL B”, gerado pelo modelo. Conforme observa-se no quadro 31, os resultados do “MATERIAL B”, proposto pelo modelo são equivalentes ao utilizado atualmente pela empresa, podendo assim, ser adotado devido ser mais amigável ao meio ambiente, além de permitir redução de custo à empresa  $\alpha$ .

Quadro 31 – Resumo das análises estatísticas.

TESTE	MATERIAL		CONCLUSÃO
	A	B	
Dureza Gogan	✓	✓	Ambos os materiais têm resultado satisfatório quanto ao atendimento do especificado na NBR ISO 5520:1991. Quanto a capacidade o material B teve CP superior a 1,33, já o material A teve CP inferior. Porém no teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com um nível de significância $\alpha=0,05$ .
Densidade relativa	✓	✓	Ambos os materiais têm resultado satisfatório quanto ao atendimento do especificado na NBR ISO 5544:1998. Quanto a capacidade os dois materiais tiveram CP superior a 1,33. No teste ANOVA não há evidência estatística de que os materiais são iguais.
Compressibilidade	✗	✗	Ambos os materiais tiveram resultados não satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6310:2016. Observou-se que ambos os materiais tiveram cpk abaixo de 1,33. No teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com um nível de significância $\alpha=0,05$ .
Cisalhamento	✓	✓	Ambos os materiais tiveram resultados satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6311:2006. Quanto a capacidade os dois materiais tiveram CP superior a 1,33. No teste ANOVA não há evidência estatística de que os materiais são iguais tendo o material B desempenho superior.
Coeficiente de atrito mínimo	✓	✓	Ambos os materiais tiveram resultados satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6143:1995. Quanto a capacidade os dois materiais tiveram Cpk inferior a 1,33. No teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com um nível de significância $\alpha=0,05$ .
Coeficiente de atrito médio e atrito a frio	✓	✓	Ambos os materiais tiveram resultados satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6143:1995. Quanto a capacidade o material B teve CP superior a 1,33, já o material A teve CP inferior. No teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com nível significância $\alpha=0,05$ .
Coeficiente de atrito fade	✓	✓	Ambos os materiais tiveram resultados satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6143:1995. Quanto a capacidade o material B teve Cpk superior a 1,33, já o material A teve Cpk inferior. Porém no teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com um nível de significância $\alpha=0,05$ .
Coeficiente de atrito máximo	✓	✓	Ambos os materiais tiveram resultados satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6143:1995. Quanto a capacidade o material B teve Cpk superior a 1,33, já o material A teve CP inferior. Porém no teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com um nível de significância $\alpha=0,05$ .
Desgaste	✓	✓	Ambos os materiais tiveram resultados satisfatórios em relação às especificações da NBR ISO 6143:1995. Quanto a capacidade o material A teve Cpk superior a 1,33, já o material B teve Cpk inferior. Porém no teste ANOVA não há evidência estatística de diferença entre os materiais com um nível de significância $\alpha=0,05$ .

Fonte: Do autor, 2022.

#### 4.3.3 Aplicando *Desing of experiments*

Conforme descrito no tópico 4.2.3, após a aplicação do indicador IPS o fator 3.2 “Controle estatístico do processo” foi um dos pontos mais críticos dos resultados da empresa  $\alpha$ . Este fator teve desempenho nota 3 no IPS, conforme análise histórica dos testes de compressibilidade, este apresenta índice de peças não conforme de 3.000ppm. Isso significa que, para a produção média mensal da empresa de 460.000 peças são geradas 1.380 fora das especificações, sendo necessário o descarte, anualmente 16.560 peças ou 4,1 toneladas de material de atrito no meio ambiente.

Na análise estatística corroborou-se com os resultados históricos da empresa. Os resultados para o ensaio de compressibilidade do “MATERIAL A” (atual da empresa) teve Cpk de 0,94 com alta dispersão apresentando desvio padrão de 17,69 $\mu$ m. Com o “MATERIAL B”, gerado pelo modelo, também teve Cpk abaixo do esperado Cpk 1,03 e desvio padrão de 14,53 $\mu$ m, conforme quadro 32.

Quadro 32 – Resultados obtidos no teste de Compressibilidade.

Compressibilidade ( $\mu$ m)								
Material	LI	LS	Média	Amplitude R	Teste AD	Desv. Pad	Cp	Cpk
“MATERIAL A”	127,67	202,73	165,20	19,96	0,11	17,69	-	0,94
“MATERIAL B”	139,31	200,99	170,15	16,40	0,09	14,53	-	1,03

Fonte: Do autor, 2022.

Como os dois materiais tiveram baixo Cpk e alta variação para no teste de compressibilidade entende-se que a variável matéria-prima não é a causadora da variação. Empregando a técnica estatística *Desing of Experiments* (DOE) que conforme Brook (2017) permite através da experimentação de variáveis chaves de maneira controlada identificar os parâmetros ótimos para processos de fabricação.

Para construção de um DOE é importante a identificação das variáveis que impactam nos resultados (GHANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; HASSAN, H, 2004). Wright *et al.* (2002) advogam que para cada variável é necessário determinação de níveis. Para a fabricação de pastilhas de freio o processo chave é a prensagem do material de atrito na plaqueta metálica, para este processo a pressão, a temperatura e o número de ciclos são fatores determinantes para que os produtos atendam as especificações (BREZOLIN, 2007; PANDOLFO, 2006; PEROTTONI; MENETRIER; MATTÉ, 2018).

Segundo Montgomery (2000) para a criação de um experimento fatorial é importante manter o mínimo possível de fatores e de níveis e no caso do experimento em questão, utilizou-se um DOE fatorial  $2^3$ , com dois níveis e três variáveis. Como o processo de prensagem é o processo chave que impacta no fator “compressibilidade” as variáveis do experimento foram pressão (P), temperatura (T) e número de ciclos (N).

Após a definição das variáveis, níveis e quantidade de amostras passou-se a produzir as amostras seguindo o princípio da casualidade conforme Montgomery (2000). Utilizando o *software* Minitab® passou-se a delinear o experimento com base nas informações supracitadas.

Hair et al. (2009) trazem a importância da interpretação da variável estatística pela avaliação dos coeficientes estimados, esses representam os tipos de relação, negativas ou positivas, e a força entre as variáveis, esses coeficientes podem ser usados para previsão e explicação dos resultados do modelo. Analisando os resultados das amostras foi possível verificar que a pressão teve efeito negativo, a temperatura efeito positivo e o número de ciclos efeito negativo nos resultados da compressibilidade. Para validar os resultados direcionados pelo DOE produziu-se conforme indicado novas amostras.

Avaliando os dados de capacidade encontrados pós aplicação da técnica teve-se desvio padrão de 3,83, média amostral de 159,2 e *cpk* de 4,85, valores excelentes e mostram alta capacidade de atender aos requisitos, com nível zero de ppm para as amostras produzidas no processo conforme modelo gerado pelo DOE.

#### **4.4 Discussão dos resultados**

Neste tópico será apresentada uma discussão dos resultados do trabalho como um todo, tanto do indicador construído, quanto da última etapa do ciclo de pesquisa-ação proposta por Coughlan e Coughlan (2002) “avaliação dos resultados da ação”, fase 4 “Conclusão” da pesquisa.

##### **4.4.1 Discussões sobre o indicador**

Com o foco na redução dos impactos ambientais gerados na produção de pastilhas de freio, inicialmente notou-se que os estudos voltados para essa área são voltados para a redução do impacto ambiental durante a vida útil de pastilhas de freio por meio da redução matérias primas críticas em sua composição, como o cobre e o amianto (GIRUBHA; VINODH, 2012; PIPAL; GURSUMEERAN, 2015; MUNIR, 2017; RAOUFI *et al.* 2017; SWARNAKAR *et al.* 2021). Porém, notou-se uma lacuna quanto ao mapeamento dos impactos ambientais gerados durante os processos de produção de pastilhas de freio (QURESHI *ET AL.* 2019; MATTHEWS, STAMFORD E SHAPIRA 2019; DESPEISSE *ET AL.* 2012; LAYTON, BRAS E WEISSBUG, 2016; BHANOT *et al.* 2020).

Diante disso buscou-se um indicador de sustentabilidade para avaliar o impacto ambiental dessa indústria. Porém, durante a revisão da literatura observou-se uma lacuna na validade externa dos indicadores de sustentabilidade existentes. Embora de maneira geral os indicadores de sustentabilidade avaliem fatores como o econômico, o ambiental e o social, os parâmetros desses fatores tendem a ser específicos para cada indústria (QURESHI *ET AL.* 2019; MATTHEWS, STAMFORD E SHAPIRA 2019; DESPEISSE *ET AL.* 2012; BHANOT *ET AL.* 2020; LAYTON, BRAS E WEISSBUG, 2016).

De maneira mais aprofundada, a confirmação dessa lacuna se deu através da questão de pesquisa **Q1- Como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras?** Onde para respondê-la extensa revisão sistemática foi conduzida nas bases da Web of Science - WOS e Scopus, totalizando 1.573 documentos.

Observou-se conforme discussão na literatura (GIRUBHA; VINODH, 2012; PIPAL; GURSUMEERAN, 2015; MUNIR, 2017; RAOUFI *et al.* 2017; SWARNAKAR *et al.* 2021) o foco na construção de indicadores de sustentabilidade para diversas indústrias, entretanto, conforme Moldavska e Welo (2018) devido suas especificidades há a dificuldade de replicá-los para outros contextos, como o da indústria de materiais de fricção. Durante a revisão da literatura encontrou-se predominância de estudos de caso (80% dos artigos). Segundo Gil (2008) uma das principais vantagens dos estudos de caso é a capacidade de descrever uma situação em que está sendo feita determinada investigação, mas a falta de validade externa restringe a generalização dos resultados para diferentes situações.

Portanto, baseado no supracitado é de vital importância a avaliação do contexto qual o indicador de sustentabilidade será aplicado e se necessário, adaptar uma ferramenta para a avaliação. Diante disso, passou-se a criação do indicador IPS a partir dos indicadores encontrados através da técnica Revisão Sistemática da Literatura (capítulo 3). Importantes insights foram obtidos como a amplitude dos indicadores (nível empresarial ou toda a cadeia de suprimentos), a clareza na definição da periodicidade de aplicação, a necessidade de integração do TBL em suas métricas e que essas sejam normalizadas a fim de que o indicador seja harmônico como um todo (BADURDEENA; HUANGA, 2017; ABUBAKR *ET AL.* 2020).

A presente pesquisa trouxe além da contribuição teórica empregada na criação do indicador, a validação deste dentro do contexto da indústria produtora de materiais de fricção. Essa aplicação por si só trouxe contribuições para a literatura, tanto de caráter confirmatório quanto de caráter descritivo.

Observou-se através da aplicação do indicador que a organização estudada já tem dentre suas estratégias a busca pela melhoria contínua de seus processos além da preocupação com questões ambientais. Corroborando com os autores encontrados na revisão sistemática da literatura como Salim *et al.* (2017) que indicaram que organizações com ISO 14001 tem desempenho superior em fatores sustentáveis, também com Chen *et al.* (2019), Miller *et al.* (2010) e Qureshi *et al.* (2019) que indicaram em suas pesquisas a importância do papel do suporte dos gestores no desempenho sustentável e de técnicas de melhoria contínua que exercem papel mediador nos resultados de sustentabilidade.

Outro ponto a se destacar é que por aplicar o protocolo de coleta de dados proposto por Coughlan e Goghlan (2002) onde após ter o indicador pronto foi realizada uma reunião de abertura com os respondentes a fim de que esses pudessem entender o motivo do estudo conduzido permitindo que esses quando questionados já estivessem familiarizados com o indicador e com todas as evidências necessárias em mãos, facilitando a coleta de dados, corroborando também com Moldavska e Welo (2018) que enfatizam a criação de protocolos de coleta de dados.

Portanto, este trabalho gerou à academia um indicador com um conjunto de métricas harmônicas deveras eficazes no que tange ao direcionamento aos pontos de melhoria validado através de uma aplicação prática, que terão seus resultados discutidos no próximo tópico.

#### 4.4.2 Discussões dos resultados da pesquisa-ação

Conforme tópico 4.3, após as ações serem executadas nos pontos de maiores deficiências indicados pelo IPS: fator 4.2 “Descarte de resíduos” e do fator 3.2 “Controle estatístico do processo”, importantes resultados foram alcançados.

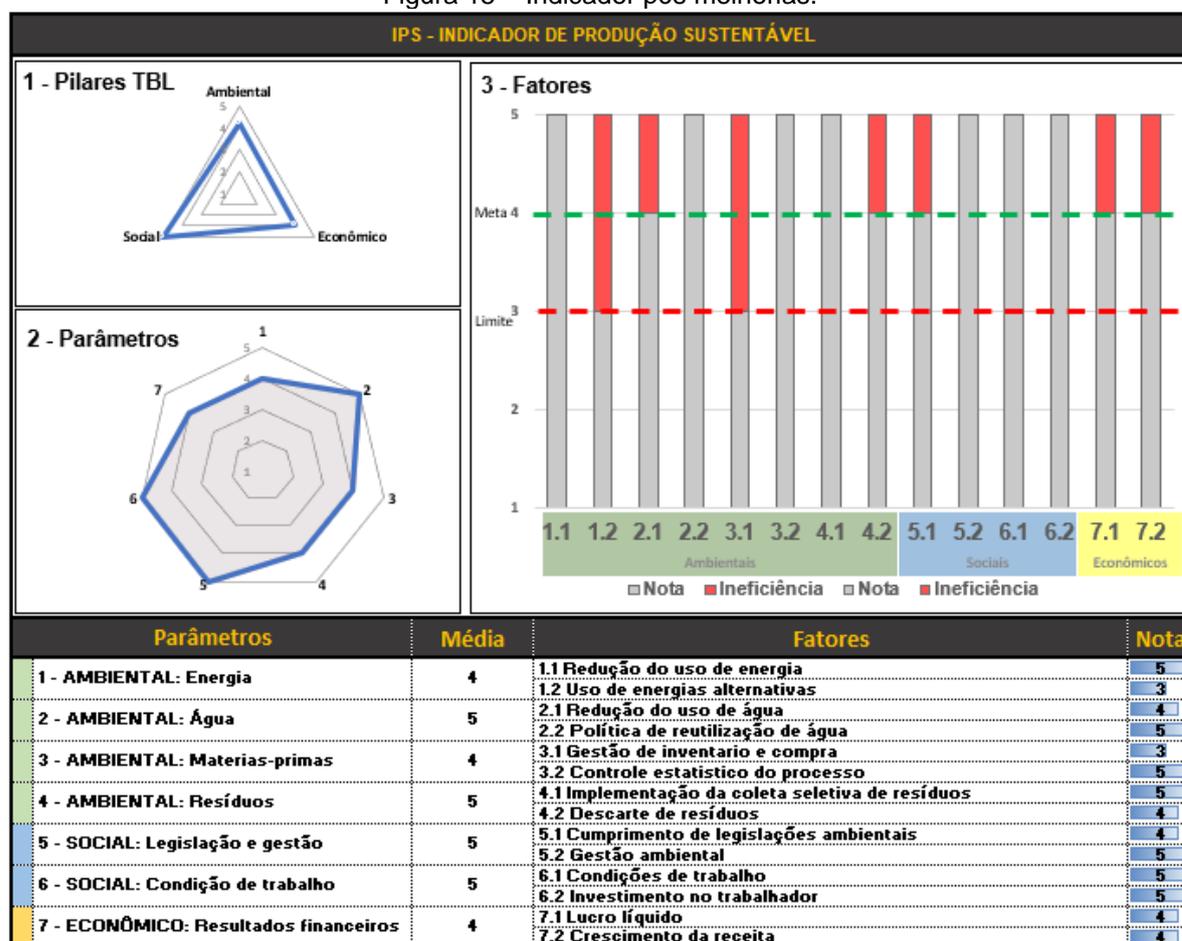
Primeiramente, com foco no fator 4.2, ponto de maior ineficiência do IPS, uma vez que havia alto volume de resíduos de produção destinados a aterros sem prévia análise de reuso, passou-se a aplicar a ferramenta EVSM. Essa aplicação trouxe contribuições para a teoria por meio da validação da ferramenta na prática, possibilitando a identificação dos impactos ambientais no fluxo de produção além da quantificação e o direcionamento das causas raízes de ineficiências (KURDVE *et al.* 2015; BAIT *et al.* 2020; MÜLLER; SCHILLIG; STOCK; SCHMEILER. 2014).

Após identificar as principais fontes geradoras de resíduos e classificá-los, observou-se a oportunidade de aplicar pesquisa operacional-PO para reutilizar parte do material descartado. Utilizando o método de pesquisa operacional “Problema de misturas” (CHAOUCH; BEM; KULKARNI, 2015; PROIETTI; REGNI; CALISTI, 2020; MOUSSA, 2021) buscou-se formular um modelo matemático específico com dois objetivos, primeiramente utilizar parte do material destinado a aterro na composição, uma vez que após análise laboratorial identificou-o como apto para isso e a redução do uso de materiais nocivos ao meio ambiente na composição do material de atrito.

Com a utilização do material gerado através da modelagem matemática e validado através das análises estatísticas (MONTGOMERY, 2000; HAIR *et al.* 2009; BROOK, 2017) a empresa passará a remanufaturar 240 toneladas ao ano de materiais antes considerados resíduos. O material gerado pelo modelo propiciou a diminuição do índice de materiais críticos utilizados nos produtos de 24,2% para 17,41%, portanto, menos 63 toneladas desses materiais críticos no meio ambiente. Além disso, o material gerado proporcionou uma redução de custo total no material de atrito em 4% confirmando na prática que o uso de PO é importante para o campo gestão de operações (KOMIJAN; ARYANEZHAD, 2013; GUO, 2014; CHAOUCH; BEM; KULKARNI, 2015; PROIETTI; REGNI; CALISTI, 2020; MOUSSA, 2021). No fator 4.2 do Indicador IPS, com a adoção do material gerado pelo modelo e executado no GAMS a empresa passará a remanufaturar parte do resíduo e continuará a descartar de maneira correta o restante, permitindo sair de nota três para nota quatro.

Quanto ao fator 3.2 do indicador IPS, com a implementação das melhorias geradas pela pesquisa-ação a empresa pôde sair de nota três, para nota máxima, cinco. Foi possível com isso confirmar a teoria de elaboração de DOE's quanto a importancia da identificação das variáveis que impactam nos resultados (GHANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; HASSAN, H, 2004). O DOE direcionou a utilizar o processo de prensagem com pressão e numero de ciclos no máximo e temperatura no mínimo, para alcançar melhor desempenho no teste de compressibilidade, validando a literatura especializada na produção de pastilhas de freio, onde afirma que são esses os fatores determinantes para que os produtos atendam as especificações desse teste (BREZOLIN, 2007; PANDOLFO, 2006; PEROTTONI; MENETRIER; MATTÉ, 2018).

Figura 15 – Indicador pós melhorias.



Fonte: Do autor, 2022.

Desta forma, respondendo à questão de pesquisa Q2- A partir do direcionamento dado por métricas, é possível a mitigação dos impactos

**ambientais na produção de materiais de fricção?** após aplicar as melhorias supracitadas e colocar os resultados no indicador IPS (figura 15), percebeu-se o avanço em relação a primeira aplicação. Avaliando o primeiro e o segundo gráfico de radar nenhum dos parâmetros teve média inferior a três, atingindo assim as metas mínimas propostas. Desta forma, validando que sim, é possível a mitigação dos impactos após ter o direcionamento por métricas, ainda corroborando com Jolliet *et al.* (2018) que advogam sobre a importância de ter métricas alcançáveis para os indicadores criados a fim direcionar a organização quanto aos pontos de melhoria ou da manutenção dos resultados.

## 5 CONCLUSÕES

No contexto da indústria de materiais de fricção, extremamente nociva ao meio ambiente, existem na literatura diversas publicações alertando sobre seus impactos ambientais e outras visando mitigar esses impactos durante a vida útil de pastilhas de freio por meio da redução de matérias primas críticas, contudo, carecem estudos que abordem de maneira ampla os impactos ambientais durante os processos produtivos.

Através da questão de pesquisa Q1, foi realizada uma revisão sistemática da literatura-RSL para primeiramente entender como avaliar a sustentabilidade em organizações manufatureiras. Durante a RSL concluiu-se que existe uma lacuna quanto a validade externa dos indicadores de sustentabilidade existentes. Embora de maneira geral os indicadores de sustentabilidade avaliem fatores como o econômico, o ambiental e o social, os parâmetros desses, devido as especificidades das indústrias, limitam a aplicação em outros contextos.

Com isso o objetivo geral da pesquisa foi definido, a saber, a proposição de um indicador de sustentabilidade para monitoramento e direcionamento à mitigação dos impactos ambientais na produção de materiais de fricção. Esse objetivo foi alcançado a partir da análise de conteúdo da RSL, adaptando-se um indicador de sustentabilidade ao contexto da indústria de materiais de fricção. O indicador proposto (IPS) avalia a sustentabilidade através de sete parâmetros e quatorze fatores, permitindo uma visão aprofundada da sustentabilidade a nível empresarial.

A partir do IPS, direcionado pela questão de pesquisa Q2, conduziu-se uma pesquisa-ação em uma organização produtora de pastilhas de freio. Essa aplicação permitiu a validação da eficácia do IPS, concluindo-se que sim, a partir de métricas é possível alcançar um maior nível de sustentabilidade. O IPS direcionou quanto aos pontos críticos do processo produtivo e, com isso, através de modelagem matemática e técnicas estatísticas aprimorou-se o produto da empresa e o processo de produção, conforme descrito no tópico de discussão dos resultados.

Entende-se como limitação dessa pesquisa ter sido aplicado o indicador em apenas uma organização, portanto para futuras pesquisas recomenda-se a avaliação do IPS a partir estudos de caso múltiplos em produtoras de material de fricção a fim de verificar o desempenho de diversas empresas e entender melhor a questão da sustentabilidade neste contexto específico. Com isso será possível criar estratégias e modelos para minimizar os impactos além disso promover maior entendimento sobre o tema, de forma que as organizações e a sociedade como um todo se beneficiem.

## REFERÊNCIAS

- ABEDINI, A. *et al.* **A metric-based framework for sustainable production scheduling.** *Journal of Manufacturing Systems*, v. 54, n. May 2019, p. 174–185, 2020.
- ABU-ALLABAN, M. *et al.* **Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles.** *Atmospheric Environment*, v. 37, n. 37, p. 5283–5293, 2003.
- ABUBAKR, M.; ABBAS, A.; TOMAZ, I.; SOLIMAN, M.; LUQMAN, M.; HEGAB, H. **Sustainable and Smart Manufacturing: An Integrated Approach.** *Sustainability*. V.12, P. N.I., 2020.
- AGRAWAL, M.; MURKHERJEE, A. **World air particulate matter: sources, distribution and health effects.** *Environ Chem Lett*. V.12, P. N.I., 2017.
- ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Séries históricas.** Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br//estatisticas>> Acesso em: 01 set. 2021.
- ANTONY, J; REYES, J. A.; LIM, M.; KUMAR, V. **Interventions for delivering the triple-bottom-line.** *Production Planning & Control*. V.30, n.5, p.347-352, 2019.
- ANTONY, Jiju. **Six Sigma vs Lean: Some perspectives from leading academics and practitioners.** *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 60 Iss: 2, pp.185 – 190, 2011.
- ARAVOSSIS, K. G. *et al.* **Development of a holistic assessment framework for industrial organizations.** *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 14, p. 1–24, 2019.
- ARYANEZHAD, M. B.; KOMIJAN, A. R. **An improved algorithm for optimizing product mix under the theory of constraints.** *International Journal of Production Research*, v. 42, n. 20, p. 4221–4233, 2004.
- AZAPAGIC, A. *et al.* **Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs).** *Computers and Chemical Engineering*, v. 91, p. 93–103, 2016.

BAIT, S.; DI PIETRO, A.; SCHIRALDI, M. M. **Waste reduction in production processes through simulation and VSM**. Sustainability (Switzerland), v. 12, n. 8, 2020.

BARMPADIMOS, I., HUEGLIN, C., KELLER, J., HENNE, S., AND PRÉVÔT, A. S. H.: **Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008**, Atmos. Chem. Phys., 11, 1813–1835, 2011.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J. **Operations Management Research Methodologies Using Quantitative Modeling**. International Journal of Operations & Production Management, 22, 241-264, 2002.

BHANOT, N. *et al.* **An integrated decision-making approach for cause-and-effect analysis of sustainable manufacturing indicators**. Sustainability (Switzerland), v. 12, n. 4, p. 1–20, 2020.

BHATT, B. *et al.* **Tribology International Fe – Al alloy for eco-friendly copper-free brake-pads**. v. 163, n. March, 2021.

BIENGE, K.; Buhl, J.; LIEDTKE, C.; TEUBLER, J.; SCHMIDT, N. **Measure or Management? Resource Use Indicators for Policymakers Based on Microdata by Households**. Sustainability. V.10, P. N.I., 2018.

BIJWE, J. *et al.* **Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials**. Wear, v. 259, n. 7–12, p. 1068–1078, 2005.

BLANC, S. *et al.* **Use of bio-based plastics in the fruit supply chain: An integrated approach to assess environmental, economic, and social sustainability**. Sustainability (Switzerland), v. 11, n. 9, 2019.

BOURDIEU, P. **Sociology of Science**. The Politics of Method in the Human Sciences, p. 451–469, 1975.

BRADBURY, H.; DRAPER, P.; DRAPER, P. **Media Reviews**. Journal of Substance Use, v. 6, n. 4, p. 293–296, 2001.

BREZOLIN, A. **Estudo de Geração de Trincas Térmicas em Discos de Freios de Veículos Comerciais**. Dissertação de mestrado, 2007;

BROOK, Q. **Lean Six Sigma & Minitab** - 5ª. ed. OPEX Resources Ltd., 2017.

BUHL, J. *et al.* **Measure or management? Resource use indicators for policymakers based on microdata by households.** Sustainability (Switzerland), v. 10, n. 12, 2018.

CACHO, P; GÓRECKI, J.; MORENO, V.; IGLESIAS, F. **What Gets Measured, Gets Done: Development of a Circular Economy Measurement Scale for Building Industry.** Sustainability. V.10, P. N.I., 2018.

CALISTI, R.; REGNI, L.; PROIETTI, P. **Compost-recipe: A new calculation model and a novel software tool to make the composting mixture.** Journal of Cleaner Production, v. 270, p. 122427, 2020.

CARMELI, A.; FREUND, A. **Work Commitment, Job Satisfaction, and Job Performance: An Empirical Investigation.** International Journal of Organization Theory and Behavior, 3, 289-390, (2004).

CEPTUREANU, E. G. *et al.* **Impact of competitive capabilities on sustainable manufacturing applications in Romanian SMEs from the textile industry.** Sustainability (Switzerland), v. 10, n. 4, 2018.

CHEN, P. K. *et al.* **Sustainable manufacturing: Exploring antecedents and influence of Total Productive Maintenance and lean manufacturing.** Advances in Mechanical Engineering, v. 11, n. 11, p. 1–16, 2019.

CHERRAFI, A. *et al.* **A framework for the integration of Green and Lean Six Sigma for superior sustainability performance.** International Journal of Production Research, v. 55, n. 15, p. 4481–4515, 2017.

CHUKALLA, A. D. *et al.* **Balancing indicators for sustainable intensification of crop production at field and river basin levels.** Science of the Total Environment, v. 705, p. 135925, 2020.

CLARK, O. A. C.; CASTRO, A. A. **A pesquisa.** Pesquisa Odontológica Brasileira, v. 17, n. suppl 1, p. 67–69, 2003.

COCHRAN, D. S. *et al.* **Extension of Manufacturing System Design Decomposition to Implement Manufacturing Systems That are Sustainable.** Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 138,

n. 10, p. 1–10, 2016.

COCHRAN, W. **Sampling Techniques** 3<sup>a</sup> ed., New York: John Wiley and Sons. 1977.

CORONADO, R. B.; ANTONY, F. **Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations**. TQM Magazine, v. 14, n. 2, p. 92–99, 2002.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. **Action research for operations management**. International Journal of Operations and Production Management, v. 22, n. 2, p. 220–240, 2002.

COULIBALY, A. *et al.* **Case Studies in Thermal Engineering Use of thermoelectric generators to harvest energy from motor vehicle brake discs**. v. 28, n. February, 2021.

DESPEISSE, M. *et al.* **Industrial ecology at factory level: A prototype methodology**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture, v. 226, n. 10, p. 1648–1664, 2012.

DEWULF, J. *et al.* **Toward an Overall Analytical Framework for the Integrated Sustainability Assessment of the Production and Supply of Raw Materials and Primary Energy Carriers**. Journal of Industrial Ecology, v. 19, n. 6, p. 963–977, 2015.

DEY, P. K.; BHATTACHARYA, A.; HO, W. **Strategic supplier performance evaluation: A case-based action research of a UK manufacturing organisation**. International Journal of Production Economics, v. 166, p. 192–214, 2015.

ECHA – EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Legislation**. Disponível em: < <https://www.echa.europa.eu/legislation> > Acesso em: 01 set. 2021.

ELHUNI, R. M.; AHMAD, M. M. **Key Performance Indicators for Sustainable Production Evaluation in Oil and Gas Sector**. Procedia Manufacturing, v. 11, n. June, p. 718–724, 2017.

ELKINGTON, J. **Partnerships from Cannibals with Forks: The Triple bottom line of 21 Century Business**. *Environmental Quality Management*, V.8, P. 37-51, 1998.

ENTEZAMINIA, A.; HEYDARI, M.; RAHMANI, D. **A multi-objective model for multi-product multi-site aggregate production planning in a green supply chain:**

**Considering collection and recycling centers.** Journal of Manufacturing Systems, v. 40, p. 63–75, 2016.

EPA – AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. **Particulate matter (pm) basics.** Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>> Acesso em: 01 set. 2021.

EVANS, S.; PARTIDÁRIO, P. J.; LAMBERT, J. **Industrialization as a key element of sustainable product-service solutions.** International Journal of Production Research, v. 45, n. 18–19, p. 4225–4246, 2007.

FATIMAH, Y. A. *et al.* **Sustainable manufacturing for Indonesian small- and medium-sized enterprises (SMEs): the case of remanufactured alternators.** Journal of Remanufacturing, v. 3, n. 1, p. 1–11, 2013.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. **Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance.** Journal of Cleaner Production, v. 85, p. 8–18, 2014.

GARETTI, M.; TAISCH, M. **Sustainable manufacturing: trends and research challenges** Production Planning & Control. Taylor & Francis, n. June 2013, p. 37–41, 2012.

GASSER, M. *et al.* **Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells in vitro.** Particle and Fibre Toxicology, v. 6, n. 1, p. 1–13, 2009.

GEHRIG, R. *et al.* **Separate determination of PM10 emission factors of road traffic for tailpipe emissions and emissions from abrasion and resuspension processes.** International Journal of Environment and Pollution, v. 22, n. 3, p. 312–325, 2004.

GIANINI, R. *et al.* **Chemical composition of PM10 in Switzerland: An analysis for 2008/2009 and changes since 1998/1999.** Atmospheric Environment, v.54 , p. 97–106, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa** – 6ª. ed. - São Paulo: Atlas, 2008.

GARG, B. D. *et al.* **Brake wear particulate matter emissions.** Environmental Science and Technology, v. 34, n. 21, p. 4463–4469, 2000.

GHANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; HASSAN, H.H. **Application of Taguchi Method in the Optimization of End Milling Operations.** Journal of Material Processing Technology, 145, 84-92, 2004.

GUNASEKARAN, A.; SPALANZANI, A. **Sustainability of manufacturing and services: Investigations for research and applications.** International Journal of Production Economics, v. 140, n. 1, p. 35–47, 2012.

GUNDUZ, M.; NASER, A. F. **Cost based Value Stream Mapping as a sustainable construction tool for underground pipeline construction projects.** Sustainability (Switzerland), v. 9, n. 12, 2017.

HAGINO, H.; OYAMA, M.; SASAKI, S. **Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles.** Atmospheric Environment, v. 131, p. 269–278, 2016.

HAIR, J.; BLACK, W.; BABIN, B.; ANDERSON, R.; TATHAM, R. **Análise Multivariada de Dados – 6ª.** Ed. Pearson Education, Inc., 2009.

HO, F. H. *et al.* **Resources sustainability through material efficiency strategies: An insight study of electrical and electronic companies.** Resources, v. 8, n. 2, 2019.

HOFSTETTER, P.; MADJAR, M.; OZAWA, T. **Happiness and sustainable consumption: Psychological and physical rebound effects at work in a tool for sustainable design.** International Journal of Life Cycle Assessment, v. 11, n. SPEC. ISS. 1, p. 105–115, 2006.

HUANGA, A.; BADURDEENA, F. **Sustainable Manufacturing Performance Evaluation: Integrating Product and Process Metrics for Systems Level Assessment.** Procedia Manufacturing. V. 8, P. 563-570, 2017.

HULSKOTTE, J. H. J. *et al.* **Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution.** Water Science and Technology, v. 56, n. 1, p. 223–231, 2007.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE. **Acesso à informação.** Disponível em: < <https://www.gov.br/ibama/pt-br/acesso-a-informacao>> Acesso em: 01 set. 2021.

IKEZIRI, Lucas Martins *et al.* **Theory of constraints: review and bibliometric analysis.** International J. of Production Research, v. 57, n. 15-16, p. 5068-5102, 2019.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Legislação.** Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/>> Acesso em: 01 set. 2021.

JAYAL, A. D., BADURDEEN, F., DILLON, O. W., JAWAHIR, I. S. **Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels.** Journal Of Manufacturing Science And Technology. v2 144-152, 2010.

JEONG, H.; RA, K. **Multi-isotope signatures (Cu, Zn, Pb) of different particle sizes in road-deposited sediments: a case study from industrial área.** Journal of Analytical Science and Technology, 2021.

JOLLIET, O.; ANTÓN, A.; BOULAY, A.; CHERUBINI, F.; FANTKE, P. **Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicator impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use.** The International Journal of Life Cycle Assessment. V. 23. N.11, P. 2189-2207, 2018.

JOO, B. S. *et al.* **The effect of the mechanical property and size of the surface contacts of the brake lining on friction instability.** Tribology International, v. 153, n. March 2020, p. 106583, 2021.

JUNSHENG, H. *et al.* **The mediating role of employees' green motivation between exploratory factors and green behaviour in the malaysian food industry.** Sustainability (Switzerland), v. 12, n. 2, 2020.

KATSOUYANNI, K. *et al.* **Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project.** Epidemiology, v. 12, n. 5, p. 521–531, 2001.

KULKARNI, A. J.; BAKI, M. F.; CHAOUCH, B. A. **Application of the cohort-intelligence optimization method to three selected combinatorial optimization problems.** European Journal of Operational Research, v. 250, n. 2, p. 427–447, 2016.

KUMAR, M.; KUMAR, A. **Thermomechanical analysis of hybrid friction composite material and its correlation with friction braking performance.** International Journal of Polymer Analysis and Characterization, v. 25, n. 2, p. 65–81, 2020.

KURDVE, M. *et al.* **Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: A case study approach.** Journal of Cleaner Production, v. 98, p. 304–315, 2015.

KUSWANDI, R. Y.; YANUAR RIDWAN, A.; EL HADI, R. M. **Development of monitoring reverse logistic system for leather tanning industry using scor model.** Proceeding of 2018 12th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications, TSSA 2018, 2018.

LAYTON, A.; BRAS, B.; WEISSBURG, M. **Ecological Principles and Metrics for Improving Material Cycling Structures in Manufacturing Networks.** Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 138, n. 10, p. 1–12, 2016.

LEE, G. B.; BADRUL, O. **Optimization for sustainable manufacturing based on axiomatic design principles: a case study of machining processes.** Advances in Production Engineering & Management, v. 9, n. 1, p. 31–43, 2014.

LEHMANN, L. M. *et al.* **Productivity and economic evaluation of agroforestry systems for sustainable production of food and non-food products.** Sustainability (Switzerland), v. 12, n. 13, p. 1–9, 2020.

LI, M.; GUO, P. **A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties.** Applied Mathematical Modelling, v. 38, n. 19–20, p. 4897–4911, 2014.

MACCARTHY, B.L. & FERNANDES, F.C. **A multidimensional Classification of Production Systems for the Design and Selection of Production Planning and Control Systems.** Production Planning & Control, v.11, n.5, 2000.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 5ª ed. São Paulo, Atlas, 2003.

MATTÉ, D.; MENETRIER, A.; PEROTTONIM C. **Aplicação de planejamento experimental na otimização do processo de pós-cura de pastilhas de freio em forno contínuo**. *Scientia cum Industria*, Vol 6, N. 1, 2018.

MATTHEWS, N.; STAMFORD, L.; SHAPIRA, P. **Aligning sustainability assessment with responsible research and innovation: Towards a framework for Constructive Sustainability Assessment**. *Sustainable Production and Consumption*. V.20, P. 58–73, 2019.

MIDDEL, R. *et al.* **Action research in collaborative improvement**. *International Journal of Technology Management*, v. 33, n. 1, p. 67–91, 2006.

MILLER, G.; PAWLOSKI, J.; STANDRIDGE, C. **A case study of lean, sustainable manufacturing**. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 3, n. 1, p. 11–32, 2010.

MOLDAVSKA, A; WELO, T. **Testing and Verification of a New Corporate Sustainability Assessment Method for Manufacturing: A Multiple Case Research Study**. *Sustainability*. V.10, n. 11, 2018.

MOLDAVSKA, A.; WELO, T. **A Holistic approach to corporate sustainability assessment: Incorporating sustainable development goals into sustainable manufacturing performance evaluation**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 50, n. November 2017, p. 53–68, 2019.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 4. Ed. - John Wiley and Sons, 2000.

MOUSSA, A. **Textile color formulation using linear programming based on Kubelka-Munk and Duncan theories**. *Color Research and Application*, v. 46, n. 5, p. 1046–1056, 2021.

MÜLLER, E. *et al.* **Improvement of injection moulding processes by using dual energy signatures**. *Procedia CIRP*, v. 17, n. Imm, p. 704–709, 2014.

MUNIR, S. **Analysing Temporal Trends in the Ratios of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> in the UK.** *Aerosol and Air Quality Research*, 17: 34–48, 2017.

NOGUEIRA, A. P. G. *et al.* **Sliding Behavior and Particle Emissions of Cu-Free Friction Materials with Different Contents of Phenolic Resin.** *Tribology Transactions*, v. 63, n. 4, p. 770–779, 2020.

NUÑEZ-CACHO, P. *et al.* **What gets measured, gets done: Development of a Circular Economy measurement scale for building industry.** *Sustainability (Switzerland)*, v. 10, n. 7, 2018.

ODS – OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/>> Acesso em: 01 set. 2021.

OLBA-ZIĘTY, E. *et al.* **Environmental external cost of poplar wood chips sustainable production.** *Journal of Cleaner Production*, v. 252, 2020.

PAGONE, E.; SALONITIS, K.; JOLLY, M. **Automatically weighted high-resolution mapping of multi-criteria decision analysis for sustainable manufacturing systems.** *Journal of Cleaner Production*, v. 257, p. 120272, 2020.

PANT, P.; HARRISON, R. M. **Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review.** *Atmospheric Environment*, v. 77, p. 78–97, 2013.

PANDOLFO, F. **Análise modal de materiais compósitos.** Dissertação de mestrado, 2006.

PARK, J.; JUNG, D.; LEE, P. **How to make a sustainable manufacturing process: A high-commitment HRM system.** *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 8, 2019.

PARK, K. T.; LEE, D.; NOH, S. DO. **Operation Procedures of a Work-Center-Level Digital Twin for Sustainable and Smart Manufacturing.** *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, v. 7, n. 3, p. 791–814, 2020.

PIPAL, P.; GURSUMEERAN, S. **Study of carbonaceous species, morphology and**

**sources of fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse (PM<sub>10</sub>) particles along with their climatic nature in India.** *Atmospheric Environment*, v. 154, n. n.i., p. 103-115, 2015.

PLANNING, P. **Interventions for delivering the triple-bottom-line.** *Production Planning and Control*, v. 30, n. 5–6, p. 347–352, 2019.

PORTER, Michael; **Competição: Estratégias Competitivas Essenciais.** 9a edição, Rio de Janeiro, 1999.

PRASHAR, A. **Eco-efficient production for industrial small and medium-sized enterprises through energy optimisation: framework and evaluation.** *Production Planning and Control*, v. 32, n. 3, p. 198–212, 2021.

QI, W. *et al.* **Corporate governance-based strategic approach to sustainability in energy industry of emerging economies with a novel interval-valued intuitionistic fuzzy hybrid decision-making model.** *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 8, p. 1–19, 2020.

QURESHI, M. I. *et al.* **Modeling work practices under socio-technical systems for sustainable manufacturing performance.** *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 16, p. 1–19, 2019.

RAOUFI, K. *et al.* **Enabling Non-expert Sustainable Manufacturing Process and Supply Chain Analysis During the Early Product Design Phase.** *Procedia Manufacturing*, v. 10, p. 1097–1108, 2017.

ROSEN, M. A.; KISHAWY, H. A. **Sustainable manufacturing and design: Concepts, practices and needs.** *Sustainability*, v. 4, n. 2, p. 154–174, 2012.

ROSLAN, A. H.; ABD KARIM, S. F.; HAMZAH, N. **Performance analysis of different tuning rules for an isothermal CSTR using integrated EPC and SPC.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 334, n. 1, 2018.

SAARI, L. M.; JUDGE, T. A. **Employee attitudes and job satisfaction.** *Human Resource Management*, v. 43, n. 4, p. 395–407, 2004.

SAJA, A.; JIJU, A.; LIM, S. A. HALIM. **A systematic review of Lean Six Sigma for the manufacturing industry.** *Business Process Management Journal*, v. 21, n. 3, p.

665–691, 2013.

SALA, S.; FARIOLI, F.; ZAMAGNI, A. **Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2)**. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 9, p. 1686–1697, 2013.

SALIM, H. K. *et al.* **Global trends in environmental management system and ISO14001 research**. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 645–653, 2018.

SENGE, P. M.; STERMAN, J. D. **Systems Thinking and Organizational Learning - Acting Locally and Thinking Globally in the Organization of the Future** *Transforming Organizations*, v. 59, p. 353–371, 1992.

SEO, H. *et al.* **Effect of disc materials on brake emission during moderate-temperature braking**. *Tribology International*, v. 163, n. May, 2021.

SHAHBAZI, S. *et al.* **Comparison of Four Environmental Assessment Tools in Swedish Manufacturing: A Case Study**. *Sustainability*, v. 11, n. 7, p. 2173, 2019.

SILVA, B. B. *et al.* **Critical success factors of Six Sigma implementations in companies in Brazil**. *International Journal of Lean Six Sigma*, v. 10, n. 1, p. 143–160, 2019.

SINGH, S.; OLUGU, E. U.; FALLAHPOUR, A. **Fuzzy-based sustainable manufacturing assessment model for SMEs**. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 16, n. 5, p. 847–860, 2014.

SINHA, A. *et al.* **Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials**. *Atmosphere*, v. 11, n. 10, 2020.

SMITH, L; BALL, P. **Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows**. *International Journal of Production Economics*, V. 140, Issue 1, P. 227–238, 2012.

SOFER, T. *et al.* **Exposure to airborne particulate matter is associated with methylation pattern in the asthma pathway**. *Future Medicine*, V. 5, Issue 2, P. 147–154, 2013.

STERLE, W. *et al.* **On the role of copper in brake friction materials.** *Tribology International*, v. 43, n. 12, p. 2317–2326, 2010.

STRAFFELINI, G. *et al.* **Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment.** *Environmental Pollution*, v. 207, n. 2015, p. 211–219, 2015.

SUBHARAJ, C.; NATARAJAN, U.; HYACINTH SUGANTHI, X. **Sustainable eco-design for fixture index mechanism in crankshaft speed sensor assembly line.** *Advances in Mechanical Engineering*, v. 11, n. 7, p. 1–12, 2019.

SUBIC, A. *et al.* **Capability framework for sustainable manufacturing of sports apparel and footwear.** *Sustainability*, v. 4, n. 9, p. 2127–2145, 2012.

SUBIC, A.; SHABANI, R.; HEDAYATI, M.; CROSSIN, E. **Performance Analysis of the Capability Assessment Tool for Sustainable Manufacturing.** *Sustainability*. V.5, P. 3543-3561, 2013.

SUNDARAKANI, B.; AJAYKUMAR, A.; GUNASEKARAN, A. **Big data driven supply chain design and applications for blockchain: An action research using case study approach.** *Omega (United Kingdom)*, v. 102, 2021.

SUTTHICHAIMETHEE, P. *et al.* **Environmental problems indicator under environmental modeling toward sustainable development.** *Global Journal of Environmental Science and Management*, v. 1, n. 4, p. 325–332, 2015.

SWARNAKAR, V. *et al.* **Development of a conceptual method for sustainability assessment in manufacturing.** *Computers and Industrial Engineering*, v. 158, n. November 2020, p. 107403, 2021.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. **Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic rw.** *British Journal of Management* v. 14, p. 207–222, 2003.

TRAVAGLIA, C. A. P.; LOPES, L. C. R. **Friction Material Temperature Distribution and Thermal and Mechanical Contact Stress Analysis.** *Engineering*, v. 06, n. 13, p. 1017–1036, 2014.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, p. 191, 2012.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. **Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer**. *Scientometrics*, v. 111, n. 2, p. 1053-1070, 2018.

VELENTURF, A. P. M.; PURNELL, P. **Resource recovery from waste: Restoring the balance between resource scarcity and waste overload**. *Sustainability (Switzerland)*, v. 9, n. 9, 2017.

VINODH, S.; JEYA GIRUBHA, R. **PROMETHEE based sustainable concept selection**. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 11, p. 5301–5308, 2012.

VISSCHEDIJK, A. **A high resolution gridded European emission database for the EU integrated project GEMS**. TNO, Apeldoorn, 2007.

VASHISHTH, A.; CHAKRABORTY, A.; ANTONY, J. **Lean Six Sigma in financial services industry: a systematic review and agenda for future research**. *Total Quality Management and Business Excellence*, v. 30, n. 3–4, p. 447–465, 2019.

VOGEL, T.; ALMADA-LOBO, B.; ALMEDER, C. **Integrated versus hierarchical approach to aggregate production planning and master production scheduling**. *OR Spectrum*, v. 39, n. 1, p. 193–229, 2017.

WAHLSTRÖM, J. **A study of airborne wear particles from automotive disc brakes**. The Royal Institute of Technology, Flodissalen (F3), Lindstedtsvägen 26, Stockholm, on May 27, 2011.

WANG, Y. X. *et al.* **Potentials for improvement of resource efficiency in printed circuit board manufacturing: A case study based on material flow cost accounting**. *Sustainability (Switzerland)*, v. 9, n. 6, 2017.

WATANABE, E. H. *et al.* **A Framework to Evaluate the Performance of a New Industrial Business Model**. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 31, p. 61–66, 2016.

WEI, L. *et al.* **Comparison of tribology performance, particle emissions and brake squeal noise between Cu-containing and Cu-free brake materials**. *Wear*, v. 466–467, n. December 2020, p. 203577, 2021.

WEI, L.; CHOY, Y. S.; CHEUNG, C. S. **A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces.** Tribology International, v. 138, n. May, p. 99–110, 2019a.

WEISS, M. *et al.* **Applying distance-to-target weighing methodology to evaluate the environmental performance of bio-based energy, fuels, and materials.** Resources, Conservation and Recycling, v. 50, n. 3, p. 260–281, 2007.

WOOLURU, Y.; SWAMY, D. R.; NAGESH, P. **The process capability analysis - A tool for process performance measures and metrics - A case study.** International Journal for Quality Research, v. 8, n. 3, p. 399–416, 2014.

WRIGHT, T.A.; CROPANZANO, R.; DENNEY, P.J.; MOLINE, G.L. **When a Happy Worker is a Productive Worker: A Preliminary Examination of Three Models.** Canadian Journal of Behavioural Science, V. 34, 146 – 150, 2002.

YANG, Z. *et al.* **Crystallization behavior of poly( $\epsilon$ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites.** Journal of Applied Polymer Science, v. 116, n. 5, p. 2658–2667, 2010.

YAZDI, P. G.; AZIZI, A.; HASHEMIPOUR, M. **An empirical investigation of the relationship between overall equipment efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach.** Sustainability (Switzerland), v. 10, n. 9, 2018.

ZHOU, Z. *et al.* **Sustainable production line evaluation based on evidential reasoning.** Sustainability (Switzerland), v. 9, n. 10, 2017.