

**UNIVERSIDADE PAULISTA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MAPEAMENTO DO  
FLUXO DE VALOR COM FOCO NA SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

**EUCLIDES SERAFIM SILVA**

**SÃO PAULO**  
**2024**

**UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MAPEAMENTO DO  
FLUXO DE VALOR COM FOCO NA SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

**Orientador:** Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho

**Área de concentração:** Sustentabilidade em Sistemas de Produção

**Linha de Pesquisa:** Avanços em produção mais limpa e economia circular

**Projeto de Pesquisa:** Economia circular e sustentabilidade para a competitividade: gestão baseada em valoração sistêmica

**EUCLIDES SERAFIM SILVA**

**SÃO PAULO**

**2024**

Silva, Euclides Serafim.

Proposição e aplicação de um mapeamento do fluxo de valor com foco na sustentabilidade / Euclides Serafim Silva. – 2024. 165 f. : il. + CD-ROM.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2024.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho.

1. Avaliação Multicritério. 2. Manufatura Sustentável. 3. Mapeamento do Fluxo de Valor. 4. 5SEnSU. I. Agostinho, Feni Dalano Roosevelt (orientador). II. Título.

**EUCLIDES SERAFIM SILVA**

**PROPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MAPEAMENTO DO  
FLUXO DE VALOR COM FOCO NA SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Aprovado em: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Orientador Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho  
Universidade Paulista – UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Biagio Fernando Giannetti  
Universidade Paulista – UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Cecília Maria Villas Boas de Almeida  
Universidade Paulista – UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Walter Cardoso Sátyro  
Universidade Nove de Julho - UNINOVE

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Luis Helleno  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

## DEDICATÓRIA

À minha esposa Lilian, pelo apoio.  
Ao meu filho André, pelo incentivo e  
pela amizade.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Feni Agostinho que, com extrema maestria, competência, dedicação e elegância me orientou para o avanço deste trabalho de pesquisa.

À minha esposa Lilian, pela compreensão e apoio durante todo o tempo da minha dedicação ao curso, e ao meu filho André, um grande amigo com quem sempre compartilho meus desafios e me inspira e encoraja para enfrentá-los.

Aos meus pais, Antônio Serafim e Maria Alcina Silva (in memoriam), pela educação, pelo suporte sempre com amor e carinho, ingredientes fundamentais em minha trajetória de vida, possibilitando mais esta vitória como parte importante das minhas realizações.

À Professora Cecília Maria Villas Boas de Almeida, aos Professores Biagio Fernando Giannetti e Fábio Savegnani pelas discussões, valiosas sugestões e direcionamentos, buscando sempre o aprimoramento e a qualidade das informações para este estudo.

A todo o time de suporte da UNIP, pela valiosa atenção, e aos colegas de cursos pela oportunidade de um convívio valioso, compartilhamento de experiências e pela importante contribuição com sugestões valiosas durante os encontros nas aulas, sem deixar de incluir nossos valiosos momentos de descontração e integração durante os nossos almoços e habituais cafezinhos.

Aos membros da banca dos exames de qualificação e defesa desta tese: Prof. Feni Agostinho, Prof. Biagio Giannetti, Profa. Cecilia Almeida, Prof. Valter Sátyro e Prof. Luis Heleno, pelas valiosas observações e sugestões oferecidas, possibilitando que este trabalho fosse concluído da forma mais consistente possível.

Ao apoio institucional da Vice-Reitoria de Pós-graduação da Universidade Paulista (UNIP), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (CAPES), pela bolsa de estudos.

## RESUMO

Diante da crescente demanda por recursos naturais para geração de produtos industriais e diluição de resíduos, tornou-se importante incorporar propostas com projetos de melhoria, considerando não apenas os aspectos econômicos, mas também os aspectos ambientais e sociais através da otimização de processos na manufatura. Além de outras possibilidades, a inclusão de aspectos de sustentabilidade, durante o mapeamento de processos é muito importante do ponto de vista estratégico, uma vez que o Value Stream Mapping (VSM) tradicional já é uma ferramenta difundida e utilizada mundialmente em empresas de manufatura. Embora existam tentativas de incluir aspectos de sustentabilidade no VSM, a maioria não considera de forma integrada os capitais econômico, social e ambiental, além de não apresentar modelos conceituais de sustentabilidade epistemologicamente enraizados, para sustentar a escolha de indicadores, discussões e decisões. O objetivo deste estudo é propor o Value Stream Mapping for Sustainability (VSM4S), uma ferramenta que combina as vantagens do VSM tradicional com a inclusão de aspectos de sustentabilidade, baseados no modelo de sustentabilidade dos cinco setores (5SEnSU) e seu indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS). Baseando-se no cenário atual com resultados alcançados até o momento define-se o VSM "estado atual", e por meio das metas estratégicas definidas para o próximo período, uma equipe interna de especialistas de diferentes áreas do conhecimento da empresa realiza as análises necessárias, para a elaboração do VSM4S "estado futuro". Por meio da aplicação do modelo 5SEnSU, utilizando a filosofia da programação por metas como método multicritério, uma equipe de especialistas pode apresentar diferentes planos de projetos Kaizen. Como resultado do VSM4S aplicado aos diferentes cenários de projetos Kaizen, é calculado o SSIS para o estado futuro da empresa, bem como os indicadores de relação custo-benefício (B/C) e o indicador relativo à utilização de recursos de mão-de-obra para realização dos projetos, Full Time Equivalent (FTE). Esses três indicadores são representados graficamente por um CUBO para facilitar a interpretação do desempenho geral do cenário, apoiando uma tomada de decisão mais eficaz. Embora sua aplicabilidade ainda precise ser mais bem estudada, especialistas entendem que o VSM4S é uma ferramenta importante que ajudaria a melhorar o desempenho dos setores social e ambiental da empresa,

ressaltando a importância da sinergia entre os setores operacional e estratégico. Sua característica sistêmica, dinâmica e potencialmente aplicável em qualquer manufatura também se mostrou como vantagens. O estudo de caso real considerado mostra a aplicação prática e detalhada do modelo proposto. O VSM4S contribui teórica e praticamente para a inclusão de aspectos de sustentabilidade nas decisões estratégicas das empresas de manufatura.

**Palavras-chave:** Avaliação Multicritério; Manufatura Sustentável; Mapeamento do Fluxo de Valor; 5SEnSU.

## ABSTRACT

In the face the increasing demand for natural resources to generate industrial products and waste dilution, it has become of importance to incorporate proposals for improvement projects that consider not only economic, but also environmental and social aspects. One possible approach is to include these proposals in the traditional Value Stream Mapping (VSM), a widely used tool in manufacturing companies. By doing so, aspects of sustainability can be considered, making it an interesting strategy to pursue. Although there are efforts to include aspects of sustainability in the traditional VSM, most do not consider economic, social and environmental capital in an integrated way, in addition to not presenting epistemologically rooted conceptual models of sustainability to support the choice of indicators, discussions and decisions. The aim main of this study is to propose a Value Stream Mapping model focused on sustainability, here demonized Value Stream Mapping for Sustainability (VSM4S), a tool which combines the advantages of traditional VSM with the inclusion of sustainability aspects based on the five-sector sustainability model (5SEnSU) and its system sustainability indicator (SSIS). Based on the current scenario with achieved results up to the moment in which the VSM "current state" is defined, and through the strategic goals defined for the next period, an internal team of specialists from different knowledge areas into the company carries out the analyses, in order to prepare the VSM4S "future state". Through the application of the 5SEnSU model, using the philosophy "goal programming" as a multi-criteria method, this expert's team can present different Kaizen project plans. As a result of VSM4S applied to different Kaizen project scenarios, the SSIS for the future state is calculated, as well as the cost-benefit ratio (B/C) indicators and a third indicator, the "Full Time Equivalent" (FTE) that defines labor resources for carrying out projects. These three indicators are represented graphically by a CUBE figure to facilitate the interpretation of each proposed scenario's overall performance. Although its applicability is still necessary for further studies, experts understand that VSM4S is an important tool that will help improve the performance of the company's socio-environmental sectors, in addition to highlighting the importance of synergy between operational and strategic sectors. Its systemic, dynamic and potentially applicable characteristics in any manufacturing segment were also highlighted as advantages. The real case study considered shows the practical

and detailed application of the proposed model. VSM4S contributes theoretically and practically to the inclusion of sustainability aspects in the strategic decisions of manufacturing companies.

**Keywords:** Multicriteria Analysis; Sustainable Manufacturing; Sustainable Value Stream Mapping.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estruturação da tese. ....	23
Figura 2. Exemplo de um <i>value stream mapping</i> (VSM) representando o estado atual da empresa de manufatura. ....	27
Figura 3. Exemplo de um <i>value stream mapping</i> (VSM) representando o estado futuro da empresa de manufatura. ....	28
Figura 4. Simbologia utilizada na elaboração do <i>value stream mapping</i> (VSM). ....	28
Figura 5. Abordagem baseada em PDCA para a implementação do <i>Environmental Value Stream Mapping</i> (E-VSM). ....	34
Figura 6. Modelo dos cinco setores de sustentabilidade (5SEnSU) representado na simbologia de emergia. ....	47
Figura 7. O modelo proposto <i>Value Stream Mapping for Sustainability</i> (VSM4S), incluindo o estado atual e estado futuro. ....	54
Figura 8. Exemplo esquemático para representar a filosofia de programação por metas considerada no modelo 5SEnSU ....	59
Figura 9. VSM4S - Etapas para a obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) para o estado atual do fluxo de produção analisado. ....	63
Figura 10. VSM4S - Etapas para a obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) estado futuro, em cenários baseados no estabelecimento das metas VSM4S e dos planos de projetos Kaizen. ....	68
Figura 11. Figura do cubo para representar de forma gráfica o índice de sustentabilidade (SSIS) correspondente ao B/C ratio e o FTE dos cenários disponíveis ....	71
Figura 12. Os oito cenários possíveis para o VSM4S do estado futuro baseado nos indicadores de sustentabilidade (SSIS), retorno financeiro (B/C Ratio) e utilização dos recursos para realização dos projetos no prazo (FTE). ....	72
Figura 13. Fluxo de manufatura hipotético para aplicação do VSM4S. ....	74
Figura 14. Exemplo do VSM4S estado futuro do cenário escolhido, considerando os indicadores de sustentabilidade (Ambientais, Econômicos e Sociais) com seus novos valores a serem atingidos por meio da conclusão dos projetos de melhorias. ....	79

Figura 15. Componentes do produto final considerados no mapeamento como estudo de caso.....	81
Figura 16. VSM tradicional estado atual referente aos fluxos produtivos mapeados considerando apenas os indicadores econômicos .....	83
Figura 17. VSM4S estado atual referente aos fluxos produtivos mapeados considerando os indicadores ambientais econômicos e sociais.....	86
Figura 18. Os quatro cenários propostos representados no cubo para a validação do VSM4S estado futuro, baseando-se nos indicadores de sustentabilidade do sistema (SSIS), na taxa de retorno financeiro (B/C ratio), e na utilização de recursos humanos para a implementação .....	99
Figura 19. VSM4S baseando-se no cenário escolhido pelo tomador de decisão para o estado futuro, com os novos valores atribuídos aos indicadores ambientais econômicos e sociais .....	102
Figura 20. Gráfico com as respostas referentes a questões sobre aplicabilidade do modelo VSM4S proposto. Os valores percentuais representam: $\sum$ Discorda totalmente + Discorda; Não discorda nem concorda; $\sum$ Concorda + Concorda totalmente .....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação dos trabalhos científicos estudados para dar suporte a esta tese. ....	25
Tabela 2. Sumário de fontes da literatura sobre o VSM com foco na sustentabilidade .....	38
Tabela 3. Clusters de processos de manufatura sustentáveis. ....	41
Tabela 4. Exemplos de indicadores utilizados em estudos de sustentabilidade de empresas de manufatura. ....	56
Tabela 5. Indicadores com valores hipotéticos para exemplificar o cálculo do resultado determinado em um VSM tradicional e um VSM4S proposto.....	58
Tabela 6. Indicadores escolhidos, com seus respectivos valores para cada um dos processos, e seus valores determinados para um estudo de um caso hipotético. Os números correspondem ao VSM4S estado atual. ....	75
Tabela 7. Valores determinados dos indicadores para os quatro cenários hipotéticos para o estado futuro do VSM4S estabelecidos conforme os projetos Kaizen. Tanto os valores determinados quanto as metas 5SEnSU são valores hipotéticos baseados nos valores determinados da Tabela 6. ....	76
Tabela 8. Desempenho geral para os quatro cenários hipotéticos avaliados, e sua interpretação pelo CUBO. Os números correspondem ao estado futuro do VSM4S. ....	77
Tabela 9. Indicadores escolhidos, com seus respectivos valores para cada um dos processos, e seus valores determinados para o estudo de caso. Os valores correspondem ao VSM4S estado atual.....	87
Tabela 10. Meta, punição, peso e objetivo de cada indicador utilizado no 5SEnSU para o estudo de caso. ....	89
Tabela 11. Meta de sustentabilidade do indicador (ISG), indicador de sustentabilidade do setor (SSI) e indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS) do estado atual para o estudo de caso. ....	90
Tabela 12. Valores dos indicadores para cada um dos processos, e seus valores determinados para o estudo de caso (Figura 17). Os valores correspondem ao VSM4S estado futuro em 4 diferentes cenários com foco ambiental, econômico, social.....	92

Tabela 13. Meta de sustentabilidade do indicador (ISG), indicador de sustentabilidade do setor (SSI) e indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS) do estado futuro para o estudo de caso. ....	96
Tabela 14. Valores das taxas B/C para a escolha entre os quatro cenários propostos para a elaboração do VSM4S estado futuro.....	97
Tabela 15. Valores de Full Time Equivalent (FTE) para a escolha entre os quatro cenários propostos para a elaboração do VSM4S estado futuro .....	98
Tabela 16. Desempenho geral para os quatro cenários avaliados e suas respectivas interpretações por meio da estrutura de CUBO. Os valores correspondem ao estado futuro do VSM4S .....	98
Tabela 17. Respostas dos especialistas sobre a aplicabilidade do VSM4S proposto. ....	107
Tabela 18. Estatística do coeficiente de concordância Kappa de Fleiss aplicado às respostas dos especialistas para as Questões da Tabela 17 considerando as cinco opções de respostas. ....	113
Tabela 19. Estatística do coeficiente de concordância Kappa de Fleiss aplicado às respostas dos especialistas para as Questões da Tabela 17 considerando apenas três opções de resposta. ....	114

## ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

3Ms	Muri (problemas ergonômicos), Mura (variabilidade no processo) e Muda (desperdícios)
5S	5 Sentos para organização do local de trabalho: Utilização, Organização, Limpeza, Padronização e Disciplina
5SEnSU	<i>Five Sector Sustainability Model</i> (Modelo de Sustentabilidade dos Cinco Setores)
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ARCI	Avaliação Rápida de Corpo Inteiro
ARMS	Avaliação Rápida dos Membros Superiores
B/C Ratio	Taxa Benefício Custo (retorno pelo investimento do projeto)
DJSI	Índice de sustentabilidade Dow Jones
DJSINA	Índice de sustentabilidade Dow Jones da América do Norte
ESG	<i>Environment Social e Governance</i>
E-VSM	<i>Value Stream Mapping Ambiental</i>
FTE	<i>Full Time Equivalent</i> (Tempo Total Equivalente)
GP	<i>Goal Programming</i> (Programação por Metas)
GRI	<i>Global Report Initiative</i> (Iniciativas do Relatório Global)
ICF	Índice de Carga Física
Kanban	Sistema para sinalizar falta de material nos processos
NIOSH	Segurança e Saúde Ocupacional
NVAA	Atividades que não Agregam Valor
PDCA	Planejar ( <i>Plan</i> ); executar ( <i>Do</i> ); verificar ( <i>Check</i> ) e agir ( <i>Act</i> )
Poka Yoke	Dispositivo para evitar erros no processo
SISS	Indicador de Sustentabilidade do Sistema
SMED	Troca de Ferramentas em Menos de 10 minutos
SUAPRO	Procedimento de Avaliação de Sustentabilidade para Operações e Processos Produtivos
TPM	Manutenção Produtiva Total
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i> (Mapeamento do Fluxo de Valor)
VSM4S	<i>Value Stream Mapping For Sustainability</i> (Mapeamento do Fluxo de Valor para Sustentabilidade)

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
2.	<b>UTILIDADE DA TESE</b>	21
3.	<b>OBJETIVOS</b>	22
3.1.	Objetivo geral	22
3.2.	Objetivos específicos	22
4.	<b>ESTRUTURA DA TESE</b>	23
5.	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	24
5.1.	<i>Value Stream Mapping (VSM)</i> tradicional	25
5.2.	<i>Value Stream Mapping (VSM)</i> modificado	32
5.3.	<b>Modelo de Sustentabilidade dos Cinco Setores (5SEnSU)</b>	46
5.3.1.	Estudos que utilizaram o modelo 5SEnSU	48
6.	<b>CAPÍTULO 1: PROPOSTA DO MODELO DE MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR PARA SUSTENTABILIDADE (VSM4S)</b>	53
6.1.	<b>VSM4S - Estado Atual</b>	55
6.1.1.	Seleção dos Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais para o VSM4S	55
6.1.2.	Cálculo dos Indicadores Ambientais, Econômicos, Sociais e seus Resultados Determinados	57
6.1.3.	Definição das metas, punições e pesos para os indicadores do 5SEnSU	58
6.1.4.	Aplicação do modelo 5SEnSU para obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS)	60
6.2.	<b>VSM4S Estado Futuro</b>	64
6.2.1.	Estabelecimento das Metas VSM4S para os Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais	65
6.2.2.	Projetos Kaizen para um Cenário Futuro Proposto e Revisão dos indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais	66
6.2.3.	Cálculo dos Resultados Determinados dos Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais	66
6.2.4.	Uso das Metas 5SEnSU para os Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais	67
6.2.5.	Aplicação do modelo 5SEnSU para Obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) em um Cenário de Estado Futuro	67

6.2.6. Aplicação da Estrutura de Cubos para Escolha de Cenário Futuro .....	69
<b>6.3. Aplicação do VSM4S em um caso de estudo com dados hipotéticos .....</b>	<b>74</b>
<b>7. CAPÍTULO 2: APLICAÇÃO DO VSM4S EM UM ESTUDO DE CASO REAL .....</b>	<b>80</b>
<b>7.1. VSM4S do estado atual .....</b>	<b>84</b>
7.1.1. Seleção dos indicadores ambientais, econômicos e sociais.....	84
7.1.2. Quantificação dos indicadores e seus valores determinados .....	85
7.1.3. Estabelecimento de metas, punições, pesos e objetivos para os indicadores.....	88
7.1.4. Aplicação do modelo 5SEnSU .....	89
<b>7.2. Aplicação do VSM4S para o estado futuro .....</b>	<b>90</b>
7.2.1. Estabelecimento de metas VSM4S para os indicadores ambientais, econômicos e sociais.....	90
7.2.2. Projetos Kaizen para alcançar as metas VSM4S dos cenários futuros propostos .....	94
7.2.3. Cálculo dos resultados determinados dos indicadores .....	94
7.2.4. Aplicação da filosofia da programação por metas baseada no 5SEnSU .....	95
7.2.5. Tomada de decisão final.....	96
<b>8. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO VSM4S PROPOSTO .....</b>	<b>103</b>
<b>8.1. Aplicabilidade de VSMs alternativos conforme discutido em literatura científica .....</b>	<b>103</b>
<b>8.2. Aplicabilidade do VSM4S baseada na percepção de especialistas .....</b>	<b>105</b>
<b>9. CONCLUSÕES .....</b>	<b>116</b>
<b>10. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTURO .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>126</b>
Apêndice A - Coeficientes do banco de dados do “Ecoivent”. .....	126
Apêndice B - Memorial de cálculo da energia incorporada ( $k_{11}$ ) para o inventário da matéria prima utilizada nos processos mapeados do estudo de caso. ....	127
Apêndice C - Memorial de cálculo para o consumo de energia elétrica ( $k_{12}$ ).....	132
Apêndice D - Memorial de cálculo do aquecimento global ( $k_{21}$ ) para o inventário da matéria prima utilizada nos processos mapeados do estudo de caso .....	133

Apêndice E - Memorial de cálculo do indicador potencial de acidificação (k <sub>22</sub> ) para o inventário da matéria prima utilizada nos processos mapeados do estudo de caso .....	138
Apêndice F - Eficiência Geral dos Equipamentos - OEE (k <sub>31</sub> ) .....	143
Apêndice G - Índice de qualidade – First Time Quality - FTQ (k <sub>32</sub> ).....	144
Apêndice H – Tempo de Setup nos processos (k <sub>33</sub> ).....	145
Apêndice I – Lead Time do processo (tempo de passagem) (k <sub>34</sub> ).....	146
Apêndice J - Memorial de cálculo para taxa de turnover (k <sub>41</sub> ) .....	147
Apêndice K - Memorial de cálculo para taxa de equiparação salarial (k <sub>42</sub> )...	148
Apêndice L - Memorial de cálculo para taxa de afastamento por acidente (k <sub>51</sub> ).....	149
Apêndice M - Memorial de cálculo para taxa de absenteísmo (k <sub>52</sub> ).....	150
Apêndice N - Valores calculados na programação por metas para o VSM4S como proposta do modelo, baseados no caso hipotético .....	151
Apêndice O - Valores calculados na programação por metas para o VSM4S resultante do estudo de caso.....	153
Apêndice P – Questionário aplicado à especialistas para avaliar a aplicabilidade da ferramenta VSM4S. ....	156
Apêndice Q – Comentários conclusivos dos respondentes para a questão aberta (Questão 11) do questionário do Apêndice P. ....	163

## 1. INTRODUÇÃO

As ações antropogênicas têm contribuído para um ritmo acelerado no desenvolvimento de novos produtos e processos, aumentando a pressão sobre o ambiente, devido às demandas energéticas e materiais, e ao serviço ecossistêmico de diluição de subprodutos concentrados. Além de outras iniciativas, que buscam compreender a relação homem-natureza, como o estudo de Rockström et al. (2009; 2023) sobre as fronteiras biofísicas do planeta, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ONU, 2023) reconhecem essa problemática e propõem uma classificação desses objetivos, que devem ser alcançados, com metas quantificáveis, abrangendo diferentes escalas e atores nos setores público e privado.

Embora os avanços em direção à sustentabilidade possam ser encontrados em planos de desenvolvimento governamentais (Teniwut et al., 2022; Yoshida, 2023; Muoneke et al., 2023) e em relatórios de sustentabilidade de empresas de capital aberto (por exemplo, Natura & Co. Group, Nestlé S.A., Siemens AG, Nike Inc.), a adoção de práticas sustentáveis por empresas de manufatura ainda é considerada escassa, independentemente da sua escala e tipo de produto, e isso é atribuído a uma variedade de barreiras e fatores culturais, como restrições de tempo, limitações financeiras e disponibilidade de mão-de-obra qualificada, conforme destacado nas discussões de Mahmood et al. (2019), Ali et al. (2020) e Gohoungodji et al. (2020). Por exemplo, do total de 67 empresas brasileiras incluídas na carteira 2023 do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da bolsa 'B3' (ISE, 2023), apesar de representarem 41% (0,34 trilhão de dólares) do valor de mercado de todas as ações negociadas, apresentam um desequilíbrio quanto à implementação dos ODS da ONU em seus negócios, variando de 6% para o ODS 'vida na água' a 78% para o 'combate às mudanças climáticas globais'. É importante definir e compreender a sustentabilidade em sua epistemologia, caso contrário, o conhecimento superficial e genérico leva à descrença na sua implementação. São necessários conceitos e modelos facilmente compreensíveis para orientar ações concretas e quantificáveis na busca da sustentabilidade (Gaikwad et al., 2020).

A literatura científica indica que os métodos de diagnóstico utilizados pelas indústrias para o planejamento estratégico são baseados em aspectos econômicos,

com os aspectos ambientais e sociais geralmente negligenciados. Como resultado, as empresas não são totalmente eficazes na abordagem de potenciais causas, que reduzem sua sustentabilidade (Chiarini, 2014; Garza-Reyes et al., 2018; Mishra et al., 2019). Por outro lado, devido à crescente necessidade de implementação da gestão ambiental e social no setor privado para aumentar a competitividade, a sustentabilidade deve ser incluída no seu planejamento estratégico. Esse novo cenário resulta do aumento da pressão social por produtos mais sustentáveis, combinado com regulamentações governamentais mais rigorosas (WU Hui et al. 2022).

Diversas abordagens técnicas e gerenciais, como kanban, 5S, Seis Sigma, Poka-Yoke, 3Ms, análise SWOT, 5W1H e os 5 Porquês, têm sido adotadas pelas empresas de manufatura para aprimorar qualidade e produtividade e embasar decisões estratégicas. O Mapeamento do Fluxo de Valor (do inglês, *Value Stream Mapping*; VSM; Rother e Shook, 1999), baseado no Sistema Toyota de Produção, destaca-se como uma importante ferramenta de gestão reconhecida mundialmente devido à sua objetividade e representação gráfica dos fluxos de produção, permitindo a identificação de todos os tipos de desperdício de produção no chão de fábrica.

Embora o VSM seja reconhecido como uma ferramenta utilizada para otimizar a eficiência dos sistemas produtivos, seu foco ainda é de natureza econômica, no entanto gestores de empresas manufatureiras, que almejam expandir sua base de consumidores, devem integrar conceitos contemporâneos e fundamentais da produção, tais como produção mais limpa, economia circular, participação em mercados de carbono e promoção de melhores relações laborais. Uma das primeiras tentativas de incorporar aspectos ambientais ao VSM foi o chamado Mapeamento do Fluxo de Valor Sustentável (SVSM) proposto por Simons e Mason (2002, apud Faulkner e Badurdeen, 2014, p. 10), que visava reduzir as emissões de gases de efeito estufa em uma cadeia de suprimentos. Embora o SVSM tenha sido reconhecido como importante, cobriu parcialmente a variável ambiental porque não incluiu outros indicadores importantes, como consumo de energia elétrica, uso de água e outros materiais utilizados nos processos, além de ignorar aspectos sociais.

Diante da necessidade de ter um VSM mais alinhado com os princípios da sustentabilidade, diversas alternativas foram propostas durante a última década.

Mohamad et al. (2019) usaram um kit de ferramentas SVSM padrão, fornecido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), em 2007, para integrar a manufatura enxuta e práticas ambientais, incluindo o consumo de materiais e água em processos industriais. Norton e Fearne (2009) incluíram indicadores semelhantes ao SVSM para avaliar os desperdícios na indústria de alimentos do Reino Unido. Com o objetivo de melhorar o desempenho econômico na perspectiva da ecoeficiência, definida pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, Vinodh et al. (2016) e Salvador et al. (2021) propuseram a inclusão da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no VSM, resultando no modelo ACV-VSM. Semelhante aos estudos da USEPA, Litos et al. (2017) também propuseram um kit de ferramentas integrado, mas focado na ecoeficiência. Com base no ciclo de melhoria contínua 'planejar-fazer-verificar-agir' (PDCA), Garza-Reyes et al. (2018) propuseram uma abordagem para implementar sistematicamente aspectos ambientais no VSM, denominada 'VSM Ambiental' (E-VSM). Venugopal e Saleeshya (2023) propuseram um VSM sustentável denominado 'Sus-VSM', incluindo indicadores de ACV no VSM tradicional; os autores aplicaram o método proposto na indústria de fabricação de fios e cabos elétricos. Vários outros estudos (Searcy e Elkhawas, 2012; Lasa et al., 2009; Helleno et al., 2017; entre outros) discutiram iniciativas para alterar o VSM para reduzir os impactos ambientais das empresas de manufatura, sugerindo a inclusão de procedimentos e indicadores para melhor desempenho ambiental. Em contraste com todas essas propostas, que focam nos aspectos ambientais, o estudo de Gholami et al. (2019) apresentou o VSM-Social, permitindo a visualização e avaliação do desempenho da manufatura por meio de indicadores sociais, incluindo ergonomia e riscos, que podem afetar negativamente os funcionários. Avanços nessa abordagem podem ser alcançados através da incorporação da avaliação do ciclo de vida social (ACV social), abordando os impactos sociais das operações industriais.

Apesar dos avanços no sentido de tornar o VSM mais focado na sustentabilidade, segundo Faulkner e Badurdeen (2014), há uma falta de clareza sobre como incorporar conceitos ambientais e sociais de forma prática e quantitativa de forma integrada no VSM. Com base na revisão da literatura sobre o tema, identificou-se a falta de métodos cientificamente robustos, permitindo a inclusão de diferentes *stakeholders* (fornecedores, empresas, clientes, sociedade) no VSM,

considerando uma abordagem multicritério e avaliando simultaneamente indicadores econômicos, sociais e ambientais, em vez de desagrega-los como sugerido por outros estudos.

O Modelo de Sustentabilidade dos Cinco Setores (5SEnSU; Giannetti et al., 2019) surge como uma potencial alternativa para que o modelo conceitual de sustentabilidade multicritério seja incorporado ao VSM, visando fornecer mapeamento e planejamento em empresas de manufatura com foco na sustentabilidade. O 5SEnSU permite uma compreensão holística das relações entre o ambiente, o setor econômico e a sociedade como um sistema aberto, com troca de materiais, energia e informações. As funções de doador e receptor são reconhecidas para os setores ambientais e sociais, fornecendo recursos materiais, energia e mão-de-obra ao sistema produtivo, recebendo benefícios como qualidade de vida e salários, ou desvantagens como desperdício, poluição e más condições de trabalho. Todas essas relações estão integradas ao modelo 5SEnSU, representadas por diferentes indicadores, cada um com seus respectivos conceitos, métodos e unidades, resultando em uma abordagem multicritério, baseada na filosofia da programação de metas para cálculo do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS).

Em razão da problemática exposta, este estudo propõe o Mapeamento do Fluxo de Valor para Sustentabilidade “*Value Stream Mapping For Sustainability*” (VSM4S), abordagem resultante da integração do modelo 5SEnSU ao VSM tradicional. A importância do VSM4S é justificada pela falta de uma abordagem mais aprofundada no âmbito ambiental e social encontrada nas propostas de VSM existentes para sustentabilidade, conforme revisão da literatura científica.

O VSM4S requer a integração de vários setores dentro das empresas de manufatura, incluindo equipes de sustentabilidade, equipes técnicas e equipes de gestão, para avaliar oportunidades sob uma perspectiva sistêmica de melhoria nos processos de produção, considerando para os aspectos ambientais e sociais a mesma importância atribuída aos aspectos econômicos.

## 2. UTILIDADE DA TESE

Este estudo contribui para a proposição e utilização de uma nova ferramenta para mapeamento de desperdícios em empresas de manufatura, agora com foco na sustentabilidade, aplicando-a em um estudo de caso real. Busca-se contribuir de forma teórica com discussões sobre a integração dos aspectos de sustentabilidade em modelos de decisão tradicionais já difundidos no mercado e, de forma prática, propondo a ferramenta *Value Stream Mapping for Sustainability (VSM4S)* que pode ser aplicada em qualquer segmento industrial.

A importância do VSM4S justifica-se pela falta de estudos em literatura, que considerem a sustentabilidade no VSM tradicional. Espera-se que o VSM4S possa substituir ou complementar o VSM tradicional comumente utilizado nas decisões das empresas de manufatura, resultando em diagnósticos que possibilitem a implementação de estratégias na busca de um melhor desempenho sustentável.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo geral**

Propor e aplicar o *Value Stream Mapping for Sustainability* (VSM4S) para dar suporte aos tomadores de decisão em busca de estratégias nas operações, que resultem em manufaturas com maior sustentabilidade.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- a) Apresentar os conceitos, definições e critérios do *Value Stream Mapping* (VSM) tradicional como uma ferramenta para diagnosticar perdas na produção;
- b) Discutir sobre as lacunas existentes no VSM tradicional para dar suporte a decisões em busca da sustentabilidade;
- c) Propor o *Value Stream Mapping for Sustainability* (VSM4S) como alternativa ao VSM tradicional para superar as lacunas identificadas;
- d) Utilizar o VSM4S em estudo de caso como exemplo prático;
- e) Discutir sobre a aplicabilidade do VSM4S, baseado em informações obtidas de especialistas por meio de questionário.

#### 4. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese propõe e aplica um novo modelo para auxiliar as tomadas de decisões na manufatura, afastando-se um pouco das estruturas tradicionais de teses. Entende-se que é necessário fornecer informações de como a tese está estruturada para facilitar seu entendimento:

- a) Após as seções iniciais que justificam a realização da tese, apresentando o *gap* científico, a utilidade da tese e os objetivos, a revisão da literatura é apresentada para mostrar as principais definições, conceitos e avanços (estado da arte) relacionados ao tema desta tese.
- b) Em seguida, a proposta do modelo é apresentada em uma seção separada, destacando as diferenças entre o modelo já existente e o modelo proposto nesta tese, deixando claro os critérios utilizados, que justificam o modelo proposto, assim como todas as etapas (passo a passo) para sua aplicação.
- c) A aplicação do modelo proposto em um estudo de caso é apresentada em outra seção, para exemplificar procedimentos e discutir sobre sua aplicabilidade.
- d) Por fim, são apresentadas as discussões sobre a aplicabilidade do VSM4S, além das conclusões da proposição do modelo quanto ao estudo de caso.

A Figura 1 mostra a estrutura considerada nesta tese, incluindo quatro etapas: Elementos introdutórios (introdução, objetivos, utilidade da tese), proposta do VSM4S, aplicação do VSM4S em um estudo de caso de uma indústria de manufatura, discussões sobre sua aplicabilidade e conclusões.

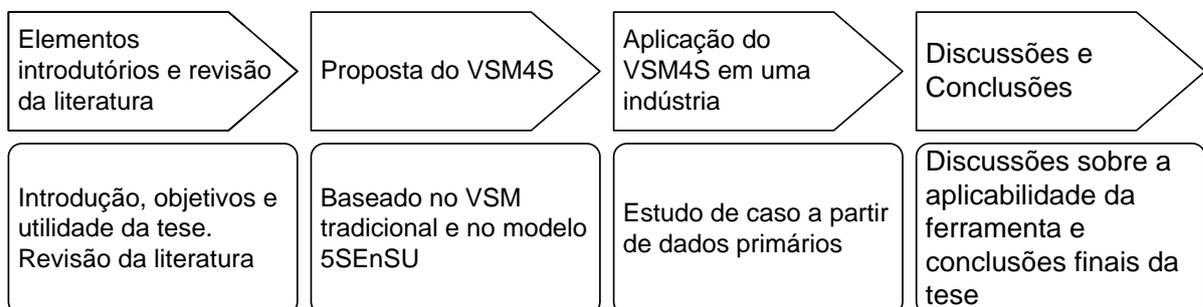


Figura 1. Estruturação da tese. Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 5. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura para este estudo se baseou na pesquisa sobre o Mapeamento do Fluxo de Valor tradicional (VSM), sua origem e aplicação nos processos produtivos e buscou-se identificar as modificações que vêm sendo feitas no VSM tradicional, na tentativa de incorporar outros aspectos de sustentabilidade (meio ambiente e sociedade) além da economia puramente. Em seguida, discutiu-se também sobre o modelo 5SEnSU, caracterizado pela sua abordagem sistêmica na avaliação da sustentabilidade.

O *Value Stream Mapping* (VSM) tradicional pode trazer, em sua abordagem, inúmeras ferramentas da manufatura enxuta com resultados voltados para o aspecto econômico, e também possibilitam reduzir os impactos ambientais em processos de produção específicos. Em outras palavras, toda vez que uma ferramenta baseada nos princípios da manufatura enxuta é aplicada, também pode haver benefícios em relação à gestão ambiental. No entanto, estão sendo feitas modificações no VSM tradicional para destacar melhor essas características ambientais, às vezes combinadas com aspectos sociais, podendo resultar no chamado VSM sustentável.

A Tabela 1 apresenta a classificação por temas desta revisão e os trabalhos pesquisados para este estudo até o momento. Cada tema é desenvolvido nas subseções a seguir.

Tabela 1. Relação dos trabalhos científicos estudados para dar suporte a esta tese.

<b>Temas</b>	<b>Referências</b>
<b>5.1 Value Stream Mapping (VSM) tradicional:</b> O aumento no uso de recursos naturais, barreiras às práticas de sustentabilidade e ferramenta Kaizen	Rother e Shook (1996); Rother e Shook (2003); Young et al. (1997); Rockström et al. (2009; 2023); USEPA (2007); Rother e Shook (1999); Chen et al. (2010); Litos et al. (2017); Kundgol et al. (2021); Dinesh et al. (2022); Tyagi et al. (2015); Palmer (2001); Malik e Yezhuang (2006); Imai (1986); Sonobe (2018); Sugimoto (2018); Womack e Jones (1996); Womack e Jones (1997); Womack e Jones (1994).
<b>5.2 Value Stream Mapping (VSM) modificado:</b> Indicadores de sustentabilidade (ambientais, econômicos e sociais) na manufatura	USEPA (2007); Norton e Fearne (2009); Chiarini (2014); Cheung et al. (2017); Garza-Reyes et al. (2018); Mishra et al. (2019); Helleno et al. (2017); Junior et al. (2018); Mohamad et al. (2019); Gholami et al. (2019); Hristov e Chirico (2019); Faulkner e Badurdeen (2014); Brown et al. (2014); Jamil et al. (2020); Lu et al. (2011); Ahmad et al. (2018); Lee et al. (2021); Batwara et al. (2023); Verma et al. (2021); Alvandi et al. (2016); Sultan et al. (2021); Rajesh Menon et al. (2021).
<b>5.3 Modelo de Sustentabilidade dos Cinco Setores (5SEnSU)</b>	Goodland e Daly (1996); Georgescu-Roegen (1971); Wackernagel e Rees (1996); Odum (1996); Stockholm Resilience Centre (2023); Pulselli et al. (2015); Giannetti et al. (2019); García et al. (2021); Dos Santos et al. (2022; 2023); Agostinho et al. (2019); Goodland (1995); Nascimento et al. (2022); Giannetti et al. (2023); Agostinho et al. (2023); Pierucci et al. (2023).

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1. Value Stream Mapping (VSM) tradicional

O *Value Stream Mapping* (VSM) (Rother e Shook, 1996) é uma tradicional ferramenta eficaz na identificação e visualização de desperdícios em todas as fases do fluxo produtivo. O VSM tem como foco a análise das atividades, que compõem o fluxo, discernindo entre aquelas que agregam e não agregam valor ao produto, e associando-as ao tempo consumido. Esses tempos incluem o ciclo de produção, períodos de espera dos operadores, tempo necessário para a preparação de alterações de modelos, intervalos para recuperar ou reproduzir peças com problemas de qualidade, entre outros fatores que contribuem para a perda de tempo e baixa performance no processo. De acordo com Rother e Shook (2003), em qualquer mapeamento do fluxo de valor, cada um dos processos operacionais, que compõem o fluxo total de produção, expressa um resultado para os indicadores estabelecidos a serem analisados. Diante disso, há necessidade de um cálculo de consolidação de cada um desses indicadores, pois são esses valores determinados que servirão como parâmetros para determinar os próximos passos da análise, possibilitando retratar a situação atual, definir metas, planos de projetos e propostas de cenários para a situação futura.

As buscas aceleradas por novos produtos e processos, decorrentes da revolução industrial, têm ocasionado um aumento significativo no consumo de recursos naturais (Young et al., 1997). Esse fenômeno tem como consequência uma pressão sobre o meio ambiente pela demanda de energia e materiais para suprir as necessidades da sociedade. O VSM tradicional possibilita, por meio de análises, introduzir melhorias para reduzir ou eliminar os desperdícios.

Em âmbito mundial, grande parte das indústrias adotam anualmente a prática de revisão no mapeamento dos seus processos produtivos, utilizando para isso a ferramenta VSM. A finalidade desse mapeamento, como já citado anteriormente, é identificar e eliminar aquelas atividades que ocorrem durante o processo de produção, mas não agregam nenhum valor ao produto. Essas atividades ocasionam perdas na cadeia produtiva como, tempo excessivo gasto para produzir, tempos desperdiçados com recuperação de peças inerentes a problemas de qualidade, além de outros problemas, afetando a eficiência dos processos refletidos nos indicadores econômicos do negócio.

As Figuras 2 e 3 apresentam exemplos do VSM tradicional (Rother e Shook, 1996) no estado atual e futuro, respectivamente. A ferramenta é utilizada nas indústrias e possibilita às pessoas envolvidas no processo de manufatura, enxergarem o fluxo de produção de maneira holística, facilitando a identificação dos pontos de oportunidades que podem e devem ser melhorados. Segundo a USEPA (2007), o VSM envolve três etapas-chave: desenho do estado atual (Figura 2), desenho do estado futuro (Figura 3) e plano de trabalho e implementação (Projetos Kaizen). No primeiro passo, analisa-se o sistema de produção atual e cria-se um mapa detalhado. O segundo passo envolve a identificação de melhorias, visando um estado futuro mais eficiente. Na última etapa, um plano de trabalho é desenvolvido com metas mensuráveis para implementar as mudanças gradualmente. Assim, o ciclo de melhoria contínua se mantém com as revisões periódicas do VSM.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2007), com o objetivo de padronizar o uso do VSM Sustentável (VSMS) em um kit de ferramentas que integrasse práticas de manufatura enxuta e meio ambiente, considerou o uso de materiais e água para os processos industriais, mas não foi considerado o consumo de energia. A USEPA, reconhecendo a falta da inclusão de energia, propôs um segundo kit de ferramentas integrando-o aos demais desperdícios como uso de

material, emissões de gases do efeito estufa (GEE) e uso da água no VSMS. Norton e Fearne (2009), baseando-se na proposta da USEPA analisaram o desperdício na indústria de alimentos no Reino Unido, adicionando indicadores sobre todas essas perdas. Segundo os autores, evidências do estudo de caso indicaram que a volatilidade dos pedidos e a imprecisão das previsões tornam difíceis para os fabricantes estimarem as necessidades de materiais e planejar a produção, reduzindo a eficiência e incentivando a superprodução para garantir a disponibilidade, fatores que aumentam os desperdícios físicos e operacionais.

O VSM tradicional estado atual, exemplificado na Figura 2, reflete o cenário baseado no levantamento dos dados atuais e posteriormente são analisados por especialistas da área de manufatura. Os especialistas irão propor iniciativas de melhorias (projetos Kaizen) a serem implementados para atingir novos resultados durante um prazo previamente definido no planejamento dos projetos.

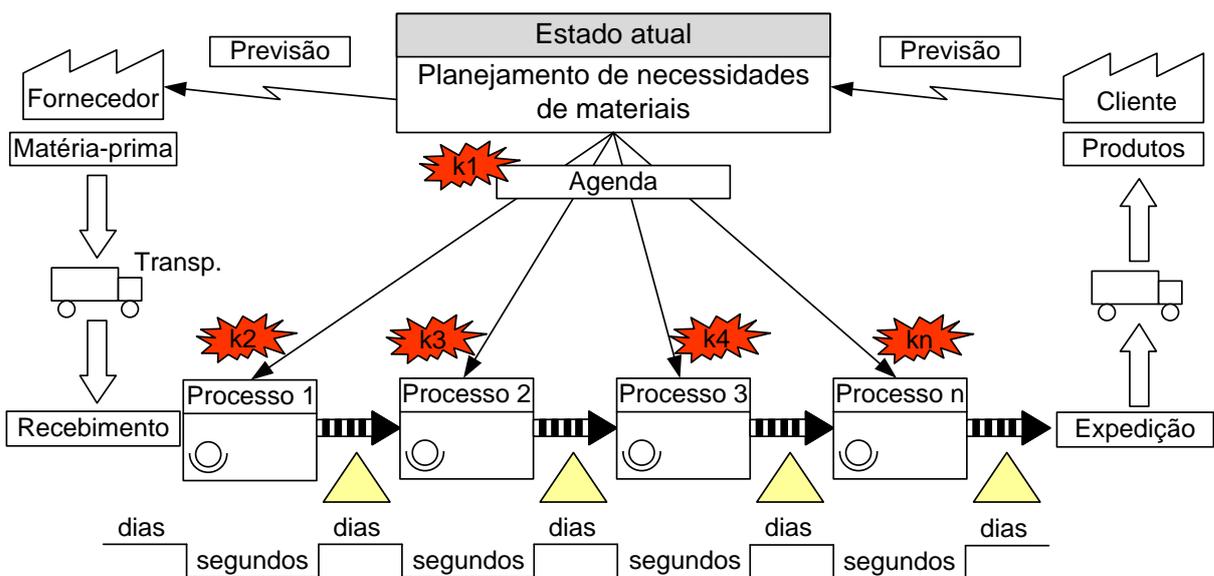


Figura 2. Exemplo de um *value stream mapping* (VSM) representando o estado atual da empresa de manufatura. Fonte: Rother e Shook, 1999.

A Figura 3 mostra uma representação do VSM tradicional no estado futuro, refletindo o cenário ideal a ser alcançado, assim que todas as melhorias propostas no estado atual, dentro do prazo definido no plano de projetos, forem concluídas.

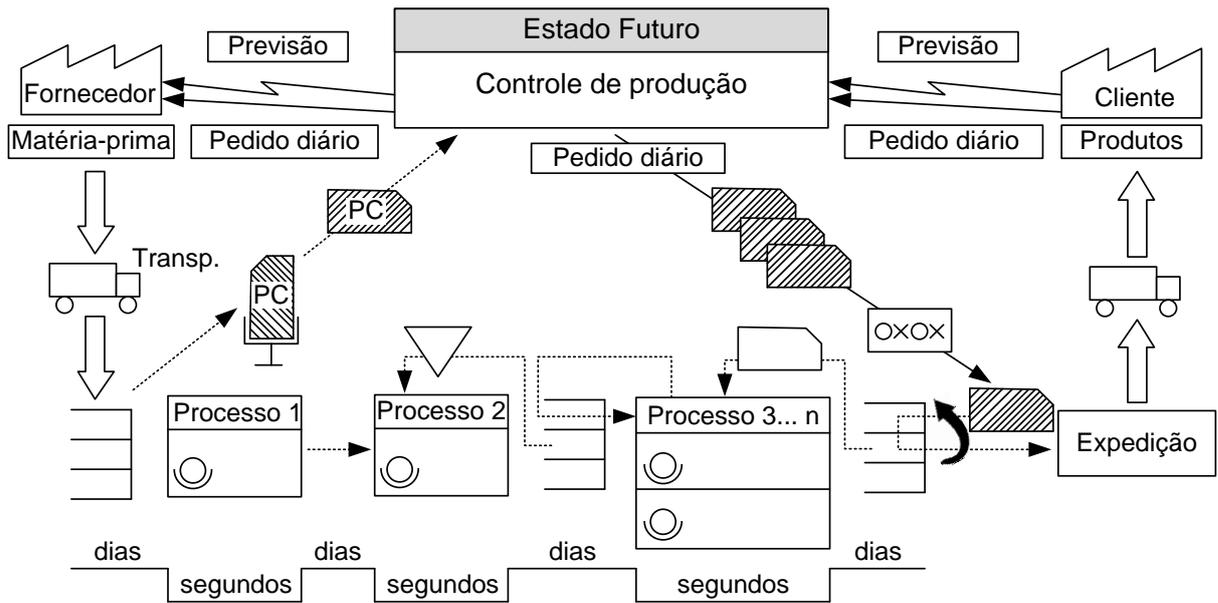


Figura 3. Exemplo de um *value stream mapping* (VSM) representando o estado futuro da empresa de manufatura. Fonte: Rother e Shook, 1999.

A Figura 4 apresenta a simbologia padrão utilizada na elaboração do VSM para os estados atual e futuro. Os projetos Kaizen são visualmente representados no VSM do estado atual por meio de seu símbolo correspondente, denominado ‘necessidade por Kaizen’ (do inglês, *Need for Kaizen*), localizado próximo ao ponto que requer a melhoria, conforme identificado durante a análise dos especialistas.

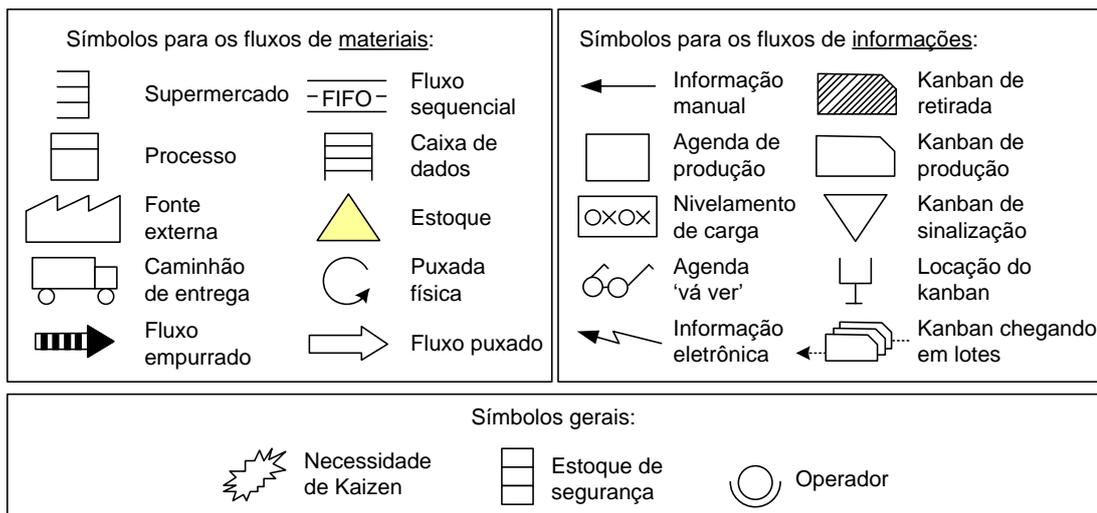


Figura 4. Simbologia utilizada na elaboração do *value stream mapping* (VSM). Fonte: Rother e Shook, 1999.

Os pesquisadores Chen et al. (2010) reconhecem a manufatura enxuta como uma metodologia que resulta na eficácia por meio da melhoria contínua, melhorando

a produtividade, a qualidade do produto e a entrega pontual aos clientes. Em contrapartida, requer um investimento elevado para a contratação de engenheiros de manufatura enxuta em tempo integral, e isso impede que muitas pequenas empresas implementem a produção enxuta em suas instalações. Apresentaram um estudo de caso implementando a manufatura enxuta em um pequeno fabricante nos Estados Unidos. Inicialmente coletaram os dados no processo e construíram o VSM, que representa o estado atual, seguido de um mapa projetando o estado futuro para servir como guia em futuras atividades de melhorias. Os problemas que impediam a empresa de avançar em seus resultados para atingir um estado futuro planejado foram identificados, e por meio de propostas de projetos kaizen, como o uso de ferramentas da manufatura enxuta, os resultados esperados foram atingidos.

Com o objetivo de abordar os desafios enfrentados pelos profissionais de manufatura diante do aumento da demanda de energia, inflação de preços de matérias-primas e regulamentações ambientais mais rigorosas, Litos et al. (2017) desenvolveram um *toolkit* integrado para melhorias na ecoeficiência, ilustrado por um estudo de caso na indústria de revestimentos. Os pesquisadores destacaram a limitação das ferramentas tradicionais, como o VSM, para promover melhorias na ecoeficiência, ou seja, "fazer mais com menos". Os resultados validados de cada módulo contribuem para soluções aplicáveis, visando a sustentabilidade financeira e ambiental, propondo soluções para a operação, e para que outros profissionais e acadêmicos possam se basear nessa experiência aplicada na prática.

O VSM foi aplicado tradicionalmente por Kundgol et al. (2021) para identificar atividades que não agregam valor ou desperdícios no atual processo de produção, reduzir o *lead time* do processo, melhorar a entrega pontual do produto ao cliente e reduzir o custo dos processos e do produto em uma indústria aeroespacial. De forma detalhada, as etapas da aplicação do VSM foram: seleção da família de produtos, seleção de peça para VSM, obtenção de dados, preparação do mapa do estado atual, definição do estado ideal, mapa do estado futuro e plano de ação. Os resultados mostraram uma significativa melhoria entre os estados atual e propostos no tempo de ciclo, que foi reduzido de 39 min para 20 min e de 109 min para 90 min (operações 20 e 30), alterando o plano de carga da máquina do controlador FANUC (m/c n.º 56) para o controlador HEIDENHAIN (m/c n.º 149). O tempo de espera no polimento foi reduzido de 9 dias para 0,0243 dias, o tempo de espera no rebarbamento foi reduzido

de 0,8646 dias para 0,1701 dias com a modificação do *layout* de rebarbação, que resultou em maior utilização do espaço, pois a redução do excesso de movimentação leva à melhoria na produtividade e qualidade. Por fim, o prazo total de entrega foi reduzido de 28 para 17 dias. Segundo os autores, o VSM mostrou ser uma importante ferramenta para descobrir as perdas no fluxo de valor e distinguir as melhorias nas áreas focadas.

O VSM tradicional também foi aplicado em uma indústria de fabricação de embalagens cartonadas. De acordo com o estudo de Dinesh et al. (2022), foram identificados problemas como planejamento de processo defeituoso e falta de equipamentos para manuseio de materiais, por meio do estado atual do VSM. Os principais resultados da aplicação do VSM incluem uma redução nos tempos de ciclo em diversas unidades de processo, aumento na produtividade de unidades como colagem e costura, implementação de unidades de manuseio de materiais para reduzir o tempo de troca de processo e atividades manuais não produtivas, e melhoria na eficiência global do processo, com previsão de aumento na produção e redução de desperdícios. Esses resultados mostraram que o VSM é eficaz em identificar e eliminar desperdícios, além de revelar a necessidade de um planejamento de processo eficiente e a implementação de equipamentos adequados para melhorar a eficiência operacional em empresas de manufatura.

Um estudo de caso foi realizado em uma unidade de fabricação de turbinas a gás, aplicando o VSM para identificar desperdícios, ineficiências e etapas não valorizadas no processo de desenvolvimento de produtos. Essa investigação foi conduzida por Tyagi et al. (2015), aplicando os conceitos do pensamento da manufatura enxuta no desenvolvimento de produtos para gerenciar, melhorar e acelerar o processo de desenvolvimento de produtos, mantendo ou melhorando a qualidade e desempenho. Segundo os autores, um mapeamento do estado futuro foi realizado com a remoção de todos os desperdícios e ineficiências, esperando ainda uma redução de 50% no tempo de ciclo do desenvolvimento de produtos com a implementação das melhorias propostas. Além das estratégias práticas, foi sugerido a implementação de metodologias adicionais e a expansão do VSM para outros processos críticos, assim como para toda a empresa.

A prática tradicional utilizada no VSM para combate aos desperdícios da manufatura é adotada por meio de projetos de melhorias denominados *Kaizen*: um

termo cujo significado vem da junção das palavras japonesas “Kai”, que significa mudança e “Zen”, melhor (Palmer, 2001), uma expressão que passou a ser adotada pelos japoneses para expressar melhoria contínua. Segundo Malik e Yezhuang (2006) e Imai (1986), o Kaizen passou a ser uma filosofia adotada pelos japoneses a partir de 1950, com a finalidade de eliminar desperdícios, adotando como fatores principais o trabalho em grupo por meio da motivação e da criatividade das pessoas com base nos conceitos, métodos e ferramentas da manufatura enxuta.

A definição de Kaizen, segundo Sonobe (2018), fundamenta-se como uma filosofia de gestão e conhecimento, resultando em melhorias contínuas, participativas e incrementais. Seu objetivo é melhorar e garantir a qualidade do produto, aumentar a produtividade, reduzir custos, melhorar o nível de entrega ao cliente, garantir a segurança e melhorar o meio ambiente, mediante uma abordagem amigável e participativa. Tem ainda como função motivar indivíduos a colaborar com ideias e percepções, elaboradas e refinadas pela equipe de projetos, por meio de observações e experimentos realizados de forma coletiva. Da mesma forma, Sugimoto (2018) define o Kaizen como atividades de melhorias que preenchem a lacuna entre o estado atual e o estado ideal. Para se obter sucesso com o Kaizen, o estado atual tem de ser plenamente entendido, o estado ideal devidamente definido e os recursos para preencher a lacuna entre os dois cuidadosamente dimensionados e disponíveis.

Para Womack e Jones (1996), o Kaizen representa uma forma de pensar (pensamento enxuto), possibilitando uma abordagem sistemática na redução dos desperdícios nas organizações. Segundos os autores, desperdício é qualquer atividade humana que consome recursos, mas não agrega valor ao processo. Diversas categorias distintas de desperdícios podem ser discernidas pelos operadores, contudo, a habilidade para identificar as perdas pertinentes no ambiente laboral é adquirida pelo pessoal mediante à aquisição dos princípios do pensamento enxuto. De acordo com Womack e Jones (1997), no kaizen considera-se o pensamento da manufatura enxuta como abordagem sistemática para redução dos desperdícios: atividades que consomem material e energia, mas não agrega valor para a empresa de manufatura. Para os autores, em outro trabalho (1994), o Kaizen é uma metodologia que reúne inúmeras ferramentas tradicionalmente conhecidas em sistemas de manufatura. A particularidade do método Kaizen está no diferencial apresentado que é a abordagem adotada para resolução de problemas. O método

traz uma estrutura disciplinar e uma forma padronizada em solucionar problemas e melhorar processos. Isso se reflete na determinação das ferramentas a serem utilizadas em cada projeto, no rigor nos prazos para conclusão das atividades, no foco em resultados, na formação do time de projeto com participação ativa, e na disseminação do conhecimento a todos os níveis hierárquicos da empresa.

De acordo com a revisão de literatura, o VSM tradicional é uma ferramenta largamente usada na indústria para melhorar produtos e processos, que não agregam valor, lidar com desperdícios, reduzir o tempo de processamento, entre outros. Um número crescente de publicações foca em esforços para incluir aspectos ambientais, sociais e econômicos no VSM tradicional, e por isso são apresentadas na seção a seguir.

## **5.2. Value Stream Mapping (VSM) modificado**

Para Chiarini (2014), o objetivo foi verificar se as ferramentas de produção enxuta poderiam ou não ser úteis na redução dos impactos ambientais gerados nos processos de manufatura. Foram selecionadas as seguintes ferramentas: (i) o 5S para limpeza e ataque aos vazamentos nos equipamentos, possibilitando uma melhor gestão na redução dos resíduos, como a contaminação do solo, (ii) o conceito de manufatura celular, para reduzir o consumo de energia elétrica, (iii) a Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance*, TPM), para melhorar as condições dos equipamentos, reduzindo os impactos gerados pelas máquinas, como vazamento de óleo, emissão de poeiras e produtos químicos na atmosfera, (iv) a ferramenta *Single Minute Exchange Dies* (SMED; ou Dispositivos para Troca de Ferramenta em menos de 10 minutos), sendo a única ferramenta entre as demais que não apresentou nenhuma melhoria significativa nos impactos ambientais. O estudo de caso apresentado pelos autores aplicou o VSM com todas essas ferramentas em cinco empresas europeias fabricantes de componentes para motocicletas. A situação atual e futura do VSM possibilitaram medir e comparar os resultados entre a situação anterior e futura após as melhorias implementadas. A pesquisa concluiu que o VSM, considerando as ferramentas de manufatura enxuta, pode sim ser usado para identificar, reduzir e até mesmo eliminar os impactos ambientais nos processos produtivos, além de revelar outros resultados positivos como a redução no consumo de energia elétrica nas fábricas avaliadas.

A aplicação do VSM, em busca pela redução dos impactos ambientais tem sido estudada por diferentes pesquisadores em literatura (Cheung et al., 2017; Garza-Reyes et al., 2018; Mishra et al., 2019) e detalhados a seguir. No entanto, suas abordagens são focadas nos indicadores econômicos, negligenciando a consideração adequada dos indicadores ambientais e sociais. Isso mostra a baixa representatividade durante as atividades para mapear oportunidades em busca da sustentabilidade nos fluxos de manufatura das empresas.

Motivado pela iniciativa de governos e líderes industriais, em todo o mundo, com um plano para reduzir em 80% as emissões de GHG até 2050, Cheung et al. (2017) propuseram uma nova abordagem de mapeamento multifuncional para vincular o pensamento da manufatura enxuta e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O estudo de caso da implementação foi apresentado com o objetivo de reavaliar a pegada de carbono de um produto plástico existente. O VSM foi usado como ferramenta para identificar as atividades, que não agregam valor (*Not Value Added Activities*, NVAA) com tempo desperdiçado durante os processos de produção. O VSM também foi utilizado para mapear o fluxo de materiais e identificar a quantidade de materiais usados ao longo de todo o processo de produção em conjunto com outras técnicas de manufatura enxuta, como a manufatura celular, o 5S e os sistemas de sinalização Kanban. Nessa pesquisa, o processo de moldagem por injeção foi estudado e analisado. Os resultados dos impactos ambientais foram calculados usando o método ReCiPe midpoint (E), considerando a abordagem *cradle-to-gate* (em português, do berço ao portão). O software Simapro V8 foi utilizado para analisar dados coletados para os estados atual e futuro de uma especificação de produto, com foco em mudanças climáticas, toxicidade humana e formação de oxidantes fotoquímicos. O estudo de Cheung et al. (2017) apresentou conclusões com melhorias sobre impactos ambientais alcançadas com o uso de técnicas da manufatura enxuta. Ao implementar o sistema puxado (produção de acordo com a demanda do cliente) com Kanban, para controlar o arranjo de pedidos de clientes e fornecedores, o tempo total de operações foi reduzido em 90%. Devido à mudança de requisitos de entrega, o uso total de material foi reduzido, resultando na redução das emissões de carbono na fabricação em 40%. Com a implementação do TPM, 5S e fabricação celular, os métodos contribuíram com uma economia de 41% nos consumos de energia e

eletricidade para o processo de produção, representando uma redução considerável da toxicidade humana.

Com base no ciclo de melhoria *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), Garza-Reyes et al. (2018) propuseram uma abordagem para implementar e conduzir de forma sistemática os estudos em VSM com foco no meio ambiente (*Environmental Value Stream Mapping, E-VSM*). Nesse estudo, alinhou-se a abordagem VSM com o Ciclo PDCA. Com base nessa lógica, a metodologia orientada pelo PDCA para a implementação do E-VSM, conforme representada na Figura 5, foi desenvolvida com o intuito de proporcionar um método eficaz, possibilitando a execução de estudos em um ciclo sistemático de aprimoramento contínuo. A implementação do método é baseada em um estudo de caso, com pesquisa e ações conduzidas em um processo de laminação helicoidal de uma unidade de mineração multinacional. Segundo Garza-Reyes et al. (2018), a pesquisa sobre esse tema ainda é considerada limitada, quando comparada à vasta quantidade de estudos focados no VSM tradicional, encontrados na literatura acadêmica. O estudo conclui que a ferramenta E-VSM pode ser aplicada para identificar, quantificar e reduzir simultaneamente os resíduos operacionais ambientais, além dos desperdícios 'tradicionais' como estoque, atrasos na configuração e quebras.

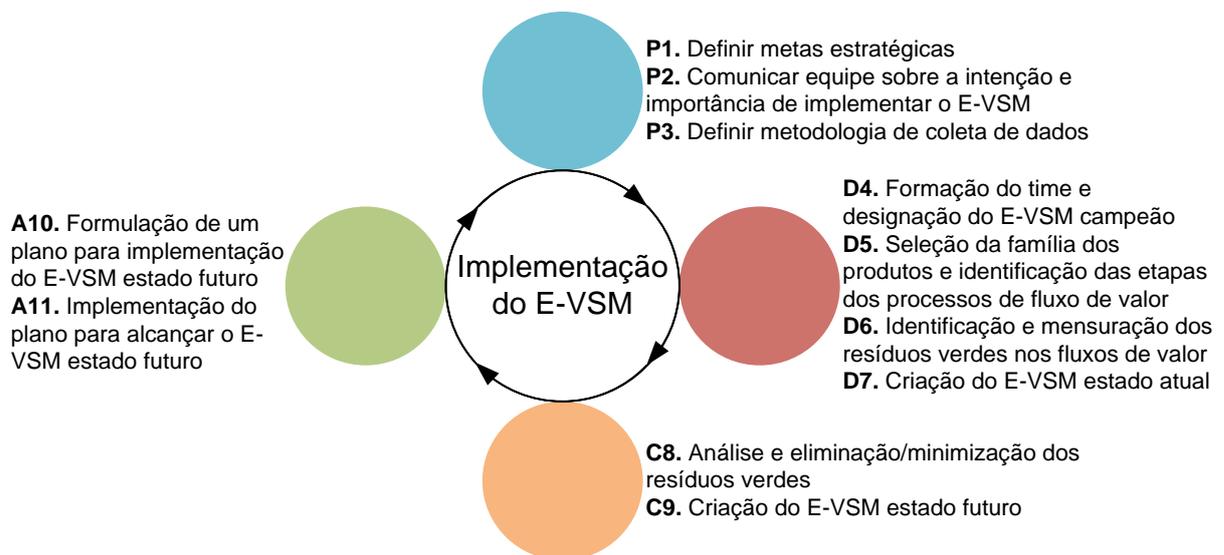


Figura 5. Abordagem baseada em PDCA para a implementação do *Environmental Value Stream Mapping* (E-VSM). Fonte: Garza-Reyes et al. (2018).

Um estudo desenvolvido por Mishra et al. (2019) analisou o estado atual do VSM de uma indústria de fabricação de bonés e apresentou como proposta a

otimização do processo por meio de simulações, projetando um VSM para o estado futuro. Os pesquisadores propuseram um VSM combinado ao software de simulação Arena (recurso para modelagem de processos, análise estatística e análise de resultados), apontando que muitos estudos são inconsistentes e falham na busca pela integração do VSM com abordagens de simulação. Buscou-se ainda analisar se os resultados podem se configurar como uma ferramenta concreta não apenas para a eliminação de desperdícios operacionais, tais como superprodução, processamento excessivo, estoque e defeitos, mas também para a promoção de características mais sustentáveis nos produtos. Isso significa que a fabricação deve ser realizada com o objetivo de minimizar o impacto ambiental e esse tipo de integração da manufatura enxuta e sustentabilidade é crucial para as organizações. A metodologia utilizada baseia-se na formulação do VSM: a principal ferramenta utilizada para identificar as oportunidades de classificação e eliminação de gargalos no fluxo produtivo com o auxílio de diversas técnicas da manufatura enxuta. Os resultados do estudo de Mishra et al. (2019) indicaram uma redução nos custos (produção com redução de 30% no tempo de ciclo) e nos impactos ambientais (diminuição da pegada de carbono, considerando todo o processo para 83,7%). Destaca-se a importância da aplicação combinada da metodologia, usando um estudo de caso real como base para avaliar certas características e poder provar a viabilidade prática de implementação. A situação fabril da empresa foi observada através da comunicação constante com seus colaboradores. A partir dos resultados obtidos, pode-se dizer que a empresa certamente colheria os benefícios por meio do uso do VSM com foco na sustentabilidade.

Considerando que os indicadores atuais do VSM não incluem os fatores sociais e ambientais, Helleno et al. (2017) consideraram um modelo de desenvolvimento de gestão sustentável. Em seus estudos, entre 2009 e 2014, foi proposto um método conceitual para preencher a lacuna em decorrência da falta de abordagem ambiental e social no VSM. O método foi aplicado em três estudos de caso, identificando diferentes níveis de sustentabilidade dos processos de manufatura, e os resultados contribuíram para a literatura com a proposição de novos indicadores de sustentabilidade relacionados ao processo fabril, apresentando um novo grupo de indicadores de sustentabilidade em diferentes processos de fabricação.

Um estudo desenvolvido por Junior et al. (2018) abordou a evolução do conceito de sustentabilidade em sistemas de fabricação, destacando a transformação dos modelos de gestão em resposta às demandas da sociedade. Os autores propuseram um modelo de avaliação de sustentabilidade, baseado em uma matriz de correlação entre as dimensões ambientais, econômicas e sociais e as perspectivas do *Balanced Scorecard*. O modelo permitiu uma avaliação abrangente e detalhada de sistemas de fabricação, além de possibilitar a definição de indicadores para cada correlação. O modelo foi aplicado em uma indústria brasileira do setor de alimentos e bebidas e mostrou-se importante para a definição de indicadores de desempenho para avaliação da sustentabilidade e na integração com métodos de decisão multicritério para aprimorar a sustentabilidade organizacional. A ferramenta proposta pelos pesquisadores mostrou a redefinição de estratégias e governança impulsionando o crescimento e a competitividade de empresas. Houve a necessidade de explorar melhor os indicadores e a natureza singular do estudo de caso.

Segundo Mohamad et al. (2019), os processos convencionais do VSM poderiam melhorar o desempenho da sustentabilidade, da rentabilidade, além de promover outros benefícios. No entanto, não leva em consideração as métricas ambientais e sociais ao mesmo tempo. Os autores desenvolveram uma nova métrica VSM, incluindo a produção mais limpa, conhecida como VSM de produção mais limpa. Um estudo aplicando o novo VSM foi realizado em uma indústria de cromagem na Malásia, e verificou-se que a métrica proposta provou ser um processo eficiente de visualização das práticas de manufatura enxuta e capaz de promover um desenvolvimento em relação à sustentabilidade.

De acordo com Gholami et al. (2019), uma metodologia denominada VSM Social ou Socio-VSM possibilitou visualizar e avaliar o desempenho em sustentabilidade da manufatura por meio de indicadores no âmbito social. A abordagem incluiu uma proposta para medir a ergonomia física do local de trabalho, avaliando os riscos físicos que podem impactar os funcionários. Dentre os indicadores utilizados estão: *Occupational Safety and Health* (NIOSH) *Lifting*, Índice de Carga Física (ICF/IPI), Nível de Ruído, Avaliação Rápida de Corpo Inteiro (ARCI/REBA), Avaliação Rápida dos Membros Superiores (ARMS/RULA) e o Círculo EHPS, composto por quatro categorias de risco: Riscos causados por sistemas elétricos (E), Químicos/Materiais Perigosos Utilizados (H), Sistemas Pressurizados (P) e

Componentes de Alta Velocidade (S). A aplicação dessas métricas foi evidenciada em um estudo de caso, destacando a capacidade do VSM como ferramenta para determinar e reduzir os impactos sociais negativos na indústria. Outras contribuições dessa pesquisa foram: oferecer diretrizes para a busca de melhoria futuras por parte dos gerentes de operações, e a motivação de acadêmicos e de pessoas envolvidas na indústria para a condução de mais pesquisas nesse campo ainda pouco estudado.

Dois abordagens para selecionar um conjunto de indicadores relacionados à sustentabilidade foram propostas por Hristov e Chirico (2019), com o objetivo de torná-las parte integrante das estratégias das empresas. A primeira abordagem refere-se à revisão sistemática da literatura para identificar os Indicadores Chave de Performance (KPIs), que devem ser utilizados por gestores no desenvolvimento das estratégias de desempenho para alcançar a sustentabilidade nas empresas. A segunda baseia-se em entrevistas com gerentes industriais dotados de larga experiência prática, baseando-se no uso de um *Balanced Scorecard*, que apresenta em seu material várias métricas de sustentabilidade a serem utilizadas de maneira integrada nas gestões estratégias dessas lideranças. De forma geral, alguns indicadores incluídos na revisão podem ser destacados, como a redução de emissões de gases de efeito estufa e no consumo de recursos naturais para os indicadores ambientais, participação das iniciativas sociais e manutenção da responsabilidade em alto nível para o aspecto social, e, por fim, melhorar e garantir a qualidade dos processos para o aspecto econômico.

Um estudo de revisão sobre a manufatura sustentável, realizado por Faulkner e Badurdeen (2014), mostrou que apesar da grande quantidade de métricas de sustentabilidade disponíveis, há uma dificuldade na visualização de forma clara das métricas utilizadas no VSM. A Tabela 2 mostra os resultados encontrados pelos autores em relação à dificuldade de entendimento quando se incorporam os indicadores de sustentabilidade na ferramenta.

Tabela 2. Sumário de fontes da literatura sobre o VSM com foco na sustentabilidade

Ferramenta	Métricas Ambientais	Métricas Sociais	Visualização <sup>a</sup>	Método <sup>b</sup>	Fonte
<i>Sustainable VSM (SVSM)</i>	√ (parcial)	***	***		Simons e Mason, 2002
<i>EPA Lean and Environmental Toolkit</i>	√	***	***	***	USEPA, 2007a
<i>EPA Lean and Energy Toolkit</i>	√ (ênfase em energia)	***	***	***	USEPA, 2007b
<i>Environmental VSM (E-VSM)</i>	√ (Foco na água)	***	***	(não está claro)	Torres e Gati, 2009
<i>Sustainable Value Chain Map (SVCM)</i>	√	***	***		Fearne e Norton, 2009
<i>Sustainable Manufacturing Mapping (SMM)</i>	√	***	***	***	Paju et al., 2010
<i>Energy &amp; Environment VSM (EE-VSM)</i>	√ (parcial)	***	***		Kuriger e Chen, 2010
<i>Lean Sustainable Production Assessment Tool</i>	√	***	***	***	Kuriger et al., 2011
<i>Green VSM</i>	√	***	***	***	Dadashzadeh e Wharton (2012)

Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014). O sinal '√' indica que o aspecto específico foi abordado no artigo estudado, enquanto o sinal '\*\*\*' indica que o artigo não abrange esse aspecto.

<sup>a</sup> métodos para medir os diferentes indicadores; <sup>b</sup> visualização clara dos indicadores escolhidos.

Para evitar redundância, Faulkner e Badurdeen (2014) recomendaram o uso mínimo de métricas, porém funcionais. Outro ponto abordado no estudo é que, ao contrário do que ocorre quando se avaliam as métricas econômicas, diferentes métricas ambientais e sociais podem ser utilizadas no VSM sustentável, dependendo do setor industrial mapeado. Dessa forma, métricas consideradas adequadas para um determinado setor podem não ser para outros como, por exemplo, em casos de fabricação de produtos metálicos, produtos químicos e produção de alimentos. Os autores concluíram que a grande maioria dos esforços para modificar o VSM centrou-se na adição de métricas relacionadas com a energia ao VSM, enquanto vários outros estudos referem-se ao VSM sustentável, mas limitam-se a ênfase apenas ao desempenho ambiental, além disso, a avaliação da sustentabilidade social, e os métodos de visualização para apresentar as informações no VSM não são abordados. Além da revisão realizada e considerando as lacunas nela identificadas, os autores propuseram o Sus-VSM (*Sustainable Value Stream Mapping*), desenvolvido para avaliar o desempenho ambiental e social de uma linha de produção. O Sus-VSM inclui métricas essenciais para sustentabilidade, com símbolos visuais para clareza, e destina-se a ser aplicável em vários setores industriais, embora possa requerer adaptações específicas para certos setores, como processamento químico ou produção de alimentos. Segundo os pesquisadores, o Sus-VSM não é uma ferramenta

final de avaliação, mas sim um ponto de partida para identificar áreas de melhoria, que podem ser analisadas mais detalhadamente com outras ferramentas. Foi sugerido que investigações futuras, especialmente através de estudos de caso da indústria, pudessem ajudar a avaliar a viabilidade da utilização da ferramenta no nível da cadeia de abastecimento e identificar as modificações necessárias.

O VSM convencional não considera diretamente o desempenho ambiental ou social das linhas de produção, e o VSM Sustentável (Sus-VSM) é uma extensão proposta do VSM convencional, incorporando métricas para sustentabilidade. Brown et al. (2014) consideraram a sugestão de avaliar o Sus-VSM proposto por Faulkner e Badurdeen (2014), aplicando a ferramenta detalhadamente em três estudos de caso para avaliar a amplitude de aplicabilidade do Sus-VSM. O primeiro estudo de caso foi conduzido em um fabricante de antenas parabólicas automatizado, com alto volume e baixa variedade. O segundo estudo de caso abrangeu um fabricante de conjuntos de cátodos dispensadores. Nesse caso, a fabricação é customizada e de baixo volume. Finalmente, o terceiro estudo de caso examinou os processos em um fabricante contratado e dedicado de *flow shop* (sistema de produção projetado para lidar com um grande volume de peças idênticas, em que as tarefas possuem a mesma sequência de processamento). Da mesma forma que o primeiro estudo, esse caso reforça a demonstração do Sus-VSM num cenário onde o VSM normalmente poderia ser valioso como uma ferramenta de manufatura enxuta. De forma geral, os três estudos de caso realizados revelaram que informações sobre o desempenho de sustentabilidade dos sistemas de produção podiam ser obtidas através do Sus-VSM, independentemente da natureza da configuração do sistema. Além da relação valor agregado, que também pode ser discernida através do VSM tradicional, o uso do Sus-VSM permite avaliar o consumo de energia, o uso de água, o uso de matérias-primas, bem como aspectos sociais, como o nível de exposição a riscos relacionados ao ambiente de trabalho e aspectos ergonômicos. Esses critérios podem ser avaliados no processo individual, e por peça, para identificar oportunidades de melhoria da sustentabilidade dentro de uma empresa. Segundo os autores, seria benéfico trabalhos futuros para identificar métricas ou técnicas de normalização, que permitissem a comparação direta de estudos de caso; outros estudos de caso especificamente selecionados pela indústria também poderiam ser usados para gerar padrões generalizáveis que poderiam levar ao desenvolvimento de teorias.

Assim como o trabalho de Brown et al. (2014), o estudo de Jamil et al. (2020) levou em consideração a aplicação do VSM sustentável (Sus-VSM) desenvolvido por Faulkner e Badurdeen (2014). Segundo os pesquisadores, a investigação sobre VSM sustentável tem sido confinada a poucos estudos. Para Jamil et al. (2020), a falta de um processo de melhoria contínua, em que possam ser estabelecidos mapas de desenvolvimento do fluxo de valor subsequentes para continuar o ciclo, é destacada como uma deficiência notável da aplicação do Sus-VSM. Dessa forma, buscou-se preencher a lacuna, propondo uma abordagem metodológica, baseada no ciclo de melhoria DMAIC, para implementar e conduzir sistematicamente estudos Sus-VSM. A metodologia proposta foi aplicada em um caso industrial real. Os resultados revelaram que uma abordagem baseada no DMAIC pode ser eficazmente aplicada rumo à produção sustentável, permitindo a implantação do Sus-VSM em um ciclo sistemático, repetível e contínuo de melhoria. Os autores concluíram que certos setores podem exigir as suas próprias métricas personalizadas, havendo uma possível limitação da ferramenta proposta. Esforços adicionais por meio de estudos de caso e aplicação a outros setores industriais poderiam ajudar a criar um portfólio de métricas de sustentabilidade setor a setor, conforme necessário.

A Tabela 3 mostra um estudo de caso na indústria apresentado por Lu et al. (2011), evidenciando que as métricas de sustentabilidade são agrupadas em seis diferentes *clusters*, para avaliar o desempenho ambiental do sistema. Essa classificação por *clusters* possibilita uma melhor identificação das métricas ambientais e sociais incluídas no VSM sustentável. Os resultados encontrados por Lu et al. (2011) mostraram que para os setores industriais de máquinas, equipamentos elétricos e eletrônicos, apesar de um melhor resultado econômico, houve maior carga ambiental em relação aos demais setores analisados. Esse estudo forneceu informações para políticas ambientais da China, mostrando que paralelamente às realizações econômicas dos aglomerados industriais, há também a geração de impactos ambientais devido ao consumo excessivo de recursos naturais e um alto índice de poluição ambiental durante o processo industrial.

Tabela 3. Clusters de processos de manufatura sustentáveis.

Impacto Ambiental	Consumo de Energia	Custo
Emissão de GEE do consumo de energia da linha (ton CO <sub>2</sub> eq./unidade)	Consumo de energia em linha (kWh/unidade)	Custo de mão-de-obra (\$/unidade)
Proporção de energia renovável utilizada (%)	Consumo de energia na manutenção do ambiente da instalação (kWh/unidade)	Custo pelo uso de energia (\$/unidade)
Consumo total de água (ton/unidade)	Consumo de energia para transporte de entrada/saída da linha (kWh/unidade)	Custo dos consumíveis (\$/unidade)
Massa de descartes restritos (kg/unidade)	Proporção de uso de energia renovável (%)	Custo de manutenção (\$/unidade)
Nível de ruído fora da fábrica (dB)		Custo do tratamento de subprodutos (\$/unidade)
Segurança do Operador	Saúde Pessoal	Gestão de Resíduos
Exposição a produtos químicos corrosivos/tóxicos (incidentes/pessoa)	Contaminação química do ambiente de trabalho (mg/m <sup>3</sup> )	Massa de consumíveis descartados (kg/unidade)
Exposição a componentes de alta energia (incidentes/pessoa)	Nível de névoa/poeira (mg/m <sup>3</sup> )	Proporção de reutilização de consumíveis (%)
Taxa de lesões (lesões/unidade)	Nível de ruído dentro da fábrica (dB)	Massa de geração de névoa (kg/unidade)
	Índice de carga física (adimensional)	Massa de cavacos e aparas descartados (kg/unidade)
	Taxa de absentéismo relacionada à saúde (%)	Proporção de cavacos e aparas reciclados (%)

Fonte: Lu et al., 2011.

Um estudo de revisão foi realizado por Ahmad et al. (2018) para identificar indicadores econômicos, sociais e ambientais. Concentrando-se em estudos

recentes, publicados de 2007 a 2017, a pesquisa em literatura resultou em um levantamento de 144 indicadores, sendo 63 ambientais, 26 econômicos e 55 sociais, dos quais 34% desse total (49) foram utilizados em processos industriais em países no mundo, com ênfase maior nos desenvolvidos. Para a obtenção dos indicadores o foco dos termos de busca foi indicadores, métricas e medidas de desempenho. Como resultado, houve indicadores fundamentais no âmbito ambiental para mensurar os impactos relacionados à quantidade de material utilizado, à energia utilizada e às emissões atmosféricas. No âmbito econômico indicadores baseados em custos, e no âmbito social, indicadores relacionados à segurança e bem-estar dos colaboradores, incluindo a comunidade local e a sociedade.

Lee et al. (2021) realizaram um estudo de revisão sistemática de literatura para identificar oportunidades e gaps científicos em relação ao *Value Stream Mapping* (VSM), incluindo os aspectos de sustentabilidade. Os autores relataram que (i) a maioria das investigações sobre a implementação do VSM, orientada para a sustentabilidade, concentrou-se nos aspectos econômicos e ambientais, assim mais estudos são necessários para investigar o pilar social nessa aplicação orientada para a sustentabilidade; (ii) vários artigos não empregaram o mapa VSM, e a maioria dos outros estudos apenas retratou o mapa do estado atual, ou seja, a recomendação era ilustrar mapas do estado atual e futuro para melhor visualizar e compreender a aplicação do VSM, orientada para a sustentabilidade; e (iii) mais estudos são necessários para identificar e envolver as partes interessadas para evitar qualquer incerteza, durante a implementação da aplicação do VSM para a sustentabilidade, uma vez que a incerteza é uma questão para os decisores e os decisores políticos. Por fim, o estudo propôs um conjunto de indicadores para a implementação do VSM voltado para a sustentabilidade. Contudo, há uma carência evidente e a necessidade de avanços para alcançar perspectivas mais significativas. Sugere-se a realização de pesquisas, que contribuam para a definição ponderada de cada critério, incluindo o cálculo preciso da ponderação para obter indicadores claros, bem como a elaboração de orientações detalhadas sobre a utilização de cada indicador, conforme o tipo de processo, sua aplicação e os objetivos dos decisores, visando assegurar a sustentabilidade operacional.

Como o trabalho anterior, Batwara et al. (2023) realizaram uma revisão de literatura para identificar os gaps científicos em relação aos estudos de VSM

modificados. Segundo os autores, a maior parte do estudo focou nas questões ambientais e econômicas, e os componentes sociais têm sido negligenciados. Ainda, identificaram que a manufatura enxuta não considera os efeitos das modificações do processo na força de trabalho. O impacto da aplicação estrita da manufatura enxuta não é sentido, nem os riscos ergonômicos são a iniciativa de encorajar pesquisadores e profissionais a adotarem diferentes aspectos sociais do VSM. A principal recomendação dos pesquisadores foi para que estudos futuros considerassem o desempenho da sustentabilidade social na indústria.

O estudo realizado por Verma et al. (2021) teve como objetivo propor um Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) para ser utilizado na indústria de manufatura, combinando as metodologias *Lean*, *Energy* e *Six-Sigma*. Para identificar a máxima rejeição ou retrabalho em uma estação de trabalho, os autores desenvolveram um modelo matemático baseado em entropia e apresentaram um Mapeamento de Fluxo de Valor *Lean-Energy-Six Sigma* (LESSVSM). O modelo foi implementado em um sistema de manufatura contendo quatro estações de trabalho. A aplicação do LESSVSM no estudo de caso apresentado no estudo de Verma et al. (2021) sugeriu que o LESSVSM pode ser usado na indústria para alcançar uma fabricação sustentável com melhoria de processos, redução de custos, economia de energia e minimização de desperdícios. Com as devidas modificações de acordo com o tipo de processo, tipo de produto, tipo de defeitos etc., o modelo LESSVSM tem potencial para ser implementado em qualquer indústria. Os resultados mostraram ainda que o número de retrabalhos ou produtos rejeitados não só aumenta o custo de produção, mas também representa um impacto negativo para a sociedade em termos de energia e desperdício (em caso de rejeição). Os resultados mostraram que a energia utilizada durante as fases 2 e 4 ou a energia utilizada numa fase de remodelação e rejeição contribui para um aumento nos custos de produção. Segundo os pesquisadores, o modelo LESSVSM proposto ajudará a indústria a tornar-se mais sustentável, pois pode minimizar a energia e o desperdício em caso de retrabalho e rejeição. Por outro lado, a abordagem dos pesquisadores baseia-se quase exclusivamente no pensamento da manufatura enxuta, e para mostrar a sustentabilidade, uma análise mais sistêmica incluindo novos aspectos ambientais e indicadores sociais é necessária.

Reconhecendo que o impacto ambiental de um sistema de produção está associado ao consumo dinâmico de energia e recursos, a análise do VSM é estática e orientada para um único produto. Apesar de recentes integrações do VSM com simulação ou estudos ambientais (no domínio da eficiência energética), ainda é negligenciada a avaliação dinâmica de todos os recursos envolvidos num ambiente de produção multiproduto. Por esse motivo, Alvandi et al. (2016) desenvolveram uma metodologia para modelagem de sistemas de manufatura multiprodutos com fluxos dinâmicos de materiais, energia e informações, com o objetivo de gerar mapas de fluxo de valor econômico e ambiental (E<sup>2</sup>VSM). Os autores aplicaram a ferramenta a um estudo real de fabricação multiproduto, que produz sapatas de freio e pastilhas de disco compostas para a indústria ferroviária com o propósito de validar a ferramenta. No estudo, foram realizadas análises hipotéticas e as oportunidades de melhoria no nível da cadeia de processos (estado futuro) foram avaliadas e comparadas com o estado atual da cadeia de processos. Como resultado, o roteamento alternativo de produtos pode ser facilmente avaliado durante a análise hipotética, segundo os pesquisadores. Esse recurso de facilidade de uso é válido para todas as outras entradas do modelo usando interface de planilha, como potência da máquina e plano de produção. Em relação à configuração dos processos individuais, valores constantes para cada estado operacional (demanda de energia e tempos de produção) foram utilizados. Devido à plataforma de modelagem flexível, outras opções de configuração da máquina, como o uso de funções de distribuição de probabilidade ou equações matemáticas, foram possíveis. Segundo os autores, uma vez construída a simulação E<sup>2</sup>VSM, ela é fácil de usar e modificar, mesmo sem ter conhecimento especializado em simulação. Contudo, como já afirmado por outros pesquisadores, o aspecto social foi negligenciado, requerendo mais esforços em trabalhos futuros.

O trabalho de Sultan et al. (2021) abordou a otimização da sustentabilidade nas operações de *downstream* da cadeia de surimi (alimento feito à base de carne ou pasta de peixes brancos) na Índia, utilizando o VSM modificado para identificar e eliminar desperdícios, com base na integração dos princípios da manufatura enxuta e análise ambiental. Constatou-se que a cadeia de suprimentos com integração vertical completa reduziria 74,52% do tempo de lead, 79,68% das emissões e 81,66% do consumo de energia em comparação com o estado atual. Houve uma redução de 80% nos custos de energia, uma diminuição de 62,5% nos custos operacionais e um

aumento de 87,41% nos lucros sob a integração vertical completa. Esses resultados indicam não apenas benefícios financeiros significativos, mas também uma redução no impacto ambiental, destacando a importância da integração da sustentabilidade na cadeia de suprimentos de surimi para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento do mapeamento do fluxo de valor integrado aos custos (CVSM) como uma ferramenta de avaliação enxuta para identificar desperdícios no processo de produção foi apresentada por Rajesh Menon et al. (2021). No VSM convencional, o tempo envolvido em diversos processos é mapeado sem rastrear o acúmulo de custos diretos e indiretos, enquanto no CVSM proposto pelos autores, o custo de produção é contabilizado, juntamente com o domínio do tempo do mapeamento convencional do fluxo de valor. O investimento de tempo do custo também está incorporado no CVSM. Os custos com valor agregado e sem valor agregado podem ser facilmente reconhecidos na escala de tempo. Segundo os autores, uma equipe de engenheiros e gestores foi formada para implementar o CVSM. Foram coletados dados e um diagrama de fluxo em processo, transações de informações como previsões de vendas e compras e pedidos, fluxo de materiais, tempo de espera entre processos, tempo de atividade e número de operadores para cada processo. Diversos custos, incluindo operacionais, de recursos, materiais, depreciação de máquinas, manutenção e atividades também foram coletados para todas as atividades selecionadas. Esse novo método ajuda a calcular o valor agregado em termos monetários e o custo real de produção dos processos é reconhecido com precisão. Como o desperdício é quantificado no domínio dos custos, os processos em que as ferramentas de manufatura enxuta precisam ser implementadas podem ser identificados. Diferente de muitos trabalhos que fazem uma aplicação de um VSM modificado, esse trabalho traz em seu escopo o detalhamento dos estados atual e futuro do VSM, incluindo o aspecto custo. Por outro lado, o foco ainda é no aspecto econômico.

De forma geral, a revisão da literatura mostra que esforços vêm sendo feitos para desenvolver um VSM sustentável, incluindo características além das econômicas, como sociais e ambientais. Muitos estudos relatam que é necessário mais avanço para encontrar uma ferramenta robusta, integrando os conceitos de sustentabilidade e aplicabilidade prática. A maioria dos trabalhos focou em

desenvolver um VSM ambiental, esquecendo do aspecto social. Os poucos estudos que abordaram a sustentabilidade no VSM, ainda precisam de mais detalhamento dos métodos e indicadores utilizados, para que sua replicabilidade seja possível. Assim, mais avanços são demandados na busca pelo VSM sustentável.

### **5.3. Modelo de Sustentabilidade dos Cinco Setores (5SEnSU)**

De acordo com Goodland e Daly (1996), para que os sistemas antrópicos possam continuar a produzir e prosperar, uma visão sistêmica é necessária para entender as relações existentes entre o homem e a natureza. Segundo os autores, a natureza atua de duas maneiras para sustentar o desenvolvimento humano: (i) como fornecedor de recursos (energia, solo fértil, água, minerais, madeira, carvão, petróleo, etc.), e (ii) como um sumidouro de subprodutos com a função de reduzir sua concentração (chamado de depuração natural). Nessa visão biofísica das relações entre processos, o modelo de sustentabilidade baseia-se no entendimento e respeito dos limites biofísicos do Planeta para suportar o crescimento, como defendido no estudo de Georgescu-Roegen (1971). A ideia principal é a de que o desenvolvimento social e econômico somente poderia ser alcançado se o capital natural for preservado, mantendo sua biocapacidade. Entre outros, métodos que consideram esse modelo biofísico para discutir sobre sustentabilidade são a Pegada Ecológica (Wackernagel e Rees, 1996) e a Síntese em Emergia (Odum, 1996).

Outros modelos conceituais de sustentabilidade reconhecem que as três dimensões (ambiental, social e econômica) possuem similar importância, sendo muitas vezes complementares e/ou parcialmente substituíveis. Com foco nesta perspectiva, o Stockholm Resilience Centre (2023) utilizou os ODS da ONU como uma proposta de modelo de sustentabilidade considerando as três dimensões. O modelo entrada-estado-saída discutido em Pulselli et al. (2015) entende que todos os sistemas produtivos no planeta são sistemas abertos, com fluxo de material, energia e informação entre os setores ambiental, social e econômico.

Um outro modelo considerado como avanço sobre o modelo entrada-estado-saída relatado proposto por Pulselli et al. (2015) é o chamado modelo de sustentabilidade dos cinco setores (5SEnSU; Giannetti et al., 2019), reconhecendo as funções de doador e receptor dos setores ambiental e social, utilizando um modelo conceitual multicritério para auxiliar na avaliação quantitativa do desempenho em

sustentabilidade de sistemas. Essa e outras características do 5SEnSU valida-o como um modelo conceitual de sustentabilidade, tornando a discussão mais robusta, ao invés de se basear em conceitos vagos e sem a devida sustentação científica.

O modelo 5SEnSU utiliza uma abordagem multicritério com diferentes escalas e diferentes métricas na avaliação dos indicadores redistribuídos, conforme apresentado na Figura 6, em cinco setores, sendo dois setores ambientais compostos pelo setor 1: meio ambiente fornecendo recursos (S1), e pelo setor 2: meio ambiente recebendo resíduos (S2), um setor econômico composto pelo setor 3: unidade de produção representando a economia (S3), dois setores sociais compostos pelo setor 4: sociedade fornecendo recursos (S4), e pelo setor cinco 5: sociedade recebendo recursos (S5). Além disso, metas são definidas para cada indicador analisado. Em relação à definição das metas para os indicadores, essas podem ser definidas por meio de práticas de *benchmarks* como prioridade, porém podem também ser consideradas tomando-se como base os valores médios dos indicadores na amostra (ou outra variável estatística) como considerado por Dos Santos et al. (2022). Os fluxos econômicos representados pelas linhas tracejadas existem exclusivamente no lado direito do modelo, mostrando as trocas entre os setores econômicos e sociais.

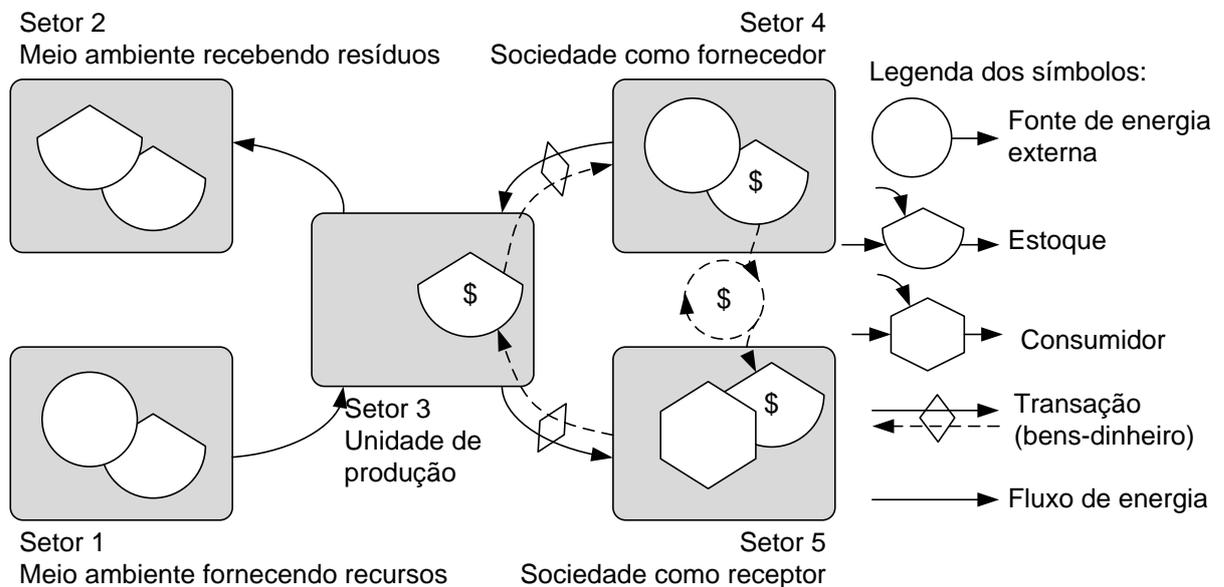


Figura 6. Modelo dos cinco setores de sustentabilidade (5SEnSU) representado na simbologia de energia.

Basicamente, o 5SEnSU fornece uma estrutura para alocar indicadores em setores ambientais, econômicos e sociais, incorporando os três pilares da

sustentabilidade. O aspecto quantitativo do modelo 5SEnSU é baseado na filosofia da programação por metas e depende da definição prévia de pesos, metas e punições para os indicadores para, posteriormente, fornecer o Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS), representando o desempenho em sustentabilidade. Exemplos de aplicação do 5SEnSU podem ser encontrados, entre outros, na avaliação da sustentabilidade da produção de arroz em Brasil e Cuba (García et al. 2021), no estudo de Dos Santos et al. (2022; 2023), avaliando a relação entre economia circular e sustentabilidade de nações, e no trabalho de Giannetti et al. (2022) que avaliaram estações de tratamento de água e esgoto no Brasil.

A concepção do 5SEnSU é baseada em seis axiomas básicos, sendo três deles referentes aos limites dos recursos naturais em relação às suas taxas de exploração e consumo para garantir os padrões atuais de desenvolvimento, oriundos do trabalho de Goodland (1995) e Goodland e Daly (1996), e os outros três axiomas, sugeridos por Giannetti et al. (2019). O modelo 5SEnSU compreende multicaracterísticas tais como: (i) a multidimensionalidade, considerada uma característica importante por abranger dimensões sociais, ambientais e econômicas, (ii) a capacidade de ser um modelo que pode assumir pontos de vista tanto no âmbito ambiental, quanto social e econômico, (iii) os indicadores aplicados ao modelo são geralmente multimétricos (por exemplo, indicadores de energia, volume, massa, monetário, trabalho, força e outros), e (iv) a abordagem multicritério pode ser vista como uma característica importante do modelo 5SEnSU, uma vez que uma combinação ilimitada de indicadores com diferentes pesos, metas e punições pode ser aplicada.

O modelo 5SEnSU utiliza a filosofia da programação por metas para permitir a quantificação da sustentabilidade sob uma perspectiva multicritério, capaz de atribuir as multifunções dos setores. O modelo estuda as relações entre os seres humanos e o meio ambiente, e para tanto a escolha dos vários indicadores para os cinco setores é feita com base em critérios definidos, nas funções de doador e receptor de recursos ambientais e sociais.

### **5.3.1. Estudos que utilizaram o modelo 5SEnSU**

Mesmo sendo proposto em 2019 e considerado relativamente novo, o 5SEnSU vem sendo utilizado em diversos estudos. Por exemplo, Agostinho et al. (2019) propuseram uma estrutura que fornece os passos para a avaliação de

sustentabilidade denominada Procedimento de Avaliação de Sustentabilidade para Processos de Operações e Produção (SUAPRO), apoiada pelo método de gestão de quatro etapas PDCA (planejar, fazer, verificar e agir) e pelo modelo 5SEnSU. O SUAPRO foi aplicado em modais de transporte rodoviário e ferroviário para exportação da soja no Brasil, como estudo de caso, sendo incluído na análise um conjunto de dez indicadores (dois para cada setor do 5SEnSU). Os autores definiram as metas para os indicadores considerando os valores mínimos ou máximos de cada indicador e considerando o seu objetivo final de maximização ou minimização; contudo, reforçaram que outras abordagens poderiam ser consideradas na definição de metas, como reuniões participativas, baseado em relatórios científicos ou governamentais, ou mesmo os *thresholds* (quando existentes) para cada indicador. Os resultados mostraram que o modal ferroviário apresentou melhor desempenho para o Indicador Sintético de Sustentabilidade do Sistema (SSIS de  $3,6 \pm 0,4$ ) do que o modal rodoviário (SSIS de  $4,0 \pm 0,3$ ).

Uma avaliação da sustentabilidade das vinte maiores companhias de tratamento de água e esgoto no Brasil foi realizada, empregando o 5SEnSU por Giannetti et al. (2022). Dez indicadores foram considerados na avaliação e suas metas definidas como: o valor mínimo mais o desvio padrão (quando se busca minimizar) e a média mais o desvio padrão (quando se busca maximizar o indicador) de todos os valores dos indicadores da amostra de vinte sistemas avaliados. Os autores ranquearam as companhias de acordo com o seu desempenho em sustentabilidade, identificando a CORSAN, CASAN e SANEPAR como as três principais empresas comparativamente mais sustentáveis, devendo ser consideradas exemplos de melhores práticas. Além disso, fez-se uma discussão de cada setor do 5SEnSU individualmente, possibilitando uma análise mais detalhada de onde se deveria focar na busca por maior sustentabilidade nas companhias de água.

García et al. (2021) avaliaram a sustentabilidade da produção de arroz no Brasil e em Cuba aplicando o modelo 5SEnSU. As análises mostraram que o desempenho para o Brasil é superior ao de Cuba, em termos de sustentabilidade da cadeia produtiva do arroz, com base em um melhor equilíbrio ambiental, econômico e social avaliado pelo SSIS. Os resultados mostraram que o melhor desempenho em sustentabilidade apresentado pelo Brasil (SSIS de 9.290) está baseado em melhor disponibilidade de recursos ambientais para o cultivo do arroz, menor carga ambiental

relativa, melhor desempenho econômico e produtivo, e maior satisfação da demanda social por arroz. Os resultados para Cuba (SSIS de 17.729) revelaram um déficit de recursos ambientais, maior carga ambiental relativa, baixo desempenho econômico e produtivo, por outro lado melhores políticas de empregos e salários. Os resultados comparativos foram apresentados em um diagrama de radar para facilitar a visualização entre o resultado de cada indicador em relação às metas estabelecidas, auxiliando no entendimento comparativo dos sistemas (qual possui maior sustentabilidade), e em que indicadores tem-se melhor ou pior desempenho para auxiliar na gestão.

Em outro estudo, Nascimento et al. (2022) avaliaram o desempenho econômico-ecológico da produção orgânica de frangos de corte sob a perspectiva da programação por metas, comparando os resultados com um sistema comercial convencional de produção de frangos de corte. Dois indicadores foram selecionados para cada setor do modelo 5SEnSU. Os resultados mostraram uma correlação entre o bem-estar animal com os custos econômicos e ambientais. Em relação ao desempenho em sustentabilidade, os resultados mostraram que o sistema de produção orgânica de frangos de corte possui em desempenho 1,14 vezes superior comparado ao sistema convencional.

O modelo 5SEnSU também foi utilizado, em outro estudo, para verificar a relação entre sustentabilidade e circularidade de três blocos econômicos, ASEAN, Mercosul e União Europeia. Nesse estudo, segundo Dos Santos et al. (2022), houve a combinação de indicadores de circularidade e socioeconômicos para avaliar a sustentabilidade dos blocos. Pelos resultados não foi possível concluir que a circularidade garante a sustentabilidade, entretanto, a circularidade contribuiu para alcançar o desenvolvimento sustentável. De forma paralela, os autores argumentam que a União Europeia tem um desempenho superior em sustentabilidade quando comparada à ASEAN e ao Mercosul, onde o consumo excessivo e o descarte de resíduos são desafios que necessitam de atenção. Por se tratar de um método multicritério, os pesquisadores destacaram que no uso do 5SEnSU podem existir limitações relacionadas à subjetividade inerente à escolha do tipo, à quantidade e aos pesos dos indicadores, devendo sempre serem apresentados de forma clara para aumentar a objetividade e a transparência nos resultados.

Em 2023, Dos Santos et al. (2023) integraram indicadores ambientais, econômicos e sociais no modelo 5SEnSU, para quantificar a sustentabilidade nos países do G20, entre 2000 e 2020. Diferente de outros estudos, os autores utilizaram quinze indicadores divididos entre os cinco setores do modelo (três para cada setor). Devido à falta de informações, apenas para quatro dos quinze indicadores foi possível estabelecer metas a partir de *benchmarks*, enquanto para os demais foram consideradas estatísticas da amostra. Os resultados mostraram que os países com melhor desempenho para a sustentabilidade em 2020, foram Canadá (melhor posição também em 2000), Austrália, Itália, Reino Unido e Estados Unidos, enquanto a Argentina, África do Sul, Índia, Indonésia e China apresentaram menor desempenho em sustentabilidade.

Ainda em avaliações de macro escala, Giannetti et al. (2023) discutiram sobre as armadilhas da pobreza existentes em Moçambique. Os autores usaram o modelo 5SEnSU, baseado na teoria das trocas de bens, serviços e impactos desiguais, quantificados pela síntese em energia. O estudo utilizou dados sobre a produção de bens de todos os setores produtivos em Moçambique, incluindo dados sobre trocas comerciais externas (exportações e importações de bens) para o ano de 2014. Ao aplicar o modelo 5SEnSU, destacou-se a importância do meio ambiente em sustentar diretamente grande parte da população moçambicana, além de mostrar que o país tem potencial de crescimento de acordo com os estoques de capital natural. Os autores sugeriram que Moçambique deveria criar mecanismos para melhorar a economia com políticas sustentáveis e focadas no bem-estar, reduzindo desigualdades e dependência ambiental, equilibrando a capacidade econômica com as capacidades ambiental e social.

O ASUPRO proposto por Agostinho et al. (2019) foi utilizado juntamente com o sistema de informação geográfica (GIS; *geographical information systems*) para quantificar a sustentabilidade da região do MATOPIBA no Brasil, de 1990 a 2018, sendo apoiado pelo modelo 5SEnSU. Nesse estudo, Agostinho et al. (2023) encontraram, para o MATOPIBA, um melhor desempenho em sustentabilidade em 2010 (3,63) e um pior desempenho em sustentabilidade em 2000 (4,71). Não foi possível concluir sobre uma tendência de aumento ou redução no desempenho geral da sustentabilidade do MATOPIBA, ao longo do tempo, devido ao comportamento randômico do SSIS ao longo dos anos. Os autores sugeriram que, em estudos futuros,

novas avaliações com dados a partir de 2018 fossem realizadas. Em uma análise mais detalhada do modelo 5SEnSU, os setores macroeconômico e social de sustentabilidade (como função provedora) do MATOPIBA estão aumentando ao longo dos anos.

Pierucci et al. (2023) aplicaram o modelo 5SEnSU para discutir sobre a sustentabilidade de cidades, estabelecendo um ranking entre as cidades e destacando aquelas que deveriam receber políticas públicas prioritárias, especificamente São Luiz do Paraitinga, Bauru e Miracatu. O estudo considerou uma amostra de 130 cidades do Brasil, incluindo as capitais, e utilizou, no modelo 5SEnSU, indicadores escolhidos com base no relatório anual de sustentabilidade de cidades da Plataforma Mandala ODS, elaborado pela Confederação Nacional de Municípios (CNM) e de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU.

Após a revisão da literatura sobre aplicações do modelo 5SEnSU, nos mais diferentes sistemas, pode-se perceber que o modelo tem como características apresentar as relações entre a sociedade e o ambiente natural, fornecendo uma estrutura para auxiliar na alocação de indicadores ambientais, econômicos e sociais, e representar de forma quantitativa o desempenho em sustentabilidade de sistemas por meio do SSIS. Uma das grandes vantagens do modelo 5SEnSU é o reconhecimento da dupla função de doador e de receptor para os setores representativos dos capitais ambiental e social. Existem outros modelos disponíveis em literatura, objetivando dar suporte para estudos de sustentabilidade, contudo, o modelo 5SEnSU possui as vantagens acima descritas sobre os demais modelos, incluindo sua abordagem multicritério e multifunções. De forma geral, todos os estudos que utilizaram o modelo 5SEnSU conforme citados nesta revisão consideraram pelo menos dois indicadores em cada setor do modelo, sempre fornecendo uma distribuição balanceada dos indicadores nos setores. Além disso, o estabelecimento de metas para os indicadores é uma tarefa dificultada pela falta de mais estudos e/ou banco de dados disponíveis.

## **6. CAPÍTULO 1: PROPOSTA DO MODELO DE MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR PARA SUSTENTABILIDADE (VSM4S)**

O VSM4S proposto neste estudo baseia-se nos mesmos procedimentos de cálculo do Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) tradicional de Rother e Shook (1999), incluindo aspectos relacionados ao aumento da lucratividade, eficiência operacional, qualidade e outros interesses econômicos da empresa manufatureira. Contudo, o VSM tradicional apresenta lacunas que podem ser superadas para alcançar maior sustentabilidade dentro da empresa, ao invés de focar apenas nos aspectos econômicos, que podem levar a um nível limitado de sustentabilidade, como previamente identificado e discutido por Simons e Mason (2002, apud Faulkner e Badurdeen, 2014, p. 10), Vinodh et al. (2016) e Helleno et al. (2017). Comparado ao VSM tradicional e outros esforços para desenvolver o VSM com foco na sustentabilidade (Norton e Fearne, 2009; Salvador et al., 2021; Cheung et al., 2017; entre outros), o VSM4S proposto neste estudo tem uma característica única, que consiste na inclusão de múltiplos indicadores, abrangendo aspectos econômicos, sociais e ambientais, fundamentados no modelo 5SEnSU. Posteriormente, uma abordagem multicritério baseada na filosofia da programação por metas é utilizada para calcular o Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS), representando o desempenho de sustentabilidade da empresa manufatureira que está sendo avaliada.

A Figura 7 apresenta o modelo VSM4S proposto, incluindo as etapas para sua correta aplicação. Inicialmente, aplica-se o VSM4S para o diagnóstico do estado atual, em que são escolhidos e calculados indicadores ambientais, sociais e econômicos do fluxo de produção avaliado, tendo como referência o modelo 5SEnSU, resultando no SSIS para o estado atual. Para o desenvolvimento do VSM4S no estado futuro, as etapas são semelhantes às do VSM4S no estado atual, mas inclui a etapa de criação de diferentes projetos Kaizen, que devem ser concluídos com base nos objetivos definidos no planejamento estratégico da empresa para os próximos doze meses. Uma vez que vários projetos Kaizen podem ser desenvolvidos, serão alcançados diferentes resultados no desempenho ambiental, social e econômico da empresa, resultando em diferentes SSISs. A Figura 7 é usada como referência para explicar as etapas de aplicação do VSM4S, conforme apresentado nas seções a seguir.

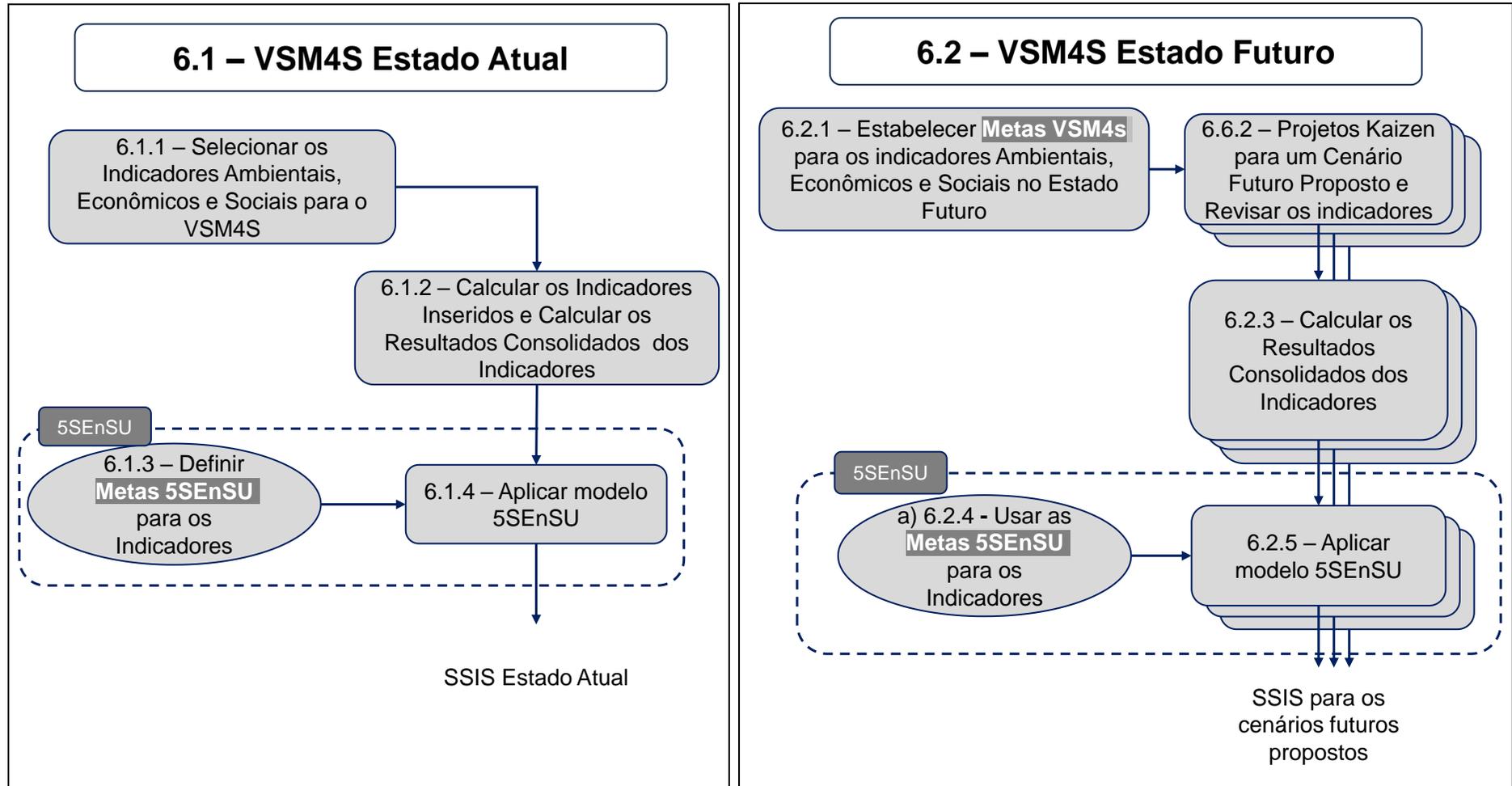


Figura 7. O modelo proposto *Value Stream Mapping for Sustainability* (VSM4S), incluindo o estado atual e estado futuro.

Legenda: 5SEnSU, Modelo de Sustentabilidade dos Cinco Setores. SSIS, Indicador de Sustentabilidade do Sistema. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6.1. VSM4S - Estado Atual

O estado atual do VSM4S proposto segue uma sequência de etapas, conforme Figura 7. Inicia-se com a definição dos indicadores ambientais, econômicos e sociais para representar o desempenho em sustentabilidade da empresa. Em seguida, consolidam-se os resultados para cada indicador nos processos (Wolmak e Shook 1996) e aplica-se o modelo 5SEnSU (Giannetti et al., 2019) para se obter o SSIS no estado atual. A seguir, encontram-se as explicações detalhadas de cada etapa para obter o SSIS para o estado atual, sempre com referência à Figura 7.

### 6.1.1. Seleção dos Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais para o VSM4S

Para calcular o SSIS para o estado atual, o modelo 5SEnSU precisa ser alimentado de indicadores econômicos, ambientais e sociais. Segundo Giannetti et al. (2019), não há limite máximo para o número de indicadores, mas é necessário um mínimo de cinco indicadores, e um indicador representa cada um dos cinco setores do 5SEnSU. Para selecionar um conjunto de indicadores relacionados à sustentabilidade e definir uma forma para torná-los parte integrante na estratégia das empresas, Hristov e Chirico (2019) sugerem duas abordagens. A primeira abordagem refere-se à revisão sistemática da literatura para identificar os indicadores de desempenho chave (*Key Performance Indicators*, do inglês; KPIs), geralmente utilizados por gestores no desenvolvimento das estratégias de desempenho sustentável nas empresas de manufatura. A segunda abordagem baseia-se em entrevistas com gerentes de empresas de manufatura que normalmente possuem experiência prática na utilização de abordagens como o *Balanced Scorecard* com diversos enfoques, além do aspecto econômico para auxiliar na gestão integrada da empresa. Um papel importante na escolha dos indicadores é a representatividade do indicador para o sistema avaliado e sua relevância para o tema sustentabilidade, que pode variar entre os diferentes tipos de empresas manufatureiras.

Tradicionalmente, exemplos de indicadores usados no VSM com foco econômico incluem *lead time*, tempo de ciclo do processo, tempo de espera entre as etapas do processo, taxa de defeitos na produção, nível de estoque em processo e taxa de utilização de recursos. Contudo, o VSM4S proposto também exige indicadores

de desempenho ambiental e social, além dos econômicos. Embora não exista um padrão para a seleção de indicadores para alimentar o modelo 5SEnSU, a Tabela 4 fornece sugestões baseadas em uma revisão da literatura sobre o assunto. Os indicadores podem ser do tipo “quanto maior, melhor” ou “quanto menor, melhor”. Em qualquer caso, os indicadores escolhidos devam estar fundamentados e respeitem os cinco setores do modelo 5SEnSU, incluindo as suas funções de ‘doador’ e ‘receptor’, seguindo as regras apresentadas por Giannetti et al. (2019). Por exemplo, um indicador relacionado com o setor ambiental S1 como doador (por exemplo, consumo de água em m<sup>3</sup>/unidade produzida) nunca deve ser atribuído a outro setor que não seja S1, e assim por diante. Quando houver dúvidas sobre se um indicador é apropriado para um determinado setor, recomenda-se discutir com outros especialistas em reuniões participativas. A disponibilidade de dados pode ser considerada um fator limitante na seleção de indicadores, podendo levar à utilização de um tipo de indicador em detrimento de outro, potencialmente julgado como mais representativo do sistema estudado. Em qualquer caso, o relatório final deverá documentar os critérios adotados e as escolhas feitas.

Tabela 4. Exemplos de indicadores utilizados em estudos de sustentabilidade de empresas de manufatura.

Indicadores Econômicos
Custo de mão-de-obra, custo de uso de energia, custos de consumíveis, custos de manutenção, custo de tratamento de subprodutos, custo indireto de mão-de-obra, tempo e custo com ou sem valor agregado, consumo de matéria-prima, consumo total de energia, consumo de óleo e refrigerante, consumo de energia.
Indicadores Ambientais
Emissões de gases de efeito estufa provenientes do consumo de energia, proporção de energia renovável utilizada, consumo total de água, massa de descartes restritos, nível de ruído fora da fábrica, consumo de energia em linha, consumo de energia para manter o ambiente da instalação, consumo de energia para transporte dentro/fora de linha, taxa de uso de energia renovável, massa de consumíveis descartados, taxa de reutilização de consumíveis, massa de geração de névoa, massa de cavacos e sobras descartados, proporção de cavacos e sobras recicladas, pegada de carbono, eutrofização da água, acidificação do ar.
Indicadores Sociais
Contaminação química do ambiente de trabalho, nível de névoa/poeira, nível de ruído dentro da fábrica, índice de carga física, taxa de absenteísmo relacionado à saúde, exposição a produtos químicos corrosivos/tóxicos, exposição a componentes de alta energia, taxa de lesões, índice de carga física, riscos ambientais de trabalho, demanda de trabalho, treinamento de mão-de-obra.

Baseado em Lu et al. (2011) e Vinodh et al. (2016).

### 6.1.2. Cálculo dos Indicadores Ambientais, Econômicos, Sociais e seus Resultados Determinados

Uma vez escolhidos os indicadores que alimentarão o modelo 5SEnSU, eles deverão ser quantificados, utilizando dados primários obtidos no local (chão de fábrica) para precisão nos resultados. Os dados secundários devem ser evitados tanto quanto possível, mas podem ser usados quando necessário. O cálculo de cada indicador deverá obedecer às suas próprias regras, definições e procedimentos de cálculo, bem como às suas unidades originais. Por exemplo, enquanto os indicadores 'diretos', como o consumo de eletricidade (em kWh/unidade) ou de água (em m<sup>3</sup>/unidade), são quantificados diretamente dentro dos processos incluídos nos limites espaciais do VSM, os indicadores 'indiretos', como os derivados de avaliação do ciclo de vida (ACV; por exemplo, potencial de aquecimento global em kgCO<sub>2</sub>-eq./unidade) devem aderir às definições, regras e álgebra dos métodos de ACV.

Tanto o VSM quanto o VSM4S têm como objetivo analisar o fluxo de materiais, de energia e de informações que ocorrem em um processo produtivo, identificando desperdícios e propondo oportunidades de melhoria. Assim como o VSM tradicional, uma vez definidos os indicadores de desempenho a serem representados no VSM4S, e obtidos seus valores, são calculados os respectivos resultados determinados. A Tabela 5 apresenta um exemplo de fluxo produtivo com 'n' processos, mostrando diferentes critérios para cálculo dos resultados determinados dos indicadores, que representa o desempenho global de todos os processos produtivos. Os diferentes critérios considerados para o cálculo dos resultados determinados dependem das características de cada indicador, sendo possíveis duas possibilidades:

- a) Quando existem indicadores de processos, que podem ser somados para representar o desempenho total do sistema, a soma deve estar relacionada a uma unidade funcional: geralmente é a quantidade produzida em unidades, massa ou volume de produtos. A Tabela 5 apresenta as emissões de gases de efeito estufa (GEE) como exemplo desse tipo de indicador. Outros exemplos de indicadores que seguem esse critério são o consumo de energia, o consumo de água, e o consumo de outros insumos de produção.
- b) Quando há indicadores que não podem ser somados para representar o desempenho geral do sistema, o resultado determinado considera o processo

com pior desempenho como fator limitante entre os demais. A Tabela 5 apresenta a eficiência operacional e o nível de ruído como exemplos desse tipo de indicador, em que para o primeiro o menor valor indica pior desempenho (processo P3 com 65%), e para o segundo o maior valor indica pior desempenho (processo P1 com 55dB).

Tabela 5. Indicadores com valores hipotéticos para exemplificar o cálculo do resultado determinado em um VSM tradicional e um VSM4S proposto.

Indicadores		Processos					Resultados determinados	Critérios na obtenção do resultado determinado
		P1	P2	P3	P4	Pn		
Emissões de GEE (kgCO <sub>2</sub> /UF)		0.4	0.5	0.2	0.3	0.1	1.5	Emissões totais de GEE
Eficiência operacional (%)		80	75	65	95	85	65	O valor mais baixo para eficiência
Nível de ruído (Db)		55	35	25	48	45	55	O nível de ruído mais alto

UF significa unidade funcional (por exemplo, quantidade de produção em massa, unidades, volume etc.).

O cálculo dos resultados determinados dos indicadores é uma etapa necessária para aplicar o VSM4S, pois esses valores alimentarão o modelo 5SEnSU para calcular o indicador de sustentabilidade SSIS.

### 6.1.3. Definição das metas, punições e pesos para os indicadores do 5SEnSU

Esta etapa envolve a utilização dos procedimentos do modelo 5SEnSU apresentado em Giannetti et al. (2019). Exemplos de aplicação do 5SEnSU podem ser encontrados em García et al. (2021) na avaliação da sustentabilidade da produção de arroz, Dos Santos et al. (2022; 2023), avaliando a relação entre economia circular e sustentabilidade, e Giannetti et al. (2022), avaliando estações de tratamento de água e esgoto. Especificamente, nesta etapa definem-se as metas, punições e pesos de importância para os resultados determinados de cada indicador previamente calculado.

Como a filosofia da programação por metas é considerada uma abordagem multicritério na modelagem do 5SEnSU, para quantificar o indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS), é necessário estabelecer metas para os resultados determinados de cada indicador. O SSIS é quantificado considerando a distância até a meta de cada indicador (Figura 8), e após o processo de ponderação, essas distâncias podem ser somadas para representar o desempenho de sustentabilidade do sistema. Semelhante à etapa de escolha dos indicadores,

segundo Agostinho et al. (2019), o estabelecimento de metas pode ser escolhido por meio de diferentes abordagens, incluindo: a expertise do analista de acordo com o estudo de caso avaliado; reuniões participativas em que especialistas de diferentes áreas do conhecimento podem chegar a um acordo comum; através de planos e relatórios governamentais ou corporativos que fornecem referências. Objetivamente, os *benchmarks* deveriam ter prioridade, mas podem-se considerar valores médios do indicador na amostra (ou outra variável estatística) conforme considerado por Dos Santos et al. (2022) como meta. Outra opção é adotar como meta o indicador de melhor desempenho da amostra (Agostinho et al., 2019), quando possível. Independentemente do critério adotado pelo analista, as razões da sua utilização devem ser claramente apresentadas.

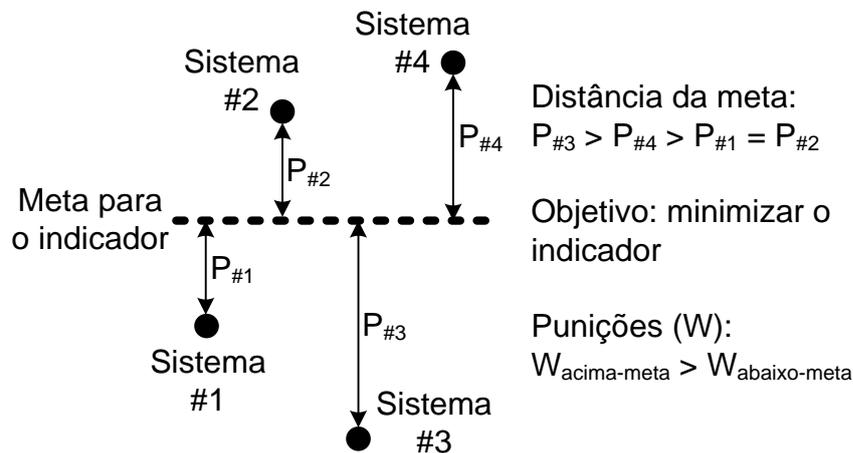


Figura 8. Exemplo esquemático para representar a filosofia de programação por metas considerada no modelo 5SEnSU. Adaptado de Giannetti et al. (2019).

Em relação às punições, como a filosofia da programação por metas é baseada na distância, que o resultado determinado do indicador tem da meta estabelecida, o indicador é punido quando está abaixo da meta e o objetivo é maximizar o indicador, ou quando o indicador está acima da meta e o objetivo é minimizá-lo. A Figura 8 apresenta um exemplo de punição em que o objetivo é minimizar o indicador. Os indicadores dos sistemas #2 e #4 estão acima da meta, portanto deveriam receber uma punição maior que os indicadores dos sistemas #1 e #3, que estão abaixo da meta estabelecida. Quando o objetivo é maximizar o indicador, aplica-se a lógica inversa. Dentre as diversas formas de aplicação de punições, destaca-se a utilização da abordagem baseada no Ecoindicador 99 (Goedkoop e Spriensma, 2001), que foi posteriormente modificado, utilizado e disponibilizado em Oliveira et al. (2016) e

Agostinho et al. (2019). Em geral, são sugeridos valores de punição de 4,9, 2,3 e 1,8 para as dimensões social, ambiental e econômica (com base na perspectiva cultural de um analista individualista).

Quanto aos pesos, o analista pode atribuir pesos de importância a cada indicador e/ou a cada setor do modelo 5SEnSU. A utilização e atribuição de valores de peso dependem da experiência do analista e dos objetivos do estudo, mas recomenda-se manter um equilíbrio entre os setores ambiental, econômico e social, em que todos os indicadores e setores do 5SEnSU são considerados com peso igual de um. Caso a atribuição de pesos seja considerada importante, sugere-se que os valores a serem atribuídos sejam obtidos em reuniões participativas com especialistas, ou outro método de base científica, a utilização de um método participativo para seleção dos pesos sempre que possível. Esses métodos baseiam-se na troca de conhecimentos, experiências, sentimentos, na resolução colaborativa de problemas e em processos coletivos de construção de conhecimento facilitados entre os indivíduos que compõem um grupo. Entre outros, o método Delphi (Williamson, 2002) surge como alternativa, envolvendo uma equipe de especialistas da empresa. Como ferramentas auxiliares, por exemplo, o Processo Hierárquico Analítico (AHP) também pode ser empregado. Independentemente dos critérios considerados no estabelecimento dos pesos, as escolhas devem ser apresentadas de forma clara.

#### 6.1.4 Aplicação do modelo 5SEnSU para obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS)

Após selecionar e quantificar os resultados determinados para todos os indicadores ambientais, sociais e econômicos, e definir suas metas, punições e pesos, pode-se aplicar a modelagem matemática, que fundamenta a filosofia de programação de metas. O cálculo do SSIS é feito seguindo estas etapas:

- I. Após selecionar os indicadores de desempenho dos aspectos ambientais, econômicos e sociais da empresa e distribuí-los entre os 5 setores do modelo 5SEnSU, os dados primários são obtidos por meio do mapeamento da produção fluxo (chamado etapa de inventário), são calculados indicadores e obtidos seus respectivos resultados determinados;

- II. O próximo passo é a atribuição de metas, punições e pesos a diferentes indicadores com base na sua importância relativa para a sustentabilidade global;
- III. Finalmente, o SSIS é calculado usando as Eqs. 1-4, que de forma simplificada representam a modelagem matemática originalmente apresentada por Giannetti et al. (2019) e posteriormente atualizada por Agostinho et al. (2019).

As equações 1 e 2 apresentam todo o processo de normalização dos resultados determinados dos indicadores, considerando as distâncias até as metas (N e P) e as punições (W) de acordo com os objetivos de maximizar ou minimizar o indicador, resultando na meta de sustentabilidade do indicador (ISG).

$$ISG_{ijk}^+ = \sum_{ijk} \frac{N_{ijk}^+}{W_{jk}^+ \cdot G_{jk}^+} + \sum_{ijk} \frac{P_{ijk}^+}{W_{jk}^- \cdot G_{jk}^+} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (1)$$

$$ISG_{ijk}^- = \sum_{ijk} \frac{N_{ijk}^-}{W_{jk}^- \cdot G_{jk}^-} + \sum_{ijk} \frac{P_{ijk}^-}{W_{jk}^+ \cdot G_{jk}^-} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (2)$$

Onde: ISG = índice de meta de sustentabilidade do indicador;

$N_{ijk}^+$  e  $N_{ijk}^-$  = indicadores positivos e negativos para as variáveis de desvio negativo, respectivamente;

$P_{ijk}^+$  e  $P_{ijk}^-$  = indicadores positivos e negativos para as variáveis de desvio positivo, respectivamente;

$G_{jk}^+$  e  $G_{jk}^-$  = metas para os indicadores positivos ou negativos;

$W_{jk}^+$  e  $W_{jk}^-$  = a punição para cada indicador;

NE, NS e NI são a quantidade de sistemas avaliados, setores e indicadores por setor, respectivamente;

$i$ ,  $j$ , e  $k$  representa o sistema sendo avaliado, o setor correspondente ao modelo 5SEnSU e o(s) indicador(es) para cada setor, respectivamente.

O ISG é uma medida de quão distante o indicador está de seu objetivo, considerando a punição escolhida. Ao adicionar todos os ISGs de um setor e aplicar o peso de importância para o setor (WS), se necessário, o indicador de sustentabilidade do setor (SSI) é calculado pela Eq. 3. Uma vez que o modelo 5SEnSU possui cinco setores, são obtidos cinco SSI.

$$SSI_{ij} = WS \sum_{ijk} (ISG_{ijk}^+ - ISG_{ijk}^-) \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\}, \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (3)$$

onde: WS = o peso de importância estabelecido para cada setor.

Finalmente, o indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS) pode ser obtido adicionando o SSI (Eq. 3) de cada setor, conforme expresso pela Eq. 4:

$$SSIS_i = \sum_j^5 SSI_{ij} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\}, \forall j \in \{1,2, \dots, NS\} \quad (4)$$

O SSIS calculado representa a sustentabilidade do sistema de manufatura do fluxo mapeado no estado atual, conforme a primeira etapa de diagnóstico requerida pelo VSM4S. A Figura 9 apresenta de forma mais detalhada as fases do VSM4S para a obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) no estado atual.

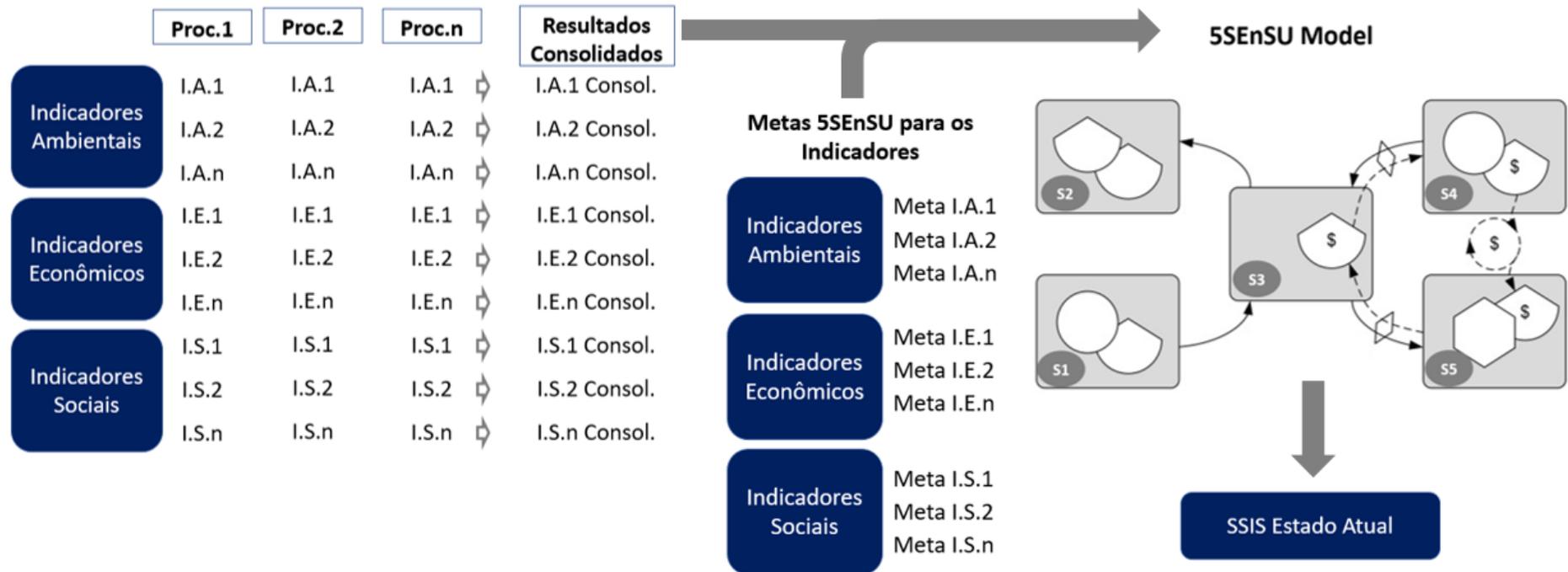


Figura 9. VSM4S - Etapas para a obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) para o estado atual do fluxo de produção analisado

Legenda: Proc.1, primeiro processo do fluxo de produção mapeado. Proc. N, enésimo processo do fluxo de produção mapeado. I.A.1, primeiro indicador ambiental do processo do fluxo de produção mapeado. I.A.n, enésimo indicador ambiental do processo do fluxo de produção mapeado. I.E.1, primeiro indicador econômico do processo do fluxo de produção mapeado. I.E.n, enésimo indicador econômico do processo do fluxo de produção mapeado. I.S.1, primeiro indicador social do processo do fluxo de produção mapeado. I.S.n, enésimo indicador social do processo do fluxo de produção mapeado. Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 6.2. VSM4S Estado Futuro

A exemplo do que ocorre no mapeamento tradicional, que é mapear o estado atual e propor melhorias para atingir o estado futuro em termos de resultados, no VSM4S o procedimento é o mesmo, porém agora considerando também os aspectos ambientais e sociais, com o mesmo rigor e a atenção que tradicionalmente se aplica aos aspectos econômicos.

No VSM4S estado atual, por meio da aplicação do modelo 5SEnSU, obtém-se o nível de sustentabilidade representado pelo SSIS no único cenário avaliado, conforme apresentado anteriormente. Para o estado futuro, com base nas metas operacionais (metas VSM4S) estabelecidas pelo planejamento estratégico da empresa, podem-se traçar vários planos de projetos Kaizen.

Para cada um dos planos Kaizen, considerando as metas 5SEnSU que são as mesmas utilizadas no estado atual, aplicando o modelo 5SEnSU obtém-se o nível de sustentabilidade representado pelo SSIS para todos os cenários avaliados, referentes a cada um dos planos de projetos.

As etapas de atividades para a elaboração do estado futuro do VSM4S proposto, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 7, iniciam-se pelo estabelecimento das metas para os indicadores (Metas VSM4S). A próxima etapa consiste em definir os projetos de melhorias, etapa que ocorre somente após o mapeamento do estado atual e da definição das metas VSM4S para o estado futuro. Em seguida, calculam-se os resultados determinados dos indicadores, que juntamente com as metas 5SEnSU correspondentes a cada um desses indicadores serão usados como “inputs” na aplicação do modelo 5SEnSU para se obter como resultado o SSIS no estado futuro.

Quando se comparam os dois mapas (estado atual e futuro), as principais diferenças estão nos novos valores atribuídos aos indicadores, na configuração dos fluxos de informações e de materiais entre os processos, e a distribuição visual dos projetos Kaizens definidos e planejados, em busca dos objetivos contemplados no novo cenário escolhido para o próximo período, iniciando-se um novo ciclo de melhorias.

Para que as comparações entre estado atual e futuro sejam consistentes, os indicadores e as metas utilizadas no modelo 5SEnSU para o estado atual sejam as

mesmas definidas no estado futuro. As seções, a seguir, explicam detalhadamente os procedimentos da Figura 7, quando aplicados ao estado futuro.

#### 6.2.1. Estabelecimento das Metas VSM4S para os Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais

A definição de metas no VSM para a tomada de decisões são aspectos importantes para melhorar a eficiência e o desempenho, seja em uma cadeia de suprimentos ou em um processo de produção (Rother e Shook, 1996). Nessa etapa, baseando-se nos resultados do período dos últimos doze meses, representados pelos indicadores no VSM4S estado atual, uma equipe de especialistas multifuncionais, atuando no sistema de manufatura, deve realizar a análise do estado atual e propor metas que deverão ser alinhadas com os objetivos estratégicos, que devem ser claros, mensuráveis e com prazos estabelecidos para a implementação dos projetos, e por fim serem validadas pelos tomadores de decisão da empresa.

Para definir e validar as novas metas, é necessário que os indicadores-chave de desempenho (KPIs), representados nos processos mapeados, já tenham sido revisados. A seleção dos indicadores, o estabelecimento das metas e a coleta de informações para a elaboração do VSM devem ser feitas de forma cuidadosa, pois são fundamentais para orientar na tomada de decisões e na seleção dos projetos Kaizens. A meta apropriada é essencial para avaliar o desempenho e identificar as áreas de melhoria dentro de uma cadeia de suprimentos ou processo de manufatura. Os objetivos devem ser capazes de capturar os principais aspectos do fluxo de valor e fornecer informações importantes na tomada de decisões (Faulkner e Badurdeen, 2014).

O procedimento adotado para definição das metas VSM4S é o mesmo empregado no VSM tradicional, porém agora adicionando indicadores relacionados aos aspectos ambientais e sociais. À medida que as melhorias são implementadas e as metas são monitoradas, novas oportunidades de melhoria podem ser identificadas, exigindo ajustes nas decisões tomadas anteriormente.

### 6.2.2. Projetos Kaizen para um Cenário Futuro Proposto e Revisão dos indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais

Após estabelecer as metas VSM4S para cada indicador econômico, social e ambiental, que alimenta o modelo 5SEnSU, a equipe de especialistas propõe opções práticas de planejamento de melhoria (projetos Kaizen) com o objetivo de atingir as metas estabelecidas no prazo de um ano. Essa já é uma prática bem conhecida e aplicada em empresas de manufatura, que utilizam o VSM tradicional. A quantidade de projetos Kaizen, considerados no plano de atividades para o próximo período, bem como a importância dos projetos dimensionados, serão ambos definidos com base nos objetivos VSM4S estabelecidos e previamente validados. A proposta de projetos Kaizen pode abranger aspectos de gestão e tecnologia/processo sobre como operacionalizar as sugestões de melhoria.

Nesta fase poderão ser propostos diversos projetos Kaizen para atingir os objetivos VSM4S do plano estratégico da empresa, cada projeto com um objetivo primário e estratégia de execução diferente. No VSM4S, é improvável que exista apenas um único projeto Kaizen capaz de atingir todos os objetivos, mas existem várias possibilidades para atingir o mesmo objetivo. Como resultado, existem diferentes cenários (múltiplas caixas na 2ª etapa do VSM4S estado futuro na Figura 7) para o planejamento estratégico, e embora os indicadores econômicos, sociais e ambientais sejam os mesmos em todos os cenários, os seus valores finais quantitativos podem ser ligeiramente diferentes, resultando em diferentes SSISs, um para cada cenário.

### 6.2.3. Cálculo dos Resultados Determinados dos Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais

O cálculo dos resultados determinados dos indicadores para o VSM4S estado futuro segue exatamente o mesmo procedimento estabelecido no VSM4S do estado atual conforme descrito anteriormente.

#### 6.2.4. Uso das Metas 5SEnSU para os Indicadores Ambientais, Econômicos e Sociais

Para garantir consistência nos resultados, as metas do modelo 5SEnSU para o VSM4S do estado futuro são exatamente as mesmas estabelecidas para o VSM4S do estado atual.

#### 6.2.5. Aplicação do modelo 5SEnSU para Obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) em um Cenário de Estado Futuro

A aplicação do modelo 5SEnSU para o VSM4S do estado futuro segue o mesmo procedimento do VSM4S do estado atual (Figura 7), incluindo a modelagem matemática que suporta a filosofia de programação de metas (Eqs. 1-4) automatizada em planilha Excel®. Como resultado, existem diferentes SSISs, um para cada cenário estabelecido de acordo com cada projeto Kaizen. Os SSISs calculados podem ser classificados para identificar os projetos Kaizen, que resultariam em maior ou menor sustentabilidade para a empresa manufatureira, conforme exemplificado na Figura 10. Um valor menor de SSIS indica maior sustentabilidade, uma vez que o sistema está mais próximo das metas estabelecidas para os indicadores econômicos, sociais e ambientais.

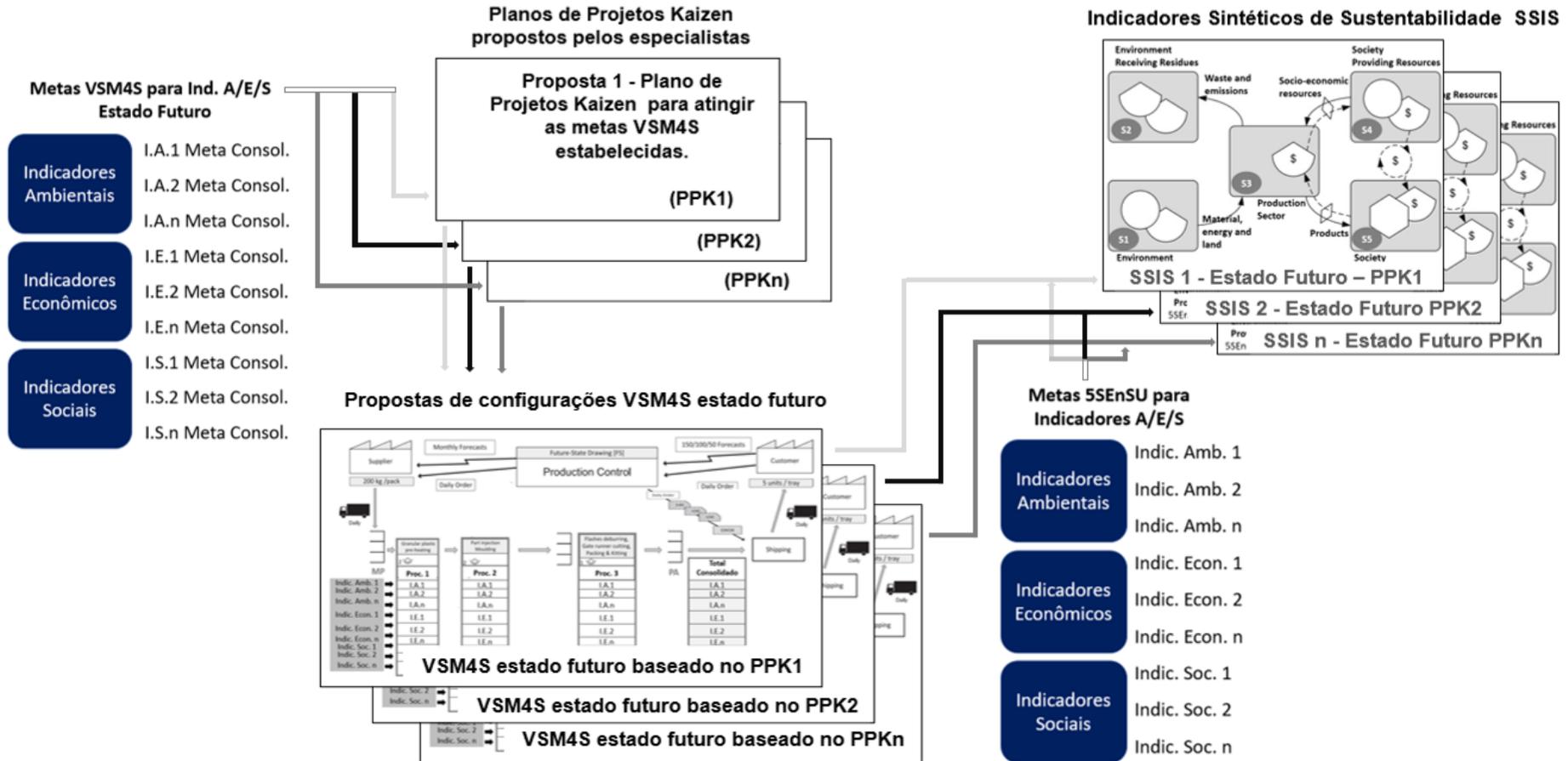


Figura 10. VSM4S - Etapas para a obtenção do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS) estado futuro, em cenários baseados no estabelecimento das metas VSM4S e dos planos de projetos Kaizen.

Legenda: Proc.1, primeiro processo do fluxo de produção mapeado. Proc. N, enésimo processo do fluxo de produção mapeado. I.A.1, primeiro indicador ambiental do processo do fluxo de produção mapeado. I.A.n, enésimo indicador ambiental do processo do fluxo de produção mapeado. I.E.1, primeiro indicador econômico do processo do fluxo de produção mapeado. I.E.n, enésimo indicador econômico do processo do fluxo de produção mapeado. I.S.1, primeiro indicador social do processo do fluxo de produção mapeado. I.S.n, enésimo indicador social do processo do fluxo de produção mapeado. PPK, plano de projetos Kaizen. Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 6.2.6. Aplicação da Estrutura de Cubos para Escolha de Cenário Futuro

O VSM4S do estado futuro proposto neste estudo possibilita obter como resultado, diferentes SSISs de acordo com os diferentes planos de projetos Kaizens elaborados. Para auxiliar o tomador de decisão, consideram-se também os critérios da relação custo-benefício de implementação (B/C ratio), e da disponibilidade de mão-de-obra para a realização dos projetos (FTE), simultaneamente em nível de sustentabilidade que cada um dos cenários possa oferecer (SSIS). Enquanto o primeiro foca no aspecto monetário, o segundo foca na distribuição de mão de obra qualificada existente na empresa, podendo ser alocada para participar nos projetos. Ao decisor podem ser fornecidos vários cenários para escolha, cada um com seus respectivos indicadores de desempenho em SSIS, B/C ratio e FTE.

O indicador B/C ratio expressa valor do benefício financeiro (anualizado) resultante de um determinado projeto em relação ao custo que irá demandar para ser realizado. Por exemplo, se um projeto resultar em um ganho de \$10.000 (anualizado), com um custo para implementação de \$2.500, o B/C ratio resultante desse projeto será de  $B/C=4$ . Um projeto se torna mais viável do ponto de vista econômico quanto maior for o seu B/C ratio resultante.

O time de especialista selecionados para atuar nos projetos kaizen precisa ser composto por especialistas da empresa com profundo conhecimento e experiência técnica sobre os produtos e os processos, sendo assim, um outro fator que deve ser considerado no planejamento dos projetos é o dimensionamento da mão-de-obra envolvida. Para participarem dos projetos, esses especialistas usarão parte do tempo, destinado para as atividades de rotina, e em razão desse fato, a distribuição desse tempo para cada um dos projetos não pode se sobrepor, ou seja, um especialista não poderá estar em mais de um projeto ao mesmo tempo, e o indicador considerado neste estudo para evitar essa sobreposição é o *Full Time Equivalent* (FTE), cuja unidade equivalente de tempo utilizada é "DIA pessoa por projeto", convencionado, nesse caso, que 1 FTE equivale a um DIA de trabalho de uma pessoa com dedicação total em um determinado projeto. Por exemplo: considerando que um especialista utilize seu tempo em um determinado projeto meio período do dia, isso equivale a 0,5 FTE. Se 10 pessoas se dedicarem totalmente em um projeto durante 5 dias, isso equivaleria a um total de 50 FTEs. Assim sendo, quanto menor o FTE definido para

cada um dos especialistas na participação de projetos, melhor será a distribuição dos seus respectivos tempos para cumprir o prazo estabelecido ao projeto, pois possibilita um melhor balanceamento do tempo dessa mão-de-obra, evitando sobreposição do tempo de uma mesma pessoa em mais de um projeto.

Tanto o B/C Ratio quanto o FTE já são utilizados pelas empresas no planejamento e priorização de projetos, e juntando-se a esses uma terceira variável que é o indicador sintético de sustentabilidade SSIS, proposto neste estudo para medir o nível de sustentabilidade resultante na conclusão do projeto. Essas três variáveis combinadas servirão para os tomadores de decisão escolherem o cenário que melhor atenda as expectativas da empresa, baseando-se em análises com foco não somente em aspectos econômicos, como também em aspectos ambientais e sociais.

Como são três indicadores, sustentando uma decisão, sugere-se sua representação gráfica com auxílio de uma figura de Cubo que, a princípio, conseguiria transmitir a informação de forma efetiva. Para se utilizar o cubo, é necessário que se tenha no mínimo dois cenários para serem comparados entre si, pois essa é a limitação do cubo. O cubo já vem sendo usado para representar graficamente o desempenho de diferentes sistemas, como, por exemplo, no trabalho de Coscieme et al. (2013) que consideraram os indicadores de ecoexergia, serviços ambientais e energia para avaliar ecossistemas a partir de uma abordagem termodinâmica. Outros exemplos incluem o trabalho de Pulselli et al. (2015), classificando economias mundiais de acordo com seu nível de sustentabilidade em um cubo, expressando o desempenho das economias por meio de seus indicadores de Produto Interno Bruto (PIB), índice GINI e energia, um estudo de Sporchia et al. (2021), sobre a sustentabilidade de países europeus em uma série histórica medida pelos indicadores GDP, emissões de CO<sub>2</sub> e taxa de emprego, e o estudo de Clasen et al. (2022), que propuseram o uso do cubo como uma abordagem para estudar o nexo entre alimento, energia e água (*FEW nexus*) para municípios.

Para cada projeto Kaizen, resultante de um cenário possível de ser implementado, tem-se um valor de SSIS, um valor de B/C e um valor de FTE. Para colocar esses valores no cubo, o primeiro passo é adequar a interpretação dos indicadores. Para os indicadores SSIS e FTE, interpretados como 'maior seu valor pior seu desempenho', ambos devem ser invertidos ( $1/SSIS$  e  $1/FTE$ ) antes de representá-los no cubo. Para o indicador B/C, interpretado como 'maior seu valor melhor seu

desempenho', ele pode ser utilizado diretamente no cubo. O segundo passo inclui a normalização dos indicadores entre 0 e 1. Existem diferentes técnicas de normalização disponíveis, mas sugere-se utilizar a normalização denominada como máximo-mínimo, pela equação geral  $Index\ 'n'\ normalized = (index\ 'n' - lower\ value\ for\ 'n'\ in\ the\ sample) / (higher\ value\ for\ 'n'\ in\ the\ sample - lower\ value\ for\ 'n'\ in\ the\ sample)$ . A amostra considerada no processo de normalização inclui os diferentes cenários calculados, representando um desempenho comparativo. Essa normalização é simples de ser realizada, rápida de ser aplicada, e alcança os objetivos de colocar os dados no cubo. Após a normalização dos valores, eles podem ser finalmente colocados no cubo, respeitando os eixos correspondentes, conforme representado na Figura 11.

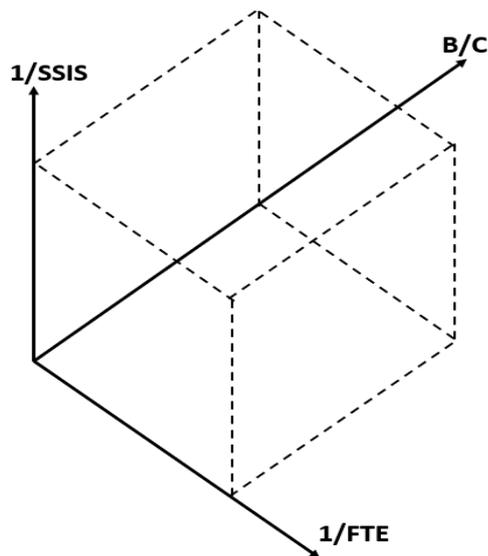


Figura 11. Figura do cubo para representar de forma gráfica o índice de sustentabilidade (SSIS) correspondente ao B/C ratio e o FTE dos cenários disponíveis. Fonte: Elaborado pelo autor.

Como próximos passos, uma vez definido e validado o cenário escolhido, faz-se a gestão dos projetos contemplados no plano com seus respectivos prazos de conclusão, utilizando um critério de prioridade, baseado na padronização dos indicadores, conforme apresentado na Figura 12.

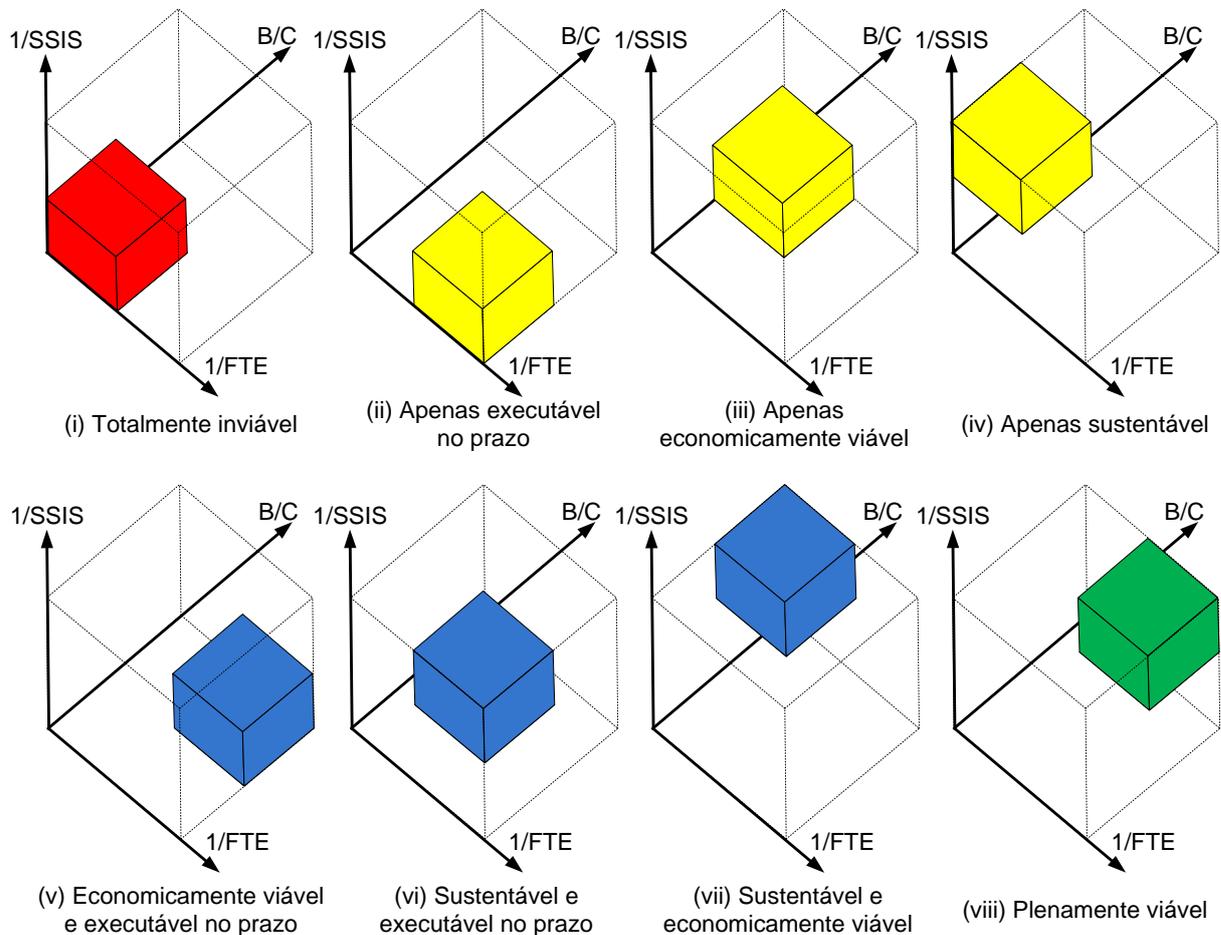


Figura 12. Os oito cenários possíveis para o VSM4S do estado futuro baseado nos indicadores de sustentabilidade (SSIS), retorno financeiro (B/C Ratio) e utilização dos recursos para realização dos projetos no prazo (FTE). Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 12 retrata um exemplo onde foram definidos oito diferentes planos de projetos Kaizens, oferecendo: potenciais diferentes de taxa de retorno (B/C ratio, quanto maior melhor), diferente quantidade necessária de pessoas a serem locadas em cada um dos projetos (FTE, quanto menor melhor), e eventuais diferentes níveis de sustentabilidade (SSIS, quanto menor melhor) respectivamente, resultando em uma atribuição de diferentes valores para as três variáveis (B/C, FTE e SSIS).

Como resultado a geração de oito possibilidades, possibilitando ao tomador decisão, a escolha do cenário que melhor atenda aos requisitos da estratégia da empresa, classificadas da seguinte forma:

- i. **Totalmente Inviável:** O plano de projeto que apresenta inviabilidade nas três variáveis, ou seja, não apresenta um retorno expressivo, necessita de um

- prazo maior para a execução dos projetos, e apresenta baixo nível de sustentabilidade.
- ii. **Apenas executável no prazo:** O plano cujos projetos podem ser executados no prazo, porém não apresenta um retorno expressivo e tem baixo nível de sustentabilidade.
  - iii. **Apenas economicamente viável:** O plano de projeto que apresenta um retorno expressivo, porém seus projetos não podem ser executados no prazo, e apresenta baixo nível de sustentabilidade.
  - iv. **Apenas sustentável:** O plano de projeto que tem um bom nível de sustentabilidade, porém seus projetos não apresentam um retorno expressivo, e não podem ser executados no prazo.
  - v. **Economicamente viável e executável no prazo:** O plano de projeto que apresenta um retorno expressivo, os projetos conseguem ser executados no prazo, porém apresentam baixo nível de sustentabilidade.
  - vi. **Sustentável e executável no prazo:** O plano de projeto que apresenta um alto nível de sustentabilidade, seus projetos podem ser executados no prazo, porém não apresenta um retorno expressivo.
  - vii. **Sustentável e economicamente viável:** O plano de projeto que apresenta alto nível de sustentabilidade e um retorno expressivo, porém os projetos não conseguem ser executados no prazo.
  - viii. **Plenamente viável:** O plano de projeto que apresenta viabilidade nas três variáveis, ou seja, apresenta um retorno expressivo, os projetos podem ser executados no prazo, e apresentam alto nível de sustentabilidade.

A primeira classificação indica o pior cenário entre todos, seguido pelos cenários de ii a iv, que mostram um bom desempenho apenas para um indicador. Em seguida, os cenários v a vii apresentam um bom desempenho para dois indicadores, e finalmente o cenário viii, que representa o melhor cenário entre todos. Os cenários e suas características mostram um desempenho de forma comparativa entre todos os cenários possíveis avaliados, e não um desempenho em termos absolutos. A escolha do cenário é feita pelo tomador de decisão, baseando-se nas diversas possibilidades como representado na estrutura de cubo.

### 6.3. Aplicação do VSM4S em um caso de estudo com dados hipotéticos

Assim como acontece com qualquer proposta de novo método, aplicá-lo em estudos de caso auxilia na compreensão dos passos a serem seguidos, incluindo cálculos, dados necessários, entre outras questões que levantariam dúvidas. Esta seção (6.3) apresenta um exemplo hipotético de sua aplicação. A aplicação em estudo de caso real é abordada no próximo item desta tese.

A Figura 13 apresenta um mapa com três processos industriais considerados para a aplicação do VSM4S. Para cada um dos processos, foram selecionados dez indicadores redistribuídos em quantidade iguais, ou seja, dois indicadores para cada setor do modelo 5SEnSU, conforme Tabela 6. Todos os indicadores são quantificados para cada um dos três processos (P1, P2 and P3) existentes no fluxo de manufatura da empresa considerada. Em seguida, os resultados determinados de cada indicador são calculados, considerando diferentes critérios de acordo com a característica do indicador.

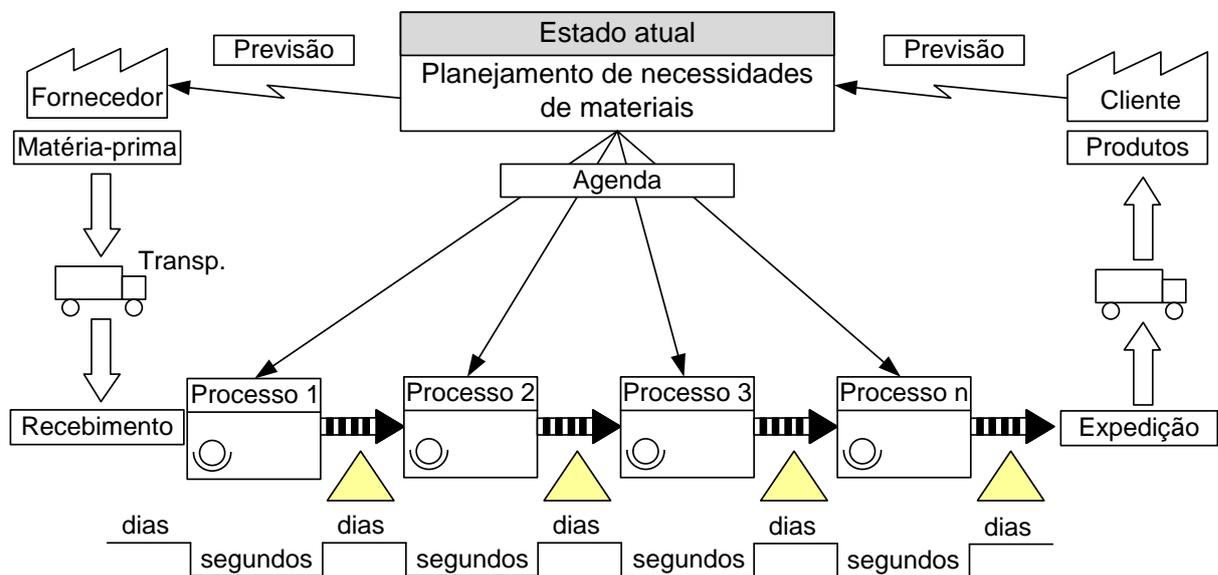


Figura 13. Fluxo de manufatura hipotético para aplicação do VSM4S

Tabela 6. Indicadores escolhidos, com seus respectivos valores para cada um dos processos, e seus valores determinados para um estudo de um caso hipotético. Os números correspondem ao VSM4S estado atual.

Indicadores escolhidos	Processos Industriais			Valores Determinados	Critério
	P1	P2	P3		
k <sub>11</sub> , Energia incorporada (MJeq./unid.)	9.70E-07	1.15E-06	1.00E-06	3.12E-06	Total
k <sub>12</sub> , Demanda de energia (kWh/unid.)	1.10E-05	1.61E-05	1.01E-05	3.72E-05	Total
k <sub>21</sub> , Aquecimento global(kgCO <sub>2</sub> eq./unid.)	2.62E-06	2.62E-06	2.62E-06	7.85E-06	Total
k <sub>22</sub> , Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq./unid.)	3.50E-09	4.10E-09	6.20E-09	1.38E-08	Total
k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	82.00	77.00	79.00	77.00	Menor valor
k <sub>32</sub> , Lead time (hr)	1,240	1,900	1,440	4,580	Total
k <sub>41</sub> , Taxa de desemprego (%)	6.00	3.00	4.00	13.00	Total
k <sub>42</sub> , Média salarial (R\$)	1,045	1,045	1,045	1,045	Mesmo valor
k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido por acidente (%)	1.50	0.50	1.00	3.00	Total
k <sub>52</sub> , Índice de absenteísmo (%)	2.00	1.50	1.50	5.00	Total

unid. = uma unidade produzida.

Os resultados determinados dos indicadores da Tabela 6 são utilizados para alimentar a abordagem multicritério da filosofia de programação por metas no modelo 5SEnSU. Utilizando as metas e objetivos de cada indicador apresentados na Tabela 7, pode-se calcular o SSIS para o estado atual, resultando no valor de 35,56. As punições consideradas são as sugeridas anteriormente no texto deste estudo (4,9, 2,3 e 1,8 para as dimensões social, ambiental e econômica), e os pesos de importância são considerados iguais a um (1) para todos os setores do 5SEnSU. Conforme discutido anteriormente, os objetivos do 5SEnSU devem ser estabelecidos através de uma abordagem participativa envolvendo diferentes especialistas e grupos de trabalho e com base no planejamento estratégico da empresa manufatureira. Todos os valores calculados da planilha Excel na programação por metas para o VSM4S estão representados em detalhes na Tabela N1 do Apêndice N.

Tabela 7. Valores determinados dos indicadores para os quatro cenários hipotéticos para o estado futuro do VSM4S estabelecidos conforme os projetos Kaizen. Tanto os valores determinados quanto as metas 5SEnSU são valores hipotéticos baseados nos valores determinados da Tabela 6.

Indicadores escolhidos	Valores determinados para os indicadores estabelecidos de acordo com os diferentes projetos Kaizen				5SEnSU	
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Meta	Objetivo
	k <sub>11</sub> , Energia incorporada (MJeq./unid.)	3.20E-06	3.08E-06	3.15E-06	3.24E-06	3.00E-06
k <sub>12</sub> , Demanda de energia (kWh/unid.)	3.20E-05	3.42E-05	3.55E-05	3.00E-05	3.90E-06	Minimizar
k <sub>21</sub> , Aquecimento global (kgCO <sub>2</sub> eq./unid.)	7.00E-06	7.55E-06	7.22E-06	7.85E-06	7.00E-07	Minimizar
k <sub>22</sub> , Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq./unid.)	1.48E-08	1.28E-08	1.60E-08	1.80E-08	1.10E-09	Minimizar
k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	80.00	90.00	79.00	74.00	90.00	Maximizar
k <sub>32</sub> , Lead time (hr)	4,200	4,000	4,225	4,500	3,800	Minimizar
k <sub>41</sub> , Taxa de desemprego (%)	12.00	12.00	11.50	10.80	10	Minimizar
k <sub>42</sub> , Média salarial (R\$)	1,070	1,020	1,030	1,055	1,090	Maximizar
k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido por acidente (%)	2.00	2.50	1.10	1.20	0,80	Minimizar
k <sub>52</sub> , Índice de absenteísmo (%)	3.00	2.00	3.00	2.20	1,80	Minimize

unid. = uma unidade produzida

Em seguida, os projetos Kaizen são desenvolvidos pela equipe de especialistas, tendo como referência os objetivos da empresa manufatureira, resultando em quatro cenários diferentes, conforme mostrado na Tabela 7. Cada cenário possui valores individuais diferentes para cada um dos dez indicadores considerados no VSM4S e, conseqüentemente, diferentes valores determinados. Os valores determinados dos indicadores para cada cenário, bem como suas metas e objetivos utilizados no modelo 5SEnSU (que são os mesmos utilizados para o estado atual), são utilizados na abordagem multicritério (Apêndice N) para calcular o SSIS para cada cenário de estado futuro. A Tabela 8 apresenta, além do SSIS para cada cenário estabelecido, seus respectivos valores de relação B/C e FTE (ambos escolhidos aleatoriamente para fins didáticos na aplicação do VSM4S). Por fim, todos os indicadores SSIS, B/C e FTE na amostra de quatro cenários são normalizados e interpretados de acordo com a representação gráfica do Cubo.

Tabela 8. Desempenho geral para os quatro cenários hipotéticos avaliados, e sua interpretação pelo CUBO. Os números correspondem ao estado futuro do VSM4S.

VSM4S estado futuro	1/SSIS <sup>a</sup>		B/C <sup>b</sup>		1/FTE <sup>b</sup>		Interpretação do CUBO
	Valor	Norma- lizado	Valor	Norma- lizado	Valor	Norma- lizado	
Cenário 1	31.33	0.79	1.00	0.00	5.00	0.40	Apenas sustentável
Cenário 2	30.77	1.00	2.00	0.50	8.00	0.06	Sustentável e economicamente viável
Cenário 3	32.49	0.36	2.50	0.75	3.00	1.00	Economicamente viável e executável no prazo
Cenário 4	33.55	0.00	3.00	1.00	9.00	0.00	Economicamente viável

Os números entre colchetes são normalizados de acordo com a amostra de quatro cenários, considerando o método de normalização ‘max-min’ conforme descrito no texto principal. É importante lembrar que SSIS e FTE normalizados são representados como 1/SSIS e 1/FTE para indicar desempenho “quanto maior, melhor”.<sup>a</sup> Valores de SSIS obtidos após execução da programação por metas conforme disponível no apêndice N com base nos valores da Tabela 7. <sup>b</sup> B/C e FTE são valores hipotéticos escolhidos aleatoriamente.

Conforme Tabela 8, cada cenário apresenta um desempenho geral diferente, conforme interpretado no Cubo. Na ordem do melhor para o pior desempenho geral entre os cenários avaliados, nenhum conseguiu atingir um bom desempenho para todos os três indicadores. Sob esse critério, os cenários 2 (sustentável e economicamente viável) e 3 (economicamente viável e executável no prazo) apresentam desempenhos semelhantes, ambos obtendo bom desempenho para dois indicadores. Contudo, ambos os cenários apresentam desempenhos diferentes em relação aos aspectos ambientais, econômicos e sociais. Os cenários 1 (apenas sustentável) e 4 (economicamente viável) obtiveram bom desempenho para apenas um indicador, embora sob diferentes enfoques, incluindo ambiental e econômico.

Nesse ponto, o diagnóstico final fornecido pelo VSM4S é entregue ao tomador de decisão da empresa de manufatura para que seja escolhido e implementado o cenário considerado mais adequado às estratégias estabelecidas pela empresa. Se o VSM tradicional fosse considerado em vez do VSM4S, os cenários 3 ou 4 provavelmente receberiam prioridade, pois apenas os aspectos econômicos e operacionais seriam considerados na decisão. No entanto, o VSM4S proporciona uma visão holística da sustentabilidade incluída na decisão, representada pelo SSIS.

Após a escolha e validação do cenário futuro, que melhor atenda as estratégias da empresa, a última etapa consiste na conclusão do VSM4S estado futuro elaborado, conforme mostra a Figura 14, representando os novos valores atribuídos aos indicadores ambientais, econômicos e sociais que foram gerados no cenário escolhido, em substituição aos anteriores reportados no VSM4S estado atual. O exemplo do Mapa reflete também graficamente todas as alterações que ocorrerão no

fluxo de produção, condicionadas às conclusões de todas as melhorias definidas no plano de projeto “Kaizen” do cenário escolhido.

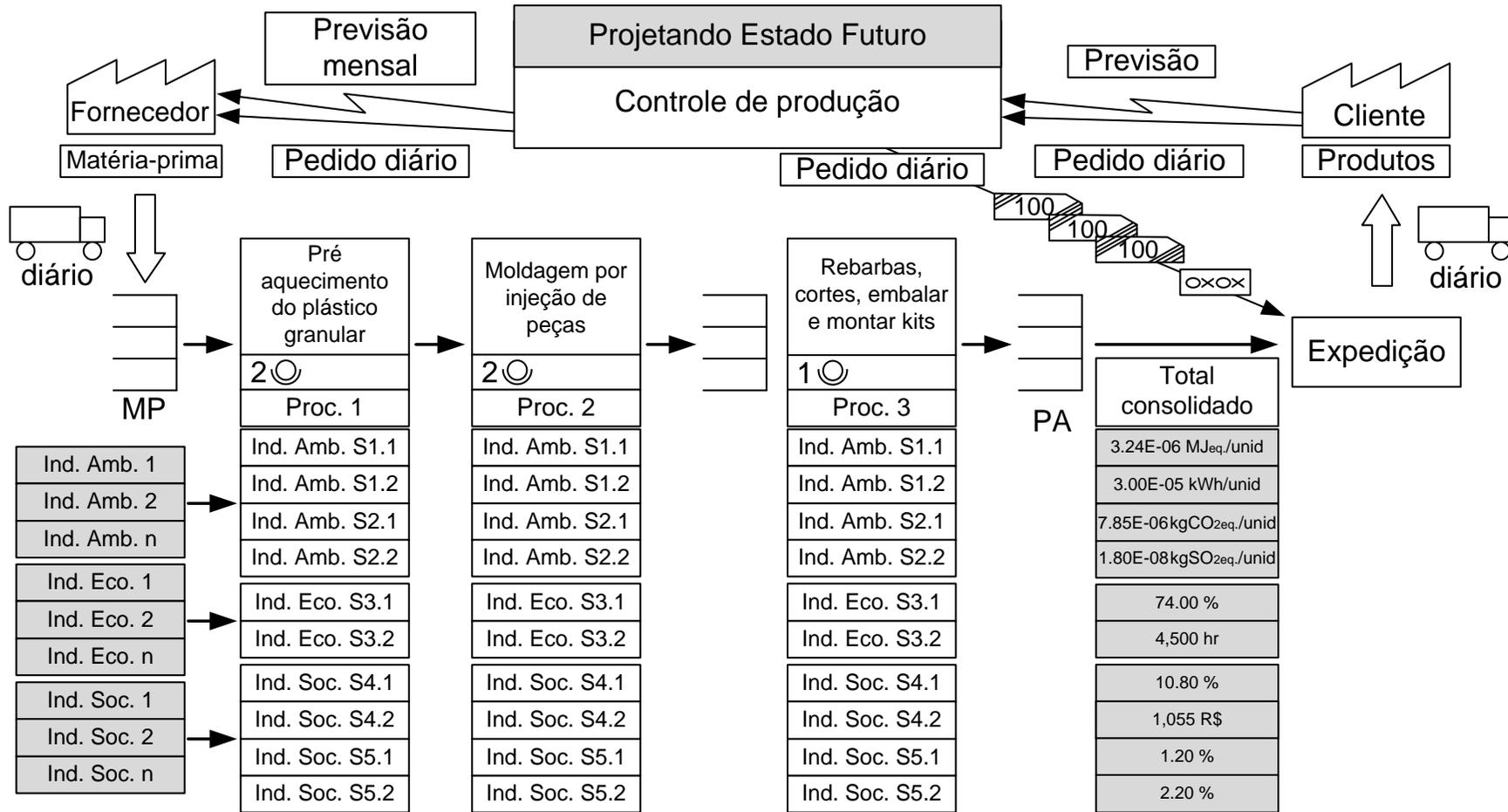


Figura 14. Exemplo do VSM4S estado futuro do cenário escolhido, considerando os indicadores de sustentabilidade (Ambientais, Econômicos e Sociais) com seus novos valores a serem atingidos por meio da conclusão dos projetos de melhorias.

Legenda: Proc.1, primeiro processo do fluxo de produção mapeado. Proc. n, enésimo processo do fluxo de produção mapeado. I.A.1, primeiro indicador ambiental do processo do fluxo de produção mapeado. I.A.n, enésimo indicador ambiental do processo do fluxo de produção mapeado. I.E.1, primeiro indicador econômico do processo do fluxo de produção mapeado. I.E.n, enésimo indicador econômico do processo do fluxo de produção mapeado. I.S.1, primeiro indicador social do processo do fluxo de produção mapeado. I.S.n, enésimo indicador social do processo do fluxo de produção mapeado. Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Rother e Shook (1996).

## 7. CAPÍTULO 2: APLICAÇÃO DO VSM4S EM UM ESTUDO DE CASO REAL

Seguindo a mesma lógica do capítulo anterior, cuja abordagem foi apresentar a proposta do modelo do VSM4S, como próximo passo, parte-se para a aplicação na prática, e para tanto toma-se como base um caso real de VSM tradicional como estudo de caso, iniciando pela escolha dos indicadores até a obtenção do indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS) para os estados atual e futuro.

Como já dito, o mapeamento do fluxo de valor é uma prática que, segundo Faulkner e Badurdeen (2014) pode ser utilizada em qualquer setor industrial tais como fabricação de produtos metálicos, produtos químicos, farmacêuticos, produção de alimentos entre outros, com o objetivo de avaliar a performance da manufatura e os pontos de oportunidades; ainda, utilizar o menor número possível de indicadores, ou seja, apenas indicadores funcionais e devidamente apropriados, podendo impactar nos resultados do setor que está sendo avaliado, evitando duplicidade e redundância de indicadores, pois algumas métricas que são adequadas para um determinado setor, podem não ser para outro.

O estudo de caso, que consiste na aplicação do VSM4S proposto nesta tese, utiliza dados resultantes de um mapeamento do fluxo de valor (VSM tradicional) real já realizado em uma fábrica situada na China (dados da empresa não são fornecidos por confidencialidade das informações), que produz compressores herméticos alternativos utilizados em sistemas de refrigeração domésticos e industriais. Embora o VSM possa ser aplicado em qualquer área da manufatura, a escolha desse estudo de caso para esta tese se deu pelo fato da disponibilidade de dados reais.

Dado a grande quantidade de peças existentes em um compressor desse tipo, a exemplo do que ocorre em um mapeamento do fluxo de valor tradicional nas indústrias, é feita uma análise baseando-se na ‘classificação ABC’ (os que mais influenciariam nos resultados) dos componentes para selecionar aqueles que farão parte do fluxo a ser mapeado. O fluxo de produção a ser mapeado é o que produz o eixo, o rotor e o estator, conforme ilustrado da Figura 15.

Para definir o escopo do mapeamento do fluxo de valor, uma matriz “Produto vs. Processos” é estabelecida, considerando as principais famílias de produtos que farão parte do fluxo mapeado, bem como todos os processos considerados no fluxo produtivo do mapeamento. Segundo Rasi et al. (2014), a matriz define quais famílias

de produto/componente selecionadas para serem mapeadas, baseando-se na quantidade de processos pelos quais um determinado produto irá passar, ou seja, quanto maior o número de processos a ser utilizado para um determinado produto, este será classificado para fazer parte do mapeamento, pois irá possibilitar mais oportunidades de melhorias com ganhos mais expressivos em todo o fluxo considerado para o mapeamento.

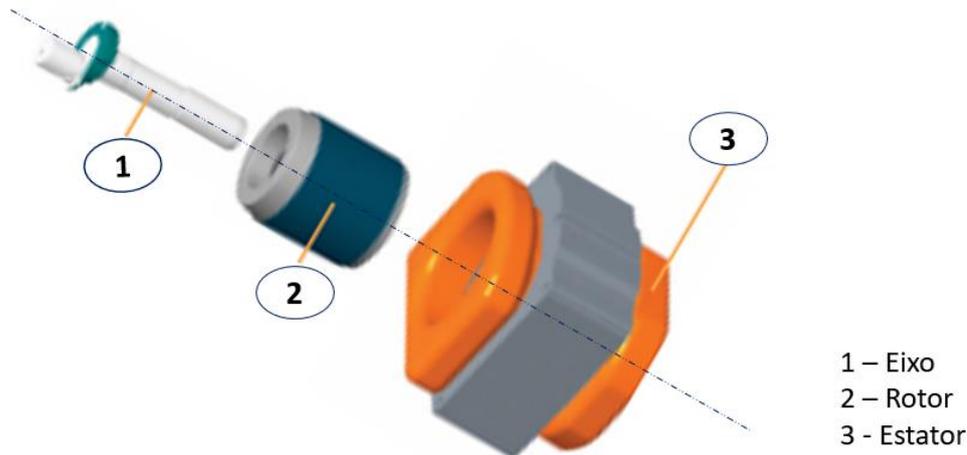


Figura 15. Componentes do produto final considerados no mapeamento como estudo de caso

Como ponto de partida, para a elaboração do VSM4S na situação atual, faz-se necessário saber qual será a demanda do cliente em quantidade de produtos por um determinado período, e a jornada de trabalho para definir o tempo líquido disponível (TLD) para atender essa demanda. Neste estudo de caso, para atender a demanda do cliente, a fábrica precisa operar com uma produção diária de 28.098 compressores por dia. A jornada de trabalho consiste em um regime semanal de trabalho 4 x 3 (4 dias trabalhados e 3 dias de descanso), com dois turnos diários de 11 horas, totalizando um tempo líquido disponível (TLD) de 22 horas por dia para produção.

Baseando-se na demanda do cliente e no tempo líquido disponível de produção (TLD), define-se o tempo “takt” (tempo ritmo) de produção necessário em cada um dos processos para atender a demanda diária de 28.098 compressores. O cálculo abaixo resulta no ritmo, que precisa ser imposto a cada um dos processos: o tempo necessário para se produzir uma unidade de produção, neste caso em segundos/peça.

$$\text{Tempo Takt} = \frac{TLD}{Demanda} = \frac{22\text{hs}/\text{dia}}{28.098 \text{ pçs}/\text{dia}} = \frac{79200\text{seg}/\text{dia}}{28.098 \text{ pçs}/\text{dia}} = 2,82 \frac{\text{seg.}}{\text{peça}}$$

A Figura 16 apresenta o VSM tradicional referente aos processos produtivos dos componentes eixo, rotor e estator respectivamente, e como processo final, a montagem e teste. O mapa apresenta seis processos necessários, cada um com suas respectivas estações de atividades, por onde os componentes passam e são processados para compor o produto final. O primeiro fluxo, que é o de informação, inicia-se com a demanda do cliente na parte superior direita do mapa e, em seguida, comunica-se com as áreas de vendas, planejamento de produção e aquisição dos materiais necessários para a produção das peças, culminando nos fornecedores. O segundo fluxo, que é o de materiais, tem início a partir da entrada da matéria-prima na empresa, atravessando todos os processos necessários para cada um dos componentes até a expedição ao cliente final. Tanto o fluxo de informações quanto o de materiais podem ser mapeados com o objetivo de enxergar oportunidades de melhorias no âmbito operacional.

Esses processos, que até então vêm sendo avaliados no mapeamento tradicional, ainda apresentam apenas indicadores sobre suas capacidades nominais relativas aos seus desempenhos no âmbito econômico. A Figura 16 exhibe os dados relacionados à quantidade de matéria-prima disponível no almoxarifado de recebimento para a produção dos componentes mapeados. No contexto do VSM tradicional, esses dados são empregados exclusivamente para calcular métricas como nível de estoque, *lead time* e outras informações pertinentes à otimização econômica.

No VSM4S proposto neste estudo, esses mesmos dados são utilizados também para analisar os impactos ambientais causados na natureza, tanto pela extração dos recursos (meio ambiente como doador) quanto pelo recebimento dos resíduos gerados durante o processamento dos materiais (meio ambiente como receptor). O consumo de energia elétrica é um outro indicador também analisado no VSM4S, pois, além do retorno econômico pela redução do seu consumo na empresa, resulta em ganhos ambientais pela não necessidade de gerar mais eletricidade.

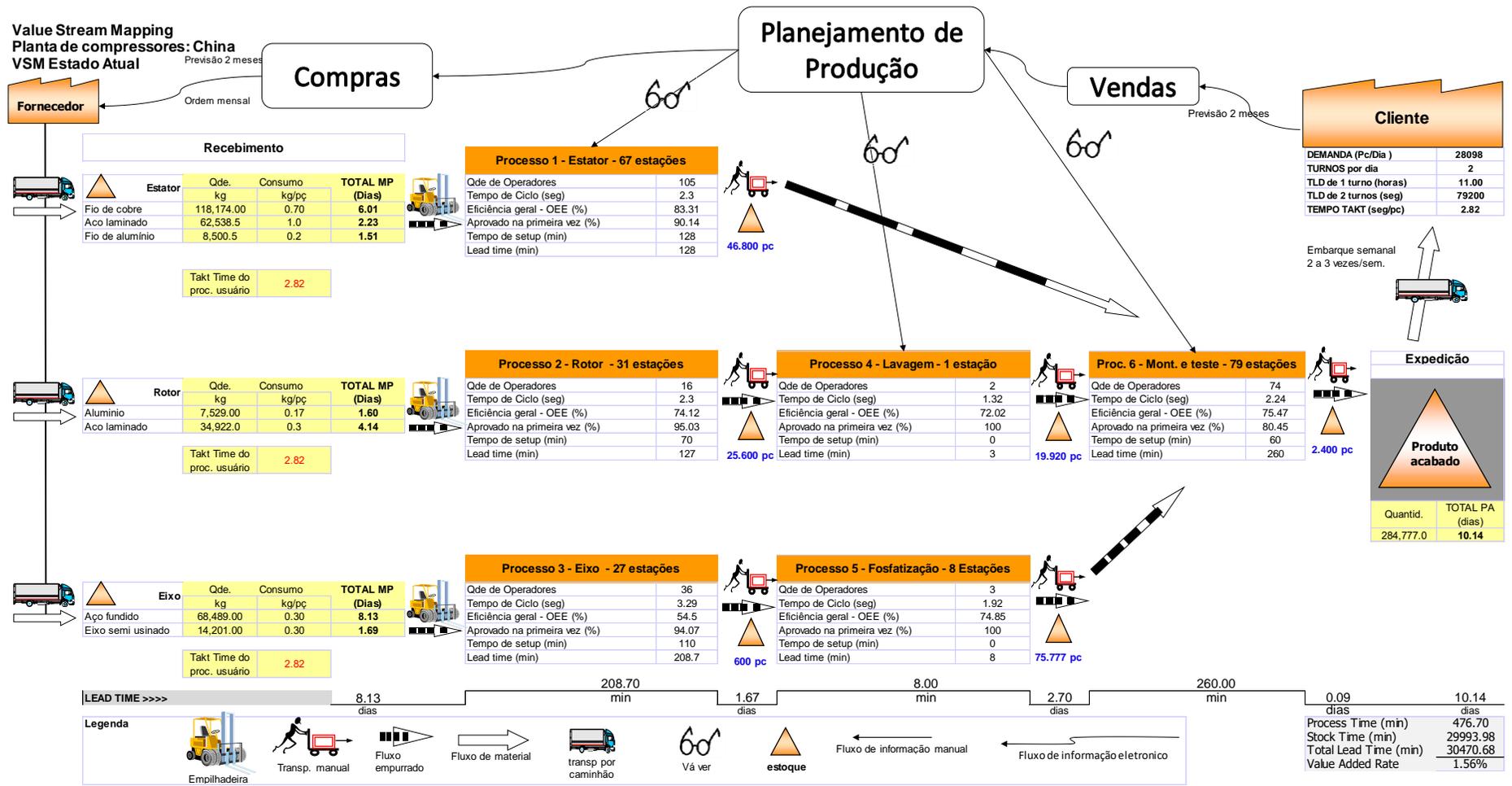


Figura 16. VSM tradicional estado atual referente aos fluxos produtivos mapeados considerando apenas os indicadores econômicos. Elaborado pelo autor.

## 7.1. VSM4S do estado atual

### 7.1.1. Seleção dos indicadores ambientais, econômicos e sociais

Os indicadores ambientais e sociais incluídos no VSM tradicional da empresa para este estudo foram selecionados conforme recomendações da literatura científica e a experiência do autor. Os indicadores selecionados são apresentados na Tabela 9, baseando-se nos indicadores da Figura 16, no tipo de produto da empresa, e respeitando o modelo 5SEnSU. Há quatro indicadores representando cada capital (econômico, social e ambiental), e os capitais social e ambiental dividem-se em dois, representando o doador e o receptor.

Apesar de os indicadores já terem sido escolhidos e calculados nesta tese, a seguir, são apresentadas algumas sugestões e ideias para os tomadores de decisão sobre a escolha de novos indicadores, quando for conveniente ou de acordo com a necessidade.

- a. Indicadores ambientais: Redução no consumo de matéria-prima por meio da implementação da remanufatura para alguns componentes, e algumas peças, que compõem o produto, não sofrem nenhum desgaste durante o uso, podendo ser reutilizadas em um novo produto (Zanghelini et al., 2014). Na substituição da matéria-prima empregada na fabricação dos componentes por produtos mais sustentáveis, resulta em menor impacto ambiental. No emprego da economia circular, considerar todas as etapas: extração; transformação; consumo do produto; manutenção e reparo; reutilização completa ou parte dos materiais e reciclagem.
- b. Indicadores sociais: Esses indicadores também serão melhorados, pois o mapeamento realizado, na proposta do VSM4S, requer uma maior atenção direcionada aos problemas que afetam a segurança e a motivação das pessoas no ambiente de trabalho, possibilitando melhorar o bem-estar não só dos funcionários, como também da comunidade, que reside no entorno da empresa.
- c. Indicadores econômicos: Esses já vêm sendo tradicionalmente analisados, pois a prática em busca de resultados nessa área já é difundida nas empresas por meio do emprego do VSM tradicional, porém a substituição

pelo VSM4S irá aumentar ainda mais os ganhos econômico, face às medidas tomadas no âmbito ambiental e social, como redução no consumo de insumos (óleos, graxas e outros), redução de energia, reuso de água, eliminação de vazamentos nos equipamentos evitando a contaminação do solo, tratamento dos resíduos e melhoria no seu sistema de descarte (Chiarini, 2014). É importante o alinhamento no planejamento estratégico da empresa, em relação ao nível de sustentabilidade que a operação quer atingir, considerando para isso os aspectos no âmbito ambiental, econômico e social.

#### 7.1.2. Quantificação dos indicadores e seus valores determinados

Após a escolha dos indicadores, eles são quantificados por meio de coleta de dados primários, em cada um dos processos mapeados, para retratar a situação atual. A Tabela 9 apresenta os valores dos indicadores para calcular seus respectivos valores determinados representados em cada um dos processos do fluxo de produção mapeado. A Figura 17 apresenta o novo mapeamento do fluxo de valor, mas agora contemplando todos os indicadores que irão compor os cinco setores do modelo 5SEnSU. A quantificação dos indicadores selecionados foi elaborada com dados obtidos de um estudo de caso real. Todo o memorial de cálculo dos indicadores da Tabela 9 estão detalhadamente apresentados nos Apêndices B-M.

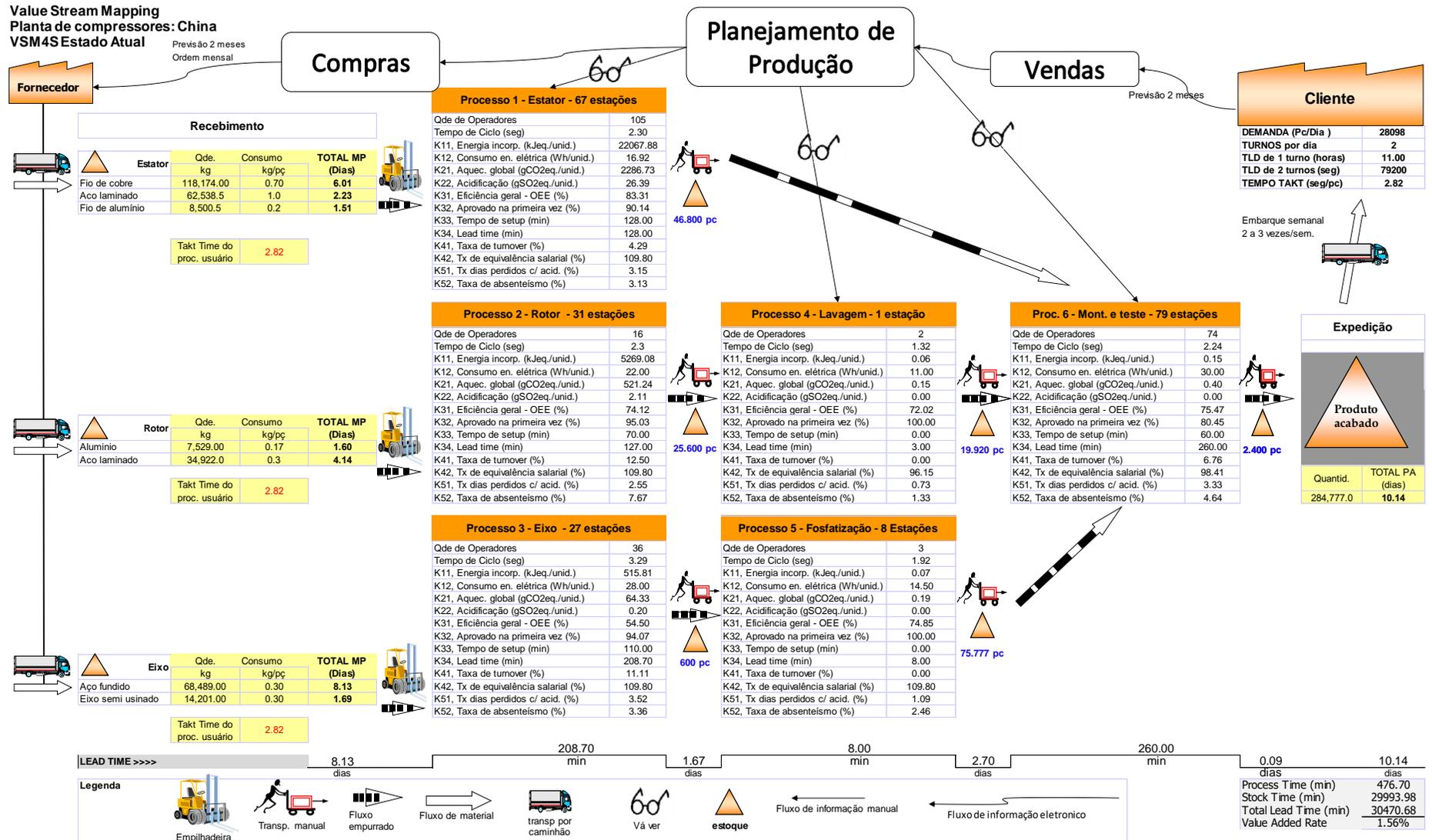


Figura 17. VSM4S estado atual referente aos fluxos produtivos mapeados considerando os indicadores ambientais econômicos e sociais. Elaborado pelo autor.

Tabela 9. Indicadores escolhidos, com seus respectivos valores para cada um dos processos, e seus valores determinados para o estudo de caso. Os valores correspondem ao VSM4S estado atual.

Indicadores Escolhidos	Processos industriais						Estoque MP / WIP / PA	Valores determinados	Critério
	P1	P2	P3	P4	P5	P6			
k <sub>11</sub> , Energia incorporada (kJeq./unid.)	22067,88	5269,08	515,81	0,06	0,07	0,15		27853,05	Total
k <sub>12</sub> , Consumo energia elétrica (Wh/unid.)	16,92	22,00	28,00	11,00	14,5	30,00		122,42	Total
k <sub>21</sub> , Aquecimento global (gCO <sub>2</sub> eq./unid.)	2286,73	521,24	64,33	0,15	0,19	0,40		2873,04	Total
k <sub>22</sub> , Acidificação (gSO <sub>2</sub> eq./unid.)	26,39	2,11	0,20	0,00	0,00	0,00		28,71	Total
k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	83,31	74,12	54,50	72,02	74,85	75,47		54,50	Menor valor
k <sub>32</sub> , Aprovado na primeira vez (%)	90,14	95,03	94,07	100,00	100,00	80,45		80,45	Menor valor
k <sub>33</sub> , Tempo de setup (min)	128,00	70,00	110,00	0,00	0,00	60,00		128,00	Maior valor
k <sub>34</sub> , Lead time (min)	128,00	127,00	208,70	3,00	8,00	260,00	29979,43*	30456,13	Total
k <sub>41</sub> , Taxa de turnover (%)	4,29	12,50	11,11	0,00	0,00	6,76		6,57	%Total
k <sub>42</sub> , Taxa de equivalência salarial (%)	109,80	109,80	109,80	96,15	109,80	98,41		96,15	Menor valor
k <sub>51</sub> , Taxa de dias perdidos por acidente (%)	3,15	2,55	3,52	0,73	1,09	3,33		14,36	Total
k <sub>52</sub> , Taxa de absenteísmo (%)	3,13	7,67	3,36	1,33	2,46	4,64		3,76	%Total

unid. = uma unidade produzida.

\*O valor determinado do lead time considera apenas o maior tempo entre P1; P2; P3 (208,7min); maior tempo entre P4 e P5 (8,0min); P6 (260min); Estoque (29941,18min).

MP = matéria prima; WIP = estoque em processo (*work in process*); PA = produto acabado.

O processo de cálculo dos indicadores está representado em detalhes nos Apêndices B-M.

### 7.1.3 Estabelecimento de metas, punições, pesos e objetivos para os indicadores

A Tabela 10 apresenta as metas 5SenSu definidas para cada indicador. Para os indicadores ambientais dos setores 1 e 2 (energia incorporada, consumo de energia elétrica, aquecimento global e acidificação), tomou-se como base o objetivo de desenvolvimento sustentável 13 (ODS 13) que trata da ação contra a mudança global do clima, cuja meta é reduzir a emissões de CO<sub>2</sub> em até 7,6% anualmente, a partir de 2020, até 2030 (relatório ODS 2020). Essa redução de 7,6% foi aplicada nos quatro valores dos respectivos indicadores ambientais com base no mapeamento VSM4S estado atual. Para os indicadores econômicos as metas foram estabelecidas baseando-se nos resultados obtidos em cada um dos processos mapeados no estado atual, e na experiência do autor desta tese para melhorar a qualidade, a eficiência e a produtividade, para atender as expectativas de mercado no estado futuro. Para os indicadores sociais, o estabelecimento das metas se deu por meio de cálculos padrões, utilizados em empresas de manufatura, baseado em metas históricas estabelecidas em períodos anteriores à própria empresa, e em práticas de *benchmark* com empresas do mesmo porte e segmento. Em outras palavras, baseou-se em práticas já adotadas no VSM tradicional. Essas metas são baseadas na experiência do especialista (autor desta tese) e já vem sendo realizada no VSM tradicional.

Em relação aos objetivos, há a busca de minimizar ou maximizar os indicadores de acordo com as suas características. Por exemplo, no setor ambiental deve-se reduzir a extração de recursos naturais e evitar danos causados pelo sistema avaliado sobre o meio ambiente. Nos setores econômico e social, busca-se, de forma geral, aumentar a eficiência, reduzir desperdícios ou perdas e proporcionar um salário justo aos trabalhadores.

Pesos iguais foram assumidos para todos os indicadores. Em relação às punições, foram considerados os valores sugeridos pelo modelo VSM4S, apresentado no capítulo 1, ou seja, 2,3 para setores ambientais, 1,8 para o econômico, e 4,9 para os sociais, baseados em um perfil cultural de um analista individualista.

Tabela 10. Meta, punição, peso e objetivo de cada indicador utilizado no 5SEnSU para o estudo de caso.

Indicadores escolhidos	Meta	Punição	Peso	Objetivo
k <sub>11</sub> , Energia incorporada (kJeq./unid.)	25736,22	2,3	1	Minimizar
k <sub>12</sub> , Consumo energia elétrica (Wh/unid.)	113,11	2,3	1	Minimizar
k <sub>21</sub> , Aquecimento global (gCO <sub>2</sub> eq./unid.)	2654,69	2,3	1	Minimizar
k <sub>22</sub> , Acidificação (gSO <sub>2</sub> eq./unid.)	26,53	2,3	1	Minimizar
k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	95,00	1,8	1	Maximizar
k <sub>32</sub> , Aprovado na primeira vez (%)	95,00	1,8	1	Maximizar
k <sub>33</sub> , Tempo de setup (min)	15,00	1,8	1	Minimizar
k <sub>34</sub> , Lead time (min)	9716,70	1,8	1	Minimizar
k <sub>41</sub> , Taxa de turnover (%)	9,00	4,9	1	Minimizar
k <sub>42</sub> , Taxa de equivalência salarial (%)	100,00	4,9	1	Maximizar
k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido c/ acidente (%)	12,06	4,9	1	Minimizar
k <sub>52</sub> , Taxa de absenteísmo (%)	1,80	4,9	1	Minimizar

#### 7.1.4. Aplicação do modelo 5SEnSU

Após a definição de todos os indicadores para compor os 5 setores do modelo 5SEnSU com suas respectivas metas, pesos, objetivos e punições, dá-se a aplicação do modelo 5SEnSU com a filosofia da programação por metas. A 'Tabela O1 do Apêndice O' apresenta em detalhes todos os valores calculados da planilha Excel da programação por metas para o VSM4S, com o resultado resumido dos indicadores calculados Tabela 11.

Ao analisar a Tabela 11, o SSI do setor 3 contribuiu mais para o SSIS do estado atual, comparado aos outros setores do modelo 5SEnSU. O valor de 2.56 para o SSI do setor 3 corresponde a 75% do valor do SSIS. Especificamente, 74% do SSI do setor econômico corresponde ao indicador K33 - *Tempo de setup*. Em seguida, o setor 5 apresentou um SSI de 0.64, representando 19% do SSIS. Nesse setor, o indicador K52 - *Taxa de absenteísmo* alcançou um ISG de 1.09, correspondendo a 85% do SSI para o setor social como receptor. Os ISGs dos setores ambientais 1 e 2 apresentaram valores iguais, resultando assim no mesmo valor para os SSIs dos setores. Os setores ambientais representam juntos menos de 5% do desempenho de sustentabilidade do estado atual, possuindo baixa influência no valor de 3.41 para o SSIS, lembrando que valores menores mostram um melhor desempenho em sustentabilidade. Por fim, a sociedade como fornecedora (setor 4) apresentou um SSI de 0.05, ou seja, interferindo com um pouco mais de 1% para o SSIS.

Tabela 11. Meta de sustentabilidade do indicador (ISG), indicador de sustentabilidade do setor (SSI) e indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS) do estado atual para o estudo de caso.

	Indicadores	Cenário Atual
Setor Ambiental	ISG ( $k_{11}$ ; Energia incorporada)	0.08
	ISG ( $k_{12}$ ; Demanda de eletricidade)	0.08
	SSI do Setor 1	0.08
	ISG ( $k_{21}$ ; Potencial de Aquecimento Global)	0.08
	ISG ( $k_{22}$ ; Potencial de Acidificação)	0.08
	SSI do Setor 2	0.08
Setor Econômico	ISG ( $k_{31}$ ; Eficiência geral)	0.43
	ISG ( $k_{32}$ ; Aprovado na primeira vez)	0.15
	ISG ( $k_{33}$ ; Tempo de setup)	7.53
	ISG ( $k_{34}$ ; Lead Time)	2.13
	SSI do Setor 3	2.56
Setor Social	ISG ( $k_{41}$ ; Taxa de turnover)	0.06
	ISG ( $k_{42}$ ; Taxa de equivalência salarial)	0.04
	SSI do Setor 4	0.05
	ISG ( $k_{51}$ ; Taxa de tempo perdido com acidente)	0.19
	ISG ( $k_{52}$ ; Taxa de absenteísmo)	1.09
	SSI do Setor 5	0.64
	SSIS - Indicador de Sustentabilidade do Sistema	3.41

Dados disponíveis no Apêndice O.

## 7.2. Aplicação do VSM4S para o estado futuro

### 7.2.1. Estabelecimento de metas VSM4S para os indicadores ambientais, econômicos e sociais

A aplicação do VSM4S para o estado futuro também se baseia nas etapas apresentadas pela Figura 7. Para estabelecer as metas, o time de especialistas deve se reunir e discutir sobre cenários a curto e longo prazos, considerando a missão e o objetivo da empresa. Isso não foi realizado nesta tese, então, para a elaboração dos 4 cenários propostos para o estado futuro, foi adotado o seguinte critério:

- a) Para o cenário 1, focou-se no setor ambiental, cujos indicadores receberam novos valores referente às metas para estado futuro, mantendo-se para os indicadores dos demais setores (econômico e social) os mesmos valores do estado atual. Aqui foram assumidas melhorias ambientais, incluindo a substituição de matéria-prima e redução no consumo de energia. As seguintes porcentagens de melhoria

em relação ao estado atual foram assumidas:  $k_{11}$ , 20%;  $k_{12}$ , 20%;  $k_{21}$ , 17%;  $k_{22}$ , 70%.

- b) Para o cenário 2, focou-se no setor econômico e mantiveram-se os valores dos indicadores dos setores ambiental e social do estado atual. Aqui assumiu-se reduzir e minimizar perdas e desperdícios inerentes aos processos. As seguintes porcentagens de melhoria em relação ao estado atual foram assumidas:  $k_{31}$ , 36%;  $k_{32}$ , 09%;  $k_{33}$ , 43%;  $k_{34}$ , 68%.
- c) Para o cenário 3, focou-se no setor social e mantiveram-se os valores para os indicadores dos setores ambiental e econômico obtidos como resultado no estado atual. Aqui houve melhores condições de trabalho, segurança e motivação para os trabalhadores. Nesse cenário, todos os *stakeholders* devem ser envolvidos, como empresa, cliente, fornecedores e a vizinhança no entorno da empresa. As seguintes porcentagens de melhoria em relação ao estado atual foram assumidas:  $k_{41}$ , 58%;  $k_{42}$ , 14%;  $k_{51}$ , 16%;  $k_{52}$ , 50%.
- d) Para o cenário 4, são consideradas, para todos os setores (ambiental, econômico e social), metas futuras com valores atribuídos a todos os indicadores. Nesse caso, o setor ambiental recebe os valores do cenário 1, o econômico do cenário 2 e o social do cenário 3. O propósito é mostrar um cenário considerando todas as propostas de melhoria dos cenários anteriores.

A Tabela 12 apresenta os valores de todos os indicadores para cada um dos processos no mapeamento, e seus valores determinados para o estudo de caso. Esses valores correspondem ao VSM4S estado futuro em 4 diferentes cenários com foco ambiental, econômico e social, resultando por meio da aplicação do modelo 5SEnSU nos diferentes indicadores SSIS para cada um dos cenários avaliados.

Tabela 12. Valores dos indicadores para cada um dos processos, e seus valores determinados para o estudo de caso (Figura 17). Os valores correspondem ao VSM4S estado futuro em 4 diferentes cenários com foco ambiental, econômico, social.

Indicadores	Processos industriais <sup>a</sup>						Estoque MP / WIP / PA	Valores determinados	Critério	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6				
Cenário 1 Com foco AMBIENTAL	k <sub>11</sub> , Energia incorporada (kJeq./unid.)	16483.21	5269.06	515.78	0.04	0.06	0.12	22268.28	Total	
	k <sub>12</sub> , Consumo energia elétrica (Wh/unid.)	13.54	17.60	22.40	8.80	11.6	24.00	97.94	Total	
	k <sub>21</sub> , Aquecimento global (gCO <sub>2</sub> eq./unid.)	1802.84	521.18	64.25	0.12	0.15	0.32	2388.86	Total	
	k <sub>22</sub> , Acidificação (gSO <sub>2</sub> eq./unid.)	6.20	2.11	0.20	0.00	0.00	0.00	8.51	Total	
	k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	83.31	74.12	54.50	72.02	74.85	75.47	54.50	Menor valor	
	k <sub>32</sub> , Aprovado na primeira vez (%)	90.14	95.03	94.07	100.00	100.00	80.45	80.45	Menor valor	
	k <sub>33</sub> , Tempo de setup (min)	128.00	70.00	110.00	0.00	0.00	60.00	128.00	Maior valor	
	k <sub>34</sub> , Lead time (min)	128.00	127.00	208.70	3.00	8.00	260.00	29979.43	30456.13	Total
	k <sub>41</sub> , Taxa de turnover (%)	4.29	12.50	11.11	0.00	0.00	6.76	6.57	%Total	
	k <sub>42</sub> , Taxa de equivalência salarial (%)	109.80	109.80	109.80	96.15	109.80	98.41	96.15	Menor valor	
	k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido c/ acidente (%)	3.15	2.55	3.52	0.73	1.09	3.33	14.36	Total	
k <sub>52</sub> , Taxa de absenteísmo (%)	3.13	7.67	3.36	1.33	2.46	4.64	3.76	% Total		
Cenário 2 Com foco ECONÔMICO	k <sub>11</sub> , Energia incorporada (kJeq./unid.)	22067.88	5269.08	515.81	0.06	0.07	0.15	27853.05	Total	
	k <sub>12</sub> , Consumo energia elétrica (Wh/unid.)	16.92	22.00	28.00	11.00	14.5	30.00	122.42	Total	
	k <sub>21</sub> , Aquecimento global (gCO <sub>2</sub> eq./unid.)	2286.73	521.24	64.33	0.15	0.19	0.40	2873.04	Total	
	k <sub>22</sub> , Acidificação (gSO <sub>2</sub> eq./unid.)	26.39	2.11	0.20	0.00	0.00	0.00	28.71	Total	
	k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	88.00	78.00	74.00	75.00	77.00	92.00	74.00	Menor valor	
	k <sub>32</sub> , Aprovado na primeira vez (%)	92.00	93.00	98.00	100.00	100.00	88.00	88.00	Menor valor	
	k <sub>33</sub> , Tempo de setup (min)	73.00	60.00	56.00	0.00	0.00	45.00	73.00	Maior valor	
	k <sub>34</sub> , Lead time (min)	128.00	127.00	208.70	3.00	8.00	260.00	9240.00	9716.70	Total
	k <sub>41</sub> , Taxa de turnover (%)	4.29	12.50	11.11	0.00	0.00	6.76	6.57	%Total	
	k <sub>42</sub> , Taxa de equivalência salarial (%)	109.80	109.80	109.80	96.15	109.80	98.41	96.15	Menor valor	
	k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido c/ acidente (%)	3.15	2.55	3.52	0.73	1.09	3.33	14.36	Total	
k <sub>52</sub> , Taxa de absenteísmo (%)	3.13	7.67	3.36	1.33	2.46	4.64	3.76	%Total		

<sup>a</sup> Valores dos indicadores para cada processo obtido utilizando-se dos valores do estado atual (Tabela 9) acrescido das porcentagens conforme descrição de cada cenário apresentado no corpo do texto principal.

Tabela 12. Continuação.

Indicadores	Processos industriais <sup>a</sup>						Estoque	Valores determinados	Critério	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	MP / WIP / PA			
Cenário 3 Com foco SOCIAL	k <sub>11</sub> , Energia incorporada (kJeq./unid.)	22067.88	5269.08	515.81	0.06	0.07	0.15		27853.05	Total
	k <sub>12</sub> , Consumo energia elétrica (Wh/unid.)	16.92	22.00	28.00	11.00	14.5	30.00		122.42	Total
	k <sub>21</sub> , Aquecimento global (gCO <sub>2</sub> eq./unid.)	2286.73	521.24	64.33	0.15	0.19	0.40		2873.04	Total
	k <sub>22</sub> , Acidificação (gSO <sub>2</sub> eq./unid.)	26.39	2.11	0.20	0.00	0.00	0.00		28.71	Total
	k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	83.31	74.12	54.50	72.02	74.85	75.47		54.50	Menor valor
	k <sub>32</sub> , Aprovado na primeira vez (%)	90.14	95.03	94.07	100.00	100.00	80.45		80.45	Menor valor
	k <sub>33</sub> , Tempo de setup (min)	128.00	70.00	110.00	0.00	0.00	60.00		128.00	Maior valor
	k <sub>34</sub> , Lead time (min)	128.00	127.00	208.70	3.00	8.00	260.00	29979.43	30456.13	Total
	k <sub>41</sub> , Taxa de turnover (%)	1.90	3.13	4.17	0.00	0.00	3.38		2.75	%Total
	k <sub>42</sub> , Taxa de equivalência salarial (%)	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00		110.00	Menor valor
	k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido c/ acidente (%)	2.65	2.14	2.95	0.61	0.91	2.80		12.06	Total
k <sub>52</sub> , Taxa de absenteísmo (%)	1.56	3.84	1.68	0.66	1.23	2.32		1.88	%Total	
Cenário 4 Com foco AMB; ECON; e SOC	k <sub>11</sub> , Energia incorporada (kJeq./unid.)	16483.21	5269.06	515.78	0.04	0.06	0.12		22268.28	Total
	k <sub>12</sub> , Consumo energia elétrica (Wh/unid.)	13.54	17.60	22.40	8.80	11.6	24.00		97.94	Total
	k <sub>21</sub> , Aquecimento global (gCO <sub>2</sub> eq./unid.)	1802.84	521.18	64.25	0.12	0.15	0.32		2388.86	Total
	k <sub>22</sub> , Acidificação (gSO <sub>2</sub> eq./unid.)	6.20	2.11	0.20	0.00	0.00	0.00		8.51	Total
	k <sub>31</sub> , Eficiência geral - OEE (%)	88.00	78.00	74.00	75.00	77.00	92.00		74.00	Menor valor
	k <sub>32</sub> , Aprovado na primeira vez (%)	92.00	93.00	98.00	100.00	100.00	88.00		88.00	Menor valor
	k <sub>33</sub> , Tempo de setup (min)	73.00	60.00	56.00	0.00	0.00	45.00		73.00	Maior valor
	k <sub>34</sub> , Lead time (min)	128.00	127.00	208.70	3.00	8.00	260.00	9240.00	9716.70	Total
	k <sub>41</sub> , Taxa de turnover (%)	1.90	3.13	4.17	0.00	0.00	3.38		2.75	%Total
	k <sub>42</sub> , Taxa de equivalência salarial (%)	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00		110.00	Menor valor
	k <sub>51</sub> , Taxa de tempo perdido c/ acidente (%)	2.65	2.14	2.95	0.61	0.91	2.80		12.06	Total
k <sub>52</sub> , Taxa de absenteísmo (%)	1.56	3.84	1.68	0.66	1.23	2.32		1.88	%Total	

<sup>a</sup> Valores dos indicadores para cada processo obtido utilizando-se dos valores do estado atual (Tabela 9) acrescido das porcentagens conforme descrição de cada cenário apresentado no corpo do texto principal.

### 7.2.2. Projetos Kaizen para alcançar as metas VSM4S dos cenários futuros propostos

Os planos de projetos Kaizen são elaborados levando em consideração os resultados obtidos no mapeamento da situação atual e nas metas para o VSM4S no estado futuro, estabelecidas para cada um dos indicadores nos diferentes cenários propostos. Os projetos Kaizens estabelecidos nos planos para cada um dos cenários propostos terão diferentes tamanhos e prazos, com diferentes tipos de ferramentas com seus respectivos níveis de complexidade, exigindo para isso times com especialistas, cuja expertise depende dos problemas a serem solucionados.

Cada plano de projeto irá demandar um determinado valor de investimento necessário para a implementação das atividades, e o retorno sobre esse investimento está representado neste estudo pela variável “B/C ratio” (taxa benefício pelo custo). Uma segunda demanda consiste na necessidade de recursos humanos representada pela variável FTE (*Full Time Equivalent*). Para este estudo, embora os dados coletados para compor o estado atual são dados reais, a elaboração dos planos de projetos, bem como a formação dos times não se aplica na prática, uma vez que o caso prático para o estado futuro não foi realizado.

### 7.2.3. Cálculo dos resultados determinados dos indicadores

A Tabela 12 apresenta os valores para cada um dos indicadores inerentes a cada um dos 6 processos mapeados no VSM4S, e a quantidade total dos estoques para calcular o indicador *lead time* (k34) resultou da somatória dos estoques referentes à matéria-prima, os estoques localizados nos 6 processos e os estoques de produtos acabados após a montagem final.

Para a obtenção dos valores determinados para cada um dos indicadores foram adotados os critérios de acordo com a característica de cada um deles (somatória, menor mais crítico, maior mais crítico e o percentual geral). No caso de processos que ocorrem em paralelo, como é o caso dos processos (1, 2 e 3) (4 e 5) considera-se apenas o processo, cujo indicador tem maior criticidade, ou seja, aquele indicador que requer ações prioritárias sobre os demais. Por exemplo, quando o objetivo é alcançar o menor valor para um indicador, deve-se agir naquele indicador de maior valor.

#### 7.2.4. Aplicação da filosofia da programação por metas baseada no 5SEnSU

Por meio da aplicação do modelo 5SEnSU, é possível obter o nível de sustentabilidade de cada um dos quatro cenários representados pelo indicador SSIS, conforme apresentado na Tabela 12. As metas 5SEnSU, bem como os objetivos, punições e pesos mantêm os valores tanto para o estado atual quanto para o estado futuro, sendo iguais aos valores da Tabela 10. Os valores apresentados na Tabela 13 são resultantes da aplicação da programação por metas, calculados na planilha Excel para o VSM4S. A planilha completa encontra-se na Tabela O1 do Apêndice O.

Ao analisar a Tabela 13, o cenário com o melhor desempenho em sustentabilidade, ou seja, menor SSIS, é o cenário 4 (1,37). Apesar de possuir o melhor cenário, seu indicador foi mais impactado pelo setor econômico (1,04; ou 76% do SSIS) e pelo setor 2, meio ambiente como receptor de resíduos (0,17; ou 12% do SSIS). Portanto, ações deveriam ser priorizadas nesses setores para alcançar um melhor desempenho em sustentabilidade. Os indicadores que mais contribuíram negativamente para esse desempenho são o  $K_{33}$  (Tempo de setup) e o  $K_{22}$  (Potencial de Acidificação).

Em seguida, o segundo melhor desempenho em sustentabilidade foi obtido pelo cenário 2 (SSIS de 1,89). Assim como no cenário 4, o impacto negativo sobre o SSIS do cenário 2 foi mais influenciado por 2 dos 5 setores do 5SEnSU. De forma detalhada, o setor 3 (55%) e o setor 5 (34%) impactaram negativamente com 89% no SSIS, já os setores 1, 2 e 4 impactaram de forma combinada com 11% para o SSIS. Nesse cenário, ações poderiam ser consideradas inicialmente para reduzir o SSI (melhorar a sustentabilidade) do setor 3 e, em seguida, do setor 5. O cenário 4 foi desenvolvido com base nas melhores características dos cenários anteriores, ou seja, o cenário 1 focou no aspecto ambiental (mantendo as condições do estado atual para o setor econômico e social) e o mesmo foi considerado no cenário 4; o cenário 2 focou em melhorias do aspecto econômico, e igualmente considerado no cenário 4; e o mesmo aconteceu para o cenário 3, que priorizou ações sociais, resultando no melhor desempenho em sustentabilidade para o setor social e serviu como referência para o setor social do cenário 4. Apesar disso, foi possível perceber que mesmo com essas considerações, o cenário 2 apresentou um desempenho em sustentabilidade aproximado do cenário 4.

Por fim, os cenários 1 e 3 também apresentaram valores próximos entre si para o SSIS, sendo de 3,48 para o cenário 1 e de 2,83 para o cenário 3. Além disso, o setor econômico foi o que mais impactou negativamente para o SSIS de ambos os cenários, possuindo SSI iguais (2,56). Entre os quatro indicadores avaliados no setor 3 (econômico), o  $k_{33}$  – *Tempo de setup* determinou esse impacto negativo no resultado do desempenho de sustentabilidade dos cenários 1 e 3. De forma geral, dentro desses dois cenários, ações devem ser priorizadas para reduzir o valor do SSI do setor econômico, agindo especificamente no *Tempo de setup*, pois representa mais de 54% do valor do SSIS desses cenários.

Tabela 13. Meta de sustentabilidade do indicador (ISG), indicador de sustentabilidade do setor (SSI) e indicador de sustentabilidade do sistema (SSIS) do estado futuro para o estudo de caso.

	Indicadores	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Setor Ambiental	ISG ( $k_{11}$ ; Energia incorporada)	0.06	0.08	0.08	0.06
	ISG ( $k_{12}$ ; Demanda de eletricidade)	0.06	0.08	0.08	0.06
	SSI do Setor 1	0.06	0.08	0.08	0.06
	ISG ( $k_{21}$ ; Potencial de Aquecimento Global)	0.04	0.08	0.08	0.04
	ISG ( $k_{22}$ ; Potencial de Acidificação)	0.30	0.08	0.08	0.30
	SSI do Setor 2	0.17	0.08	0.08	0.17
Setor Econômico	ISG ( $k_{31}$ ; Eficiência geral)	0.43	0.22	0.43	0.22
	ISG ( $k_{32}$ ; Aprovado na primeira vez)	0.15	0.07	0.15	0.07
	ISG ( $k_{33}$ ; Tempo de setup)	7.53	3.87	7.53	3.87
	ISG ( $k_{34}$ ; Lead Time)	2.13	0.00	2.13	0.00
	SSI do Setor 3	2.56	1.04	2.56	1.04
Setor Social	ISG ( $k_{41}$ ; Taxa de turnover)	0.06	0.06	0.14	0.14
	ISG ( $k_{42}$ ; Taxa de equivalência salarial)	0.04	0.04	0.02	0.02
	SSI do Setor 4	0.05	0.05	0.08	0.08
	ISG ( $k_{51}$ ; Taxa de tempo perdido com acidente)	0.19	0.19	0.00	0.00
	ISG ( $k_{52}$ ; Taxa de absenteísmo)	1.09	1.09	0.05	0.05
	SSI do Setor 5	0.64	0.64	0.02	0.02
	SSIS - Indicador de Sustentabilidade do Sistema	3.48	1.89	2.83	1.37

#### 7.2.5. Tomada de decisão final

Conforme já esclarecido anteriormente, para este estudo de caso apenas os dados primários apresentam valores reais, levantados para obter o estado atual do VSM4S. Os demais valores para a elaboração do estado futuro (metas, cenários e escolha dos indicadores) são adotados com base na experiência do autor desta tese para possibilitar o teste da ferramenta, porém, é importante enfatizar que isso não interfere no objetivo de testar a ferramenta proposta.

Além do SSIS, uma segunda variável importante ao decisor é a relação benefício (retorno) pelo custo de implementação das melhorias, representada pela

taxa (B/C ratio). Cada cenário com seu respectivo plano de projetos requer diferentes níveis de investimento para a implementação das melhorias, assim como possibilita diferentes níveis de retorno financeiro, como exemplificado na Tabela 13.

Analisando a Tabela 14, no cenário 1, o foco de melhorias foi direcionado apenas para o setor ambiental, resultando na definição de novas metas apenas para esse setor, justificando a necessidade de novos projetos, razão pela qual somente nesse cenário se calcula a taxa B/C. O mesmo critério se aplica para o cenário 2, cujo foco foi voltado para o setor econômico, e para o cenário 3, no setor social, respectivamente. Para o cenário 4, definiram-se novas metas para todos os setores, o que requer projetos de melhorias para todos.

Tabela 14. Valores das taxas B/C para a escolha entre os quatro cenários propostos para a elaboração do VSM4S estado futuro.

Projetos	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Benefício	Custo	Benefício	Custo	Benefício	Custo	Benefício	Custo
Projetos Ambientais	38.000	20.000					\$38.000	\$20.000
B/C	1,9						1,9	
Projetos Econômicos			36500	13.000			\$36500	\$13.000
B/C			2,8				2,8	
Projetos Sociais					30.000	14.500	\$30.000	\$14.500
B/C					2,07		2,07	
Total	38.000	20.000	36.500	13.000	30.000	14.500	\$104.500	\$47.500
B/C	1,90		2,80		2,07		2,2	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 15 apresenta o indicador relacionado ao emprego de recursos de pessoas na realização dos projetos representado pelo coeficiente *Full Time Equivalent* (FTE), uma última, porém, não menos importante variável a ser considerada, para que as melhorias possam ser implementadas e os projetos concluídos. Em relação ao emprego dos recursos de pessoas direcionado para os projetos nos respectivos setores (FTE), seguiu-se o mesmo critério adotado descrito para o cálculo da taxa B/C (valores assumidos pelo autor desta tese) conforme pode-se constatar na Tabela 15. Como descrito anteriormente (item 6.2.6), para este estudo de caso, convencionou-se que um FTE corresponde a um dia de uma pessoa dedicada em projetos, porém esse coeficiente pode ser diferente, dependendo da decisão do especialista de cada empresa, ou seja, 1 FTE pode corresponder a uma hora, um dia, uma semana, um mês etc. No cenário 1, por exemplo, para os projetos ambientais, assumiu-se que 14 pessoas estariam dedicadas durante 10 dias para realização e conclusão das atividades dos projetos, resultado em um FTE de 140 pessoas dia.

Tabela 15. Valores de Full Time Equivalent (FTE) para a escolha entre os quatro cenários propostos para a elaboração do VSM4S estado futuro

Projetos	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Qde. de pessoas	Dias						
Projetos Ambientais	14	10					14	10
FTE	140						140 pessoas dia	
Projetos Econômicos			14	12			14	12
FTE			168				168 pessoas dia	
Projetos Sociais					14	09	14	09
FTE					126		126 pessoas dia	
Total	14	10	14	12	14	09	14	31
FTE	140		168		126		434 pessoas dia	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fase seguinte consiste na representação gráfica dos três indicadores (SSIS, B/C e FTE) para auxiliar na decisão sobre qual cenário adotar. Os indicadores das Tabelas 13, 14 e 15 são normalizados, considerando o método de normalização ‘max-min’, e diferentemente da taxa B/C, os valores de SSIS e de FTE antes de serem normalizados são representados como 1/SSIS e 1/FTE para indicar desempenho “quanto maior, melhor”. A Figura 18 mostra a posição de cada um dos cenários avaliados dentro do Cubo, cujos resultados são resumidos na Tabela 16.

Tabela 16. Desempenho geral para os quatro cenários avaliados e suas respectivas interpretações por meio da estrutura de CUBO. Os valores correspondem ao estado futuro do VSM4S

VSM4S estado futuro	1/SSIS		B/C		1/FTE		Interpretação do CUBO
	Valor	Normalizado	Valor	Normalizado	Valor	Normalizado	
Cenário 1	0,29	0,00	1,90	0,00	0,007	0,83	Apenas executável no prazo
Cenário 2	0,53	0,55	2,80	1,00	0,006	0,67	Totalmente viável
Cenário 3	0,35	0,15	2,07	0,19	0,008	1,00	Apenas executável no prazo
Cenário 4	0,73	1,00	2,20	0,33	0,002	0,00	Apenas sustentável

Os números entre colchetes são normalizados de acordo com a amostra dos quatro cenários, considerando o método de normalização ‘max-min’ conforme descrito no texto principal. É importante lembrar que SSIS e FTE normalizados são representados como 1/SSIS e 1/FTE para indicar desempenho “quanto maior, melhor”.

A aplicação dos valores normalizados da Tabela 16, no modelo CUBO (Figura 18), possibilita encontrar as características de cada cenário. Dessa forma, é possível mostrar de forma hierárquica quais cenários poderiam ser priorizados, contudo, o tomador de decisão possui liberdade para escolher o cenário que melhor se encaixa nas suas necessidades. O cenário 2 (totalmente viável) possui o melhor desempenho

entre os 4 cenários estudados, seguido pelo cenário 4 (apenas sustentável) e pelos cenários 1 e 3 (apenas executável no prazo).

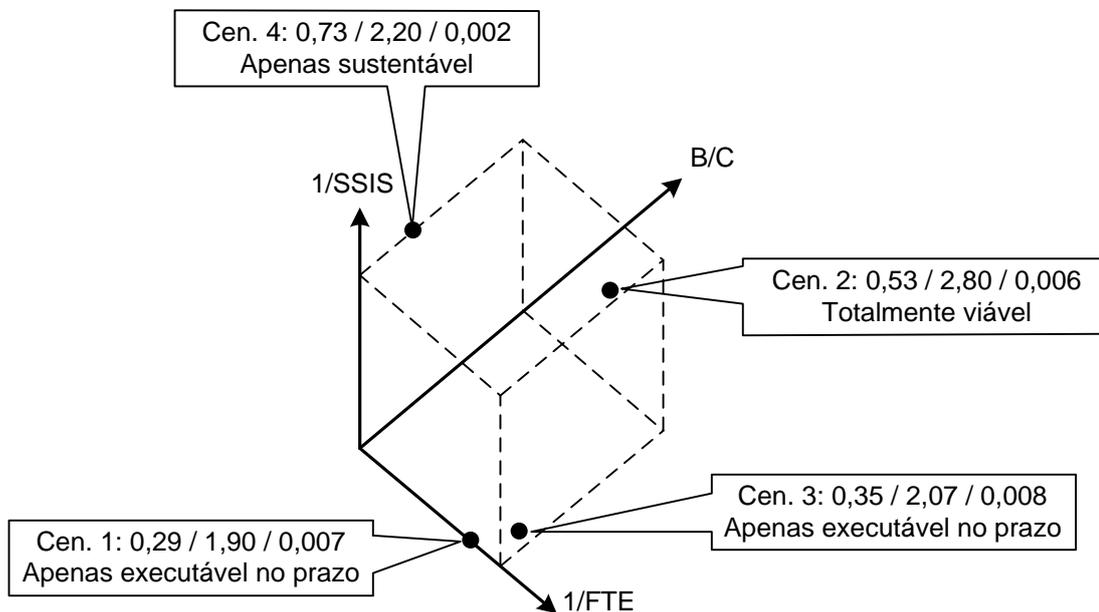


Figura 18. Os quatro cenários propostos representados no cubo para a validação do VSM4S estado futuro, baseando-se nos indicadores de sustentabilidade do sistema (SSIS), na taxa de retorno financeiro (B/C ratio), e na utilização de recursos humanos para a implementação. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma vez que o VSM4S passe a considerar todas as abordagens, para combater as perdas e os desperdícios, na manufatura no âmbito econômico, a exemplo do que já ocorre no VSM tradicional, e também a inclusão dos aspectos ambientais e sociais, tanto no mapeamento para o estado atual quanto nas propostas para o estado futuro, sugere-se que os conceitos da indústria 4.0 passem a ser incluídos como uma fase adicional, para contribuir com a melhora na eficiência dos processos produtivos e no desempenho econômico ambiental e social dos sistemas de manufaturas nas empresas.

Um estudo realizado por Satyro et al. (2022) mostrou que a melhoria da qualidade das linhas de produção e o aumento da competitividade estão entre os principais benefícios da metodologia da indústria 4.0. Os pesquisadores buscaram verificar, por meio da aplicação de questionários com especialistas de empresas multinacionais no Brasil, se as dimensões ambientais e sociais da sustentabilidade são consideradas estratégias prioritárias na indústria 4.0. Os resultados mostraram que a sustentabilidade é uma estratégia secundária dentro da metodologia 4.0, além de revelar que o aspecto social é pouco considerado. A partir dessa pesquisa, a

integração do VSM4S proposto nesta tese com a metodologia da indústria 4.0 podem se complementar na busca por ferramentas, que consideram a dimensão social e a sustentabilidade no seu escopo.

Em outro estudo, Satyro et al. (2021) analisaram o alcance do planejamento e controle de produção (PCP) em indústrias sustentáveis, como um aliado na implementação de estratégias sustentáveis para promover a competitividade. Os resultados revelaram que o papel do PCP varia conforme o tamanho da indústria. Em empresas maiores, por exemplo, o PCP fica restrito às rotinas, enquanto em empresas de porte médio a grande, torna-se colaborativo, alinhando estratégias de operações e negócios para alcançar objetivos mais sustentáveis. Por fim, esses esforços no alcance pela sustentabilidade poderiam ser incluídos no VSM4S estado futuro de forma complementar, para fornecer uma ferramenta ainda mais robusta e, de forma prática, implementá-lo em empresas que buscam desenvolver o pensamento voltado à sustentabilidade.

Após a escolha do cenário (aqui assumindo-se como exemplo que o decisor escolheu o cenário 2), a última etapa consiste na conclusão do VSM4S estado futuro elaborado, conforme ilustrado na Figura 19, representando os novos valores atribuídos aos indicadores ambientais, econômicos e sociais, que foram gerados no cenário escolhido, em substituição aos anteriores reportados no VSM4S estado atual (Figura 16). O exemplo do mapa reflete graficamente todas as alterações, que ocorrerão no fluxo de produção, como movimentação de material com substituição da empilhadeiras por equipamentos de transporte menos poluentes e mais seguros, um melhor controle na aquisição de matéria-prima, reduzindo a quantidade de material em estoque, evitando o risco de obsolescência e como consequência o descarte mesmo antes dos processos, um melhor sincronismo e um menor tempo de atravessamento do material entre os processos, um ambiente de trabalho mais seguro com melhores condições para as pessoas, e outros benefícios, que estão condicionados às conclusões de todas as melhorias definidas no plano de projeto Kaizen para o referido cenário.

O VSM4S estado futuro, uma vez concluído e validado, passa a ser uma ferramenta importante de acompanhamento dos resultados esperados com base nos projetos definidos para o próximo período anual quando esse passa a ser o mapa de referência no estado atual do próximo mapeamento, possibilitando sucessivamente a

realização do ciclo de melhora anual, em âmbito não apenas econômico, mas também ambiental e social nos fluxos de manufatura na empresa.

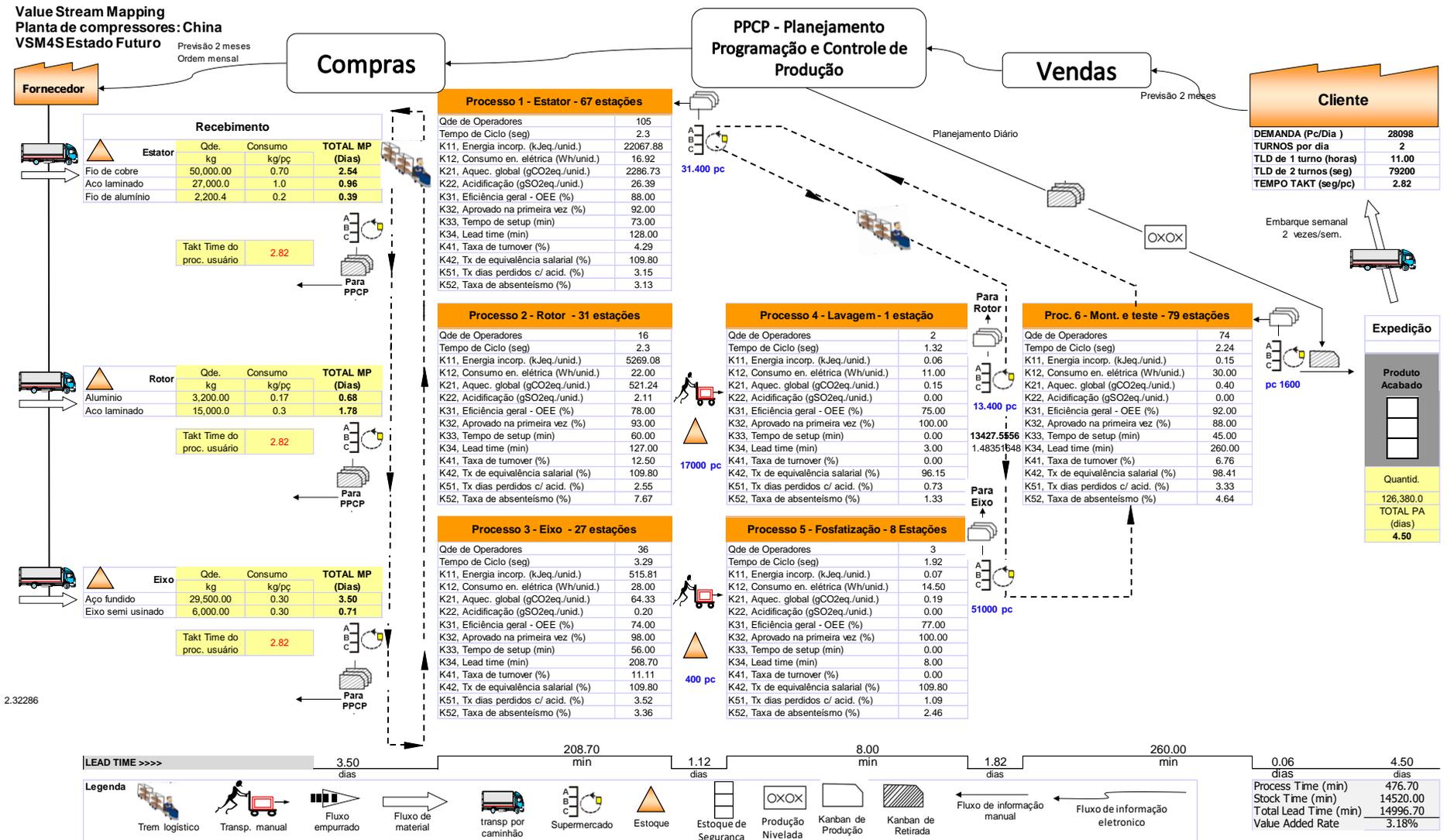


Figura 19. VSM4S baseado-se no cenário escolhido pelo tomador de decisão para o estado futuro, com os novos valores atribuídos aos indicadores ambientais econômicos e sociais. Elaborado pelo autor.

## **8. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO VSM4S PROPOSTO**

Além de estabelecer um novo modelo orientado para a sustentabilidade de manufaturas, também é importante avaliar sua aplicabilidade, caso contrário o modelo proposto dificilmente alcançaria seus propósitos práticos. Esse aspecto não se encerra nesta tese e neste capítulo se discute sobre a aplicabilidade do VSM4S, considerando suas vantagens, desvantagens, os pontos de atenção e as limitações na sua aplicação. Apresentam-se alguns aspectos existentes na literatura científica relacionados à aplicabilidade de novos modelos, e na sequência apresenta-se e discute-se sobre a percepção de especialistas utilizando-se um questionário para obtenção de dados.

### **8.1. Aplicabilidade de VSMs alternativos conforme discutido em literatura científica**

Embora crescente, iniciativas de sustentabilidade têm sido raramente aplicadas em empresas de manufatura devido a diversas barreiras, que dificultam a adoção dessas práticas. Na revisão da literatura sobre o tema realizado por Hariyani e Mishra (2022), foram considerados 545 trabalhos científicos e identificadas 31 barreiras existentes às práticas de sustentabilidade em empresas de manufatura. As “*top-five*” barreiras identificadas incluem: i) falta de conscientização, treinamento, educação e recompensas dos funcionários; ii) baixo comprometimento da alta administração devido à baixa conscientização ou atitude negativa sobre a manufatura sustentável; iii) falta de disponibilidade de informações, comunicação e dados atualizados; iv), parceria deficiente; v) falta de liderança. O VSM4S proposto nesta tese conseguiria superar algumas dessas barreiras, pois fornece em detalhes um método baseado no VSM tradicional já bem difundido e conhecido em empresas de manufatura. Etapas para sua aplicação, dados necessários, forma de calcular e de representar os resultados podem ser consideradas como fortalezas do VSM4S.

Focando na indústria automobilística, segundo Gohoungodji et al. (2020), as principais barreiras à implementação da inovação sustentável na indústria estão relacionadas com barreiras de informação, tecnologia, barreiras organizacionais, leis e regulamentos, destacando-se o comportamento e a disponibilidade de recursos

como os principais impulsionadores. Resultados semelhantes foram obtidos em diferentes estudos, incluindo Mahmood et al. (2019) e Gaikwad et al. (2020), que examinaram os motivadores e as barreiras para a adoção de práticas de sustentabilidade em pequenas e médias empresas Paquistanesas e Indianas, e Ali et al. (2020) identificaram barreiras à implementação do *Lean Six Sigma* em cadeias de abastecimento. Nesses três estudos, de acordo com os autores, as principais barreiras para implementação de projetos de sustentabilidade em empresas de manufatura consistem na falta de compromisso da alta gestão, falta de recursos, falta de sensibilização e motivação para a adoção de práticas de sustentabilidade. Para impulsionar práticas de sustentabilidade nas pequenas e médias empresas, os autores enfatizam que pressão governamental e conscientização dos altos gestores das empresas são aspectos fundamentais.

Como apresentado anteriormente, diversos esforços vêm sendo realizados para modificar o VSM tradicional e torná-lo mais alinhado aos conceitos de sustentabilidade (Simons e Mason, 2002, apud Faulkner e Badurdeen, 2014; Mohamad et al., 2019; Salvador et al., 2021; Garza-Reyes et al., 2018; Helleno et al., 2017; Cheung et al., 2017; entre outros). Mesmo com importantes tentativas, a maioria dos estudos propõe abordagens não integradas entre os capitais econômico, social e ambiental, abordagens estáticas (sem liberdade do analista fazer escolhas de indicadores, por exemplos), ou discutem sobre sustentabilidade sem apresentar modelos epistemologicamente enraizados na ciência. Dessa forma, um diferencial da proposta do VSM4S é superar esses três problemas identificados, pois, além de discutir sobre sustentabilidade baseada no modelo conceitual 5SEnSU, os três capitais econômico, social e ambiental são considerados ao mesmo tempo em uma abordagem multicritério, tornando o resultado mais abrangente e dinâmico, permitindo ao analista que decisões e escolhas sejam feitas na aplicação do modelo. A inclusão da abordagem do cubo para auxiliar na tomada de decisão pode ser entendida como um diferencial, uma vez que o decisor geralmente precisa alinhar as variáveis sustentabilidade, economia e disponibilidade de mão-de-obra para uma decisão estratégica efetiva em busca de empresas de manufatura mais sustentáveis.

## 8.2. Aplicabilidade do VSM4S baseada na percepção de especialistas

Baseando-se na percepção de especialistas (incluindo pesquisadores, gestores, e usuários de ferramentas de gestão) no tema VSM e outras ferramentas da manufatura enxuta, esta seção foca na discussão da aplicação prática do VSM4S proposto.

Para discutir sobre a aplicabilidade do VSM4S, destacando suas vantagens e desvantagens, foi realizada uma pesquisa (um *survey*). O Questionário aplicado aos especialistas encontra-se no Apêndice P, contendo 10 questões de múltipla escolha e uma questão aberta para considerações finais sobre o assunto. O Questionário foi desenvolvido considerando exclusivamente o conhecimento do autor desta tese sobre o tema VSM, e as questões foram direcionadas para a discussão sobre a aplicabilidade do VSM4S; essa é uma limitação deste estudo, uma vez que reuniões participativas deveriam ser realizadas para, talvez, dar maior solidez ao Questionário. O aplicativo 'Google Forms' foi considerado para automatizar a elaboração, envio e recebimento das respostas do Questionário. A pesquisa foi endereçada a 85 potenciais respondentes, incluindo autores de alguns artigos estudados e citados nesta tese, além de gestores e especialistas identificados em redes sociais profissionais (por exemplo, *LinkedIn*) com atuação em empresas nos diversos seguimentos relacionados à manufatura. Essa atividade de levantamento de dados foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa Científica da Universidade Paulista, conforme parecer consubstanciado de número 6.932.871, disponível na plataforma Brasil no sítio <https://plataformabrasil.saude.gov.br/login.jsf>.

Do foco amostral de 85 potenciais respondentes, 29 voluntários responderam todas as questões da pesquisa. As respostas às três primeiras Questões (Questões 1 a 3), referentes ao perfil do público respondente, apresentaram os seguintes resultados:

Questão 1. Seguimento de empresas em que atuam. Respostas: Metal mecânico 54,5%; Alimentos 18,2%; Químicos 4,5%; Textil 4,5%; Plástico 4,5%; Pesquisa 9,5%; Energia renovável 9,0%.

Questão 2. Nível correspondente a posição profissional na organização. Respostas: Gerência 50%; Diretoria 31,8%; Supervisão 13,6%; Presidência 4,5%.

Questão 3. Nível de familiaridade com a ferramenta VSM. Respostas: Atua fortemente na aplicação da ferramenta 36,4%; Atua moderadamente na aplicação 31,8%; Empresa aplica, mas não participa da aplicação 4,5%; Conhece a ferramenta, mas a empresa não aplica 27,3%.

Da amostra de 29 respondentes, a maioria (72%) atua em empresas de metal mecânica e de alimentos, possui cargos de gerência e/ou de diretoria (82%), e já utiliza o VSM tradicional (68%). Isso mostra que, talvez com exceção do seguimento da empresa que possui pouca representatividade, os especialistas que responderam ao Questionário podem ser considerados como representantes de usuários do VSM, dando maior credibilidade aos resultados obtidos sobre a aplicabilidade do VSM4S.

Diferentemente das três primeiras, as questões 4 a 10 estão direcionadas à aplicabilidade do VSM4S, envolvendo desde aspectos de tempo de aplicação, demanda de pessoal, complexidade, etc., até a importância da relação entre os aspectos operacionais e estratégicos da empresa quando aplicando o VSM. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para essas questões, padronizados pela ordem do maior para o menor valor em percentual. Em relação à Questão 4, 41,4% dos especialistas entendem que o VSM4S não aumentaria a carga de trabalho comparativamente à carga já demandada para a aplicação do VSM tradicional, mostrando-se como um fator positivo, uma vez que a variável 'tempo' é muito importante para as decisões estratégicas das empresas. Adicionando os 24,1% que entendem que seguramente a carga de trabalho não seria aumentada, esse percentual alcançaria 65,5%. Por outro lado, uma parcela que não pode ser ignorada de 27,6% entende que a carga de trabalho aumentaria.

Tabela 17. Respostas dos especialistas sobre a aplicabilidade do VSM4S proposto.

Questões	Resultados	
4 - A utilização do VSM4S em comparação ao VSM tradicional, pode aumentar a carga de trabalho para os envolvidos, e como consequência passar a ser uma ferramenta inviável para ser aplicada	Discorda	41,40%
	Concorda	27,60%
	Discorda totalmente	24,10%
	Não discorda nem concorda	6,90%
5 - Com a inclusão dos indicadores ambientais e sociais, o VSM4S passa a ser uma ferramenta complexa, deixando de cumprir o seu principal propósito que é enxergar as perdas e desperdícios na manufatura e combatê-los.	Discorda	48,30%
	Discorda totalmente	24,10%
	Concorda	13,80%
	Não discorda nem concorda	13,80%
6 - Devido às atuais demandas por sistemas de produção mais sustentáveis, o VSM4S deve substituir o VSM tradicional em todo e qualquer segmento de manufatura existente.	Discorda	37,90%
	Concorda	27,60%
	Não discorda nem concorda	20,70%
	Concorda totalmente	10,30%
	Discorda totalmente	3,40%
7 - O VSM4S proposto nesse estudo é uma ferramenta que pode conflitar com os princípios adotados no VSM tradicional	Discorda	55,20%
	Discorda totalmente	24,10%
	Concorda	13,80%
	Não discorda nem concorda	6,90%
8 - As áreas que gerenciam os aspectos ambientais e sociais nas empresas seriam muito bem-vindas para se juntarem ao time de manufatura que tradicionalmente conduzem os workshops de mapeamento na empresa.	Concorda totalmente	58,60%
	Concorda	27,60%
	Discorda	6,90%
	Discorda totalmente	3,40%
	Não discorda nem concorda	3,40%
9 - A aplicação do mapeamento deve ser uma prática exclusivamente operacional sem o envolvimento da alta gestão, mesmo considerando que tal prática melhore os indicadores operacionais, pode não impactar nos indicadores estratégicos.	Discorda totalmente	48,30%
	Discorda	34,50%
	Concorda	13,80%
	Não discorda nem concorda	3,40%
10 - O VSM4S pode não ser interessante para as áreas de sustentabilidade e de gestão social nas empresas, pois seus indicadores não seriam impactados, e o VSM4S pode não contribuir com iniciativas nos aspectos ambientais e sociais	Discorda	41,40%
	Discorda totalmente	34,50%
	Concorda	17,20%
	Não discorda nem concorda	6,90%

Sobre a complexidade do VSM4S, a Questão 5 indicou que 48,3% dos especialistas entendem o modelo como de baixa complexidade, e não perderia sua função principal de enxergar as perdas e desperdícios das empresas para combatê-los. Porém, mesmo que representando uma parcela consideravelmente pequena de 13,8%, alguns especialistas entendem o modelo VSM4S como complexo e quando aplicado, perder-se-iam as funções principais do VSM tradicional.

Na Questão 6, tratando sobre a possibilidade de substituir o VSM tradicional pelo VSM4S, em todos os seguimentos industriais, mesmo justificando que essa proposta contribua para sistemas de produção mais sustentáveis, as opiniões ficaram de certa forma divididas, pois os especialistas que concordam pela substituição totalizam 37,9%, enquanto os contrários somam um percentual de 41,3%. Aqui há um aspecto que merece certa atenção, pois a plena substituição do VSM tradicional pelo VSM4S está sendo vista com certa precaução. Por outro lado, sobre a Questão 7, considerando a possibilidade do VSM4S conflitar com os princípios adotados no VSM tradicional, grande parcela dos respondentes discorda dessa possibilidade (79,3%), enquanto apenas 13,8% enxergam esse conflito. Entendendo que as Questões 6 e 7 são de certa forma complementares, há um conflito nas respostas e mais informações detalhadas sobre o VSM4S devem ser fornecidas aos especialistas antes de aplicar novamente essas Questões e tirar conclusões.

A Questão 8, cuja iniciativa é a integração das equipes de trabalho da manufatura, teve um apoio expressivo dos respondentes (86,2%), contra 10,3% que discordam. Usualmente, as áreas da gestão de manufatura que conduzem os eventos de mapeamento, trabalham de forma separada ou com baixa sinergia com as demais áreas, que gerenciam os aspectos ambientais e sociais na empresa, e isso pode ser visto como uma barreira para uma eficaz aplicação do VSM4S. Como observado, a maioria dos especialistas veem a maior sinergia dos grupos de trabalho como um aspecto positivo, corroborado pela Questão 10 em que 75,9% dos especialistas concordam que as diferentes áreas da manufatura, atuando em conjunto através do VSM4S, poderiam melhorar seus indicadores de resultados gerais, contra uma parcela de 17,2% que tem opinião contrária.

Em relação sobre se o VSM deveria ser prática exclusivamente realizada no nível operacional, sem a participação da alta gestão, a Questão 9 indica que a grande maioria dos especialistas (82,8%) entendem que a alta gestão teria de participar de forma ativa nos eventos de mapeamento. Esse aspecto torna-se ainda mais importante uma vez que, conforme abordado também pela Questão 10, a eficaz aplicação do VSM4S de forma colaborativa entre times de trabalho pode impactar de forma positiva nos indicadores estratégicos da empresa. A participação sinérgica entre as áreas estratégicas e de operação na empresa na aplicação do VSM4S é fator fundamental para sua efetividade, conforme identificado por Mahmood et al. (2019),

Gaikwad et al. (2020) e Ali et al. (2020) em seus estudos sobre VSM, orientados para a sustentabilidade.

Devido ao grau maior ou menor de subjetividade inerente quando se aplicam *surveys* para obtenção de dados sobre aspectos com características qualitativas, os resultados da Tabela 17 podem ser agrupados e apresentados de forma agregada, conforme Figura 20, para avaliação sob uma perspectiva diferente. As respostas 'concordo' e 'concordo totalmente' foram agregadas, e o mesmo procedimento se fez para 'discordo' e 'discordo totalmente', resultando em um cenário com três alternativas, ao invés das cinco possibilidades anteriores. A Figura 20 mostra que dentre os pontos positivos, destaca-se o potencial do VSM4S em possibilitar melhor conexão e maior sinergia entre os processos, conforme apresentado pelos 86,3% alcançados na Questão 8. Isso posto, podem-se buscar soluções alternativas para as empresas que queiram identificar a causa raiz dos problemas nos aspectos ambiental e social, além dos econômicos já comumente considerados.

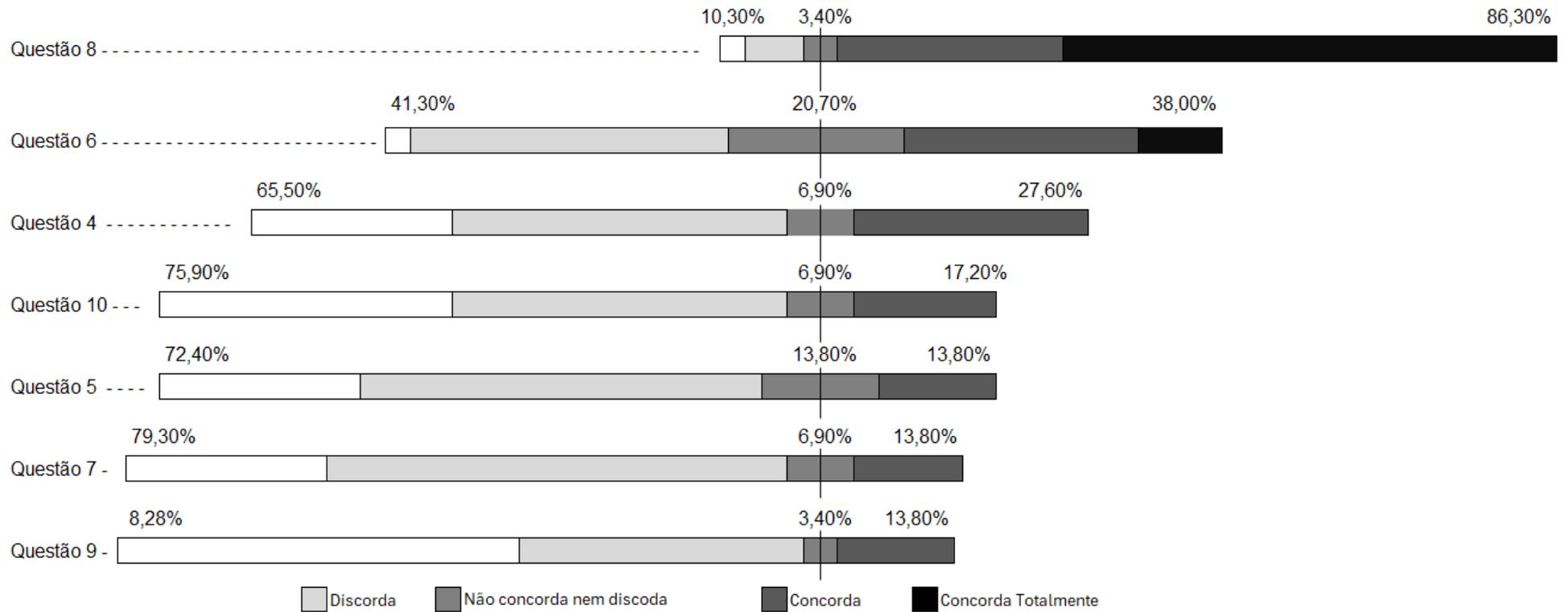


Figura 20. Gráfico com as respostas referentes a questões sobre aplicabilidade do modelo VSM4S proposto. Os valores percentuais representam:  $\Sigma$  Discorda totalmente + Discorda; Não discorda nem concorda;  $\Sigma$  Concorda + Concorda totalmente. Elaborado pelo Autor.

Ao adotarem-se abordagens mais detalhadas e sistêmicas, podem-se enfrentar os desafios encontrados com resultados mais eficazes e duradouros. O modelo VSM4S proposto, se devidamente aplicado como elemento de gestão, pode melhorar a eficiência e a reputação da empresa sob o ponto de vista de governança conforme evidenciado nos resultados da Questão 9 da Figura 20, alcançando 82,8% de aprovação pelos especialistas. O VSM4S poderia ser relevante para introduzir a sustentabilidade com maior profundidade na dinâmica das empresas, uma vez que o ponto de partida para sua aplicação está ancorado em uma ferramenta já conhecida e largamente utilizada como o VSM tradicional.

Ainda sobre a Questão 9, mesmo considerando o crescente foco em aspectos da sustentabilidade pelas empresas, o VSM4S pode ser uma ferramenta importante para alcançar esse objetivo. Por outro lado, é necessário que haja engajamento da alta gestão e conhecimento sobre como aplicar o VSM4S, antes da ferramenta ser utilizada no nível operacional, evitando as barreiras para sua aplicação como identificadas em estudos similares realizados por Gohoungodji et al. (2020). De acordo com Antomarioni et al. (2020), quanto maior é a posição gerencial, menor é o envolvimento direto em projetos de melhorias, bem como na percepção direta em relação ao sucesso ou fracasso do projeto de melhoria implementado. Dessa forma, estudos futuros deveriam investigar as causas da falta de comprometimento da alta gestão com aspectos de sustentabilidade em escalas operacionais. O VSM4S proposto nesta tese poderia superar muitas dessas barreiras, seja pelos conceitos, métodos e ferramentas utilizadas, que já são bem conhecidas e aplicadas pelas empresas, mas é fundamental que a prática do mapeamento dos fluxos de produção se torne prática comum e reconhecidamente importante pela alta gestão das empresas. As metas estabelecidas no VSM4S precisam estar alinhadas com os indicadores estratégicos, com participação ativa de pessoal experiente e das mais diferentes áreas e hierarquias da empresa.

Os projetos *Kaizen* devem ser discutidos para estabelecer cenários plausíveis, onde o cenário escolhido deve ser implementado com o devido rigor quanto aos prazos definidos e com foco nos objetivos preestabelecidos para o VSM4S do estado futuro.

Na abordagem VSM4S, devem ser considerados quais são os principais impactos e compromissos da empresa sobre o buscado *Environment, Social &*

*Governance (ESG)*, estabelecendo indicadores que possam justificar o VSM4S como uma ferramenta que traga contribuição de forma consistente. Nesse aspecto, recomenda-se considerar não apenas o processo de manufatura da empresa, mas também toda a cadeia de suprimento. Segundo os especialistas que responderam ao *survey*, o VSM4S como conceito é bom (Questão 10), porém as lacunas devem ser identificadas e superadas; esse aspecto também foi observado por Mahmood et al. (2019) e Gaikwad et al. (2020), para evitar falhas na aplicação de modelos alternativos de gestão orientados à sustentabilidade.

Em resposta a questão 7, os especialistas destacaram como desvantagem, mesmo sendo uma ferramenta cujo objetivo é de mapear oportunidades não só no âmbito econômico mas também no ambiental e social, o VSM4S possa vir a ser um empecilho para a manufatura devido à sua complexidade, pois os resultados, ao contrário do que ocorre no VSM tradicional, possam ocorrer em prazos mais longos uma vez que, segundo Sonobe (2018) e Sugimoto (2018), mapeamento por meio do uso do VSM são eventos, cujo principal objetivo consiste em ações simples, fáceis e rápidas.

Para complementar os resultados obtidos com o Questionário aplicado aos especialistas, o Coeficiente de Concordância 'Kappa de Fleiss' é calculado para representar o nível de concordância entre os respondentes, considerando as 5 possibilidades de respostas: Discorda totalmente; Discorda; Não discorda nem concorda; Concorda; Concorda totalmente. A Tabela 18 mostra que o Kappa de Fleiss de 0,073 obtido para as respostas dos 29 especialistas para as Questões de 4 a 10 indica uma concordância 'muito fraca' entre eles. O p-value obtido de 8,56E-13 mostra que esse resultado para o Kappa de Fleiss possui significância estatística (ou seja, rejeita-se a hipótese H0 de que não existe concordância entre as respostas), logo pode-se concluir sobre a concordância 'muito fraca' entre as respostas dos especialistas. Devido a esse baixo valor de concordância obtido, sugere-se repetir a aplicação desse questionário para maior amostra de respondentes/especialistas, além de convidá-los a participar de reuniões com o objetivo de explicar detalhadamente o modelo VSM4S para a obtenção de melhor índice de concordância.

Tabela 18. Estatística do coeficiente de concordância Kappa de Fleiss aplicado às respostas dos especialistas para as Questões da Tabela 17 considerando as cinco opções de respostas.

Questões	Concorda	Concorda totalmente	Discorda	Discorda totalmente	Não discorda nem concorda	Total geral
Questão 10	5		12	10	2	29
Questão 4	7		14	6	2	29
Questão 5	5	1	14	6	3	29
Questão 6	8	3	11	1	6	29
Questão 7	4	1	15	7	2	29
Questão 8	8	16	2	2	1	29
Questão 9	4		11	13	1	29
Total Geral	41	21	79	45	17	203
Alpha	0,05	Nível de significância de 95%				
Tails	2					
	Concorda	Concorda totalmente	Discorda	Discorda totalmente	Não discorda nem concorda	Total geral
<b>Kappa</b>	0,015130	0,351255	0,049714	0,072081	0,00490	<b>0,073922</b>
s.e.	0,018758	0,018758	0,018758	0,018758	0,01875	0,010336
Z-stat	0,806639	18,72559	2,650282	3,842698	0,26132	7,151370
<b>P-value</b>	0,419874	0	0,008042	0,000121	0,79384	<b>8,59E-13</b>
Lower	-0,05189	0,314490	0,012949	0,03531	-0,0318	0,053662
Upper	0,021634	0,388021	0,086479	0,108846	0,04166	0,094182

Nota: de acordo com Altman (1991), a seguinte classificação para o Kappa de Fleiss é proposta: 0,0 a 0,20, concordância muito fraca; 0,21 a 0,40, concordância fraca; 0,41 a 0,60, concordância moderada; 0,61 a 0,80, concordância boa; 0,81 a 1,00, concordância muito boa.

Devido ao grau maior ou menor de subjetividade, quando se aplicam pesquisas para obtenção de dados qualitativos, conforme já mencionado, uma alternativa interessante para auxiliar nas discussões é a redução na quantidade de possibilidades de resposta. Assim, considerou-se para esse exercício apenas 3 ao invés de 5 possibilidades por meio do agrupamento das opções de respostas 'concordo' + 'concordo totalmente', e o mesmo procedimento para 'discordo' + 'discordo totalmente', configuração apresentada no gráfico da Figura 17. Sendo assim, a Tabela 19 apresenta os resultados referentes ao nível de concordância dos respondentes com apenas 3 alternativas de resposta: Discorda; Não discorda nem concorda; Concorda.

Tabela 19. Estatística do coeficiente de concordância Kappa de Fleiss aplicado às respostas dos especialistas para as Questões da Tabela 17 considerando apenas três opções de resposta.

Questões	Concorda	Discorda	Não discorda nem concorda	Total geral
Questão 10	5	22	2	29
Questão 4	8	19	2	29
Questão 5	4	21	4	29
Questão 6	11	12	6	29
Questão 7	4	23	2	29
Questão 8	25	3	1	29
Questão 9	4	24	1	29
Total Geral	61	124	18	203
Alpha	0,05	Nível de significância de 95%		
Tails	2			
	Concorda	Discorda	Não discorda nem concorda	Total geral
<b>Kappa</b>	0,258428	0,221416	0,00720	<b>0,203391</b>
s.e.	0,018758	0,018758	0,01875	0,015131
Z-stat	13,77688	11,80382	0,38421	13,4420
<b>P-value</b>	0	0	0,70081	<b>0</b>
Lower	0,221662	0,184651	-0,02955	0,173735
Upper	0,295193	0,25818	0,04397	0,233048

Nota: de acordo com Altman (1991), a seguinte classificação para o Kappa de Fleiss é proposta: 0,0 a 0,20, concordância muito fraca; 0,21 a 0,40, concordância fraca; 0,41 a 0,60, concordância moderada; 0,61 a 0,80, concordância boa; 0,81 a 1,00, concordância muito boa.

Os dados da Tabela 19 mostram que o índice de concordância Kappa de Fleiss aumenta de 0,07 (Tabela 18) para 0,20, indicando que a concordância entre os especialistas continua a ser 'muito fraca', mas no limiar para a classificação 'fraca'. Devido ao aumento nos resultados ser pouco expressivo, a sugestão continua sendo a de repetir a aplicação desse questionário para maior amostra de experts, além de convidá-los a participar em reuniões para explicar o modelo VSM4S de forma mais detalhada. Talvez isso resultaria em melhores índices de concordância do que os obtidos nesta tese.

Além das Questões de alternativas existentes no questionário aplicado aos especialistas, decidiu-se por aplicar uma Questão aberta (Questão 11) e não obrigatória, cuja finalidade foi de coletar opiniões gerais sobre todos os pontos levantados nas questões anteriores ou até mesmo outras colocações a respeito do assunto VSM orientado para a sustentabilidade. Dos 29 especialistas que participaram da pesquisa, 16 contribuíram com diferentes comentários adicionais sobre aspectos positivos e aqueles que merecem atenção sobre o tema tratado. Todas as respostas, de forma anônima, estão disponibilizadas *ipsis literis* no Apêndice Q, mas aqui apresenta-se uma interpretação dessas respostas de forma agregada:

(a) Vantagens da Integração de aspectos de sustentabilidade com ferramentas já existentes e utilizadas na gestão de empresas.

A integração entre as áreas de manufatura e as áreas que gerenciam assuntos ambientais e sociais é um fator positivo, pois tem-se a oportunidade de incluir ações relativas aos três aspectos (ambiental, econômico e social) no plano oficial de projetos de melhorias na empresa. Mesmo considerando que essas áreas já disponham de métodos e ferramentas específicas em suas atividades de melhorias e atividades de rotinas, o fato de utilizar essas ferramentas em conjunto com a manufatura, durante o mapeamento, possibilita uma maior interdependência de maneira integrada entre as áreas, e isso faz com que todos caminhem para um mesmo ponto, com os objetivos bem alinhados.

(b) Importância da sinergia entre o setor 'estratégico' com o 'operacional' para uma eficaz aplicação de ferramentas orientadas à sustentabilidade

Essa questão recebeu total apoio dos respondentes no que se refere à participação e ao envolvimento do nível estratégico como definição das metas, apoio na realização do mapeamento pelo nível operacional e acompanhamento do avanço nas ações para se atingir os resultados esperados. Pelos comentários dos especialistas, a proposta do VSM4S foi de certa forma bem aceita. As vantagens da ferramenta foram discutidas, assim como pontos que merecem atenção em futuros trabalhos para tornar o VSM4S de fato uma ferramenta aplicável.

## 9. CONCLUSÕES

O uso do VSM4S mostra-se como ferramenta importante para auxiliar os decisores na escolha e implementação de projetos de melhoria, em busca de maior sustentabilidade para as empresas. Embora sua aplicabilidade ainda precise ser melhor investigada, o VSM4S possui a vantagem de incorporar aspectos de sustentabilidade nas decisões que, até o momento, são exclusivamente baseadas em aspectos econômicos pelo VSM tradicional. Outras vantagens do VSM4S identificadas nesta tese são: (i) o modelo pode se conectar com os direcionamentos de *Environment, Social and Governance* (ESG) das empresas; (ii) é uma ferramenta que conecta as áreas de *Environment, Health and Safety* (EHS) com outras áreas da manufatura; (iii) por ter uma característica dinâmica, o VSM4S possibilita a escolha de diferentes indicadores e metas, além de poder ser aplicado em qualquer segmento de manufatura (metal mecânico, alimentos, químicos, têxtil, plástico, entre outros).

O sucesso da aplicação do VSM4S requer uma perspectiva sistêmica, em que diferentes especialistas da empresa (segurança no local de trabalho, meio ambiente, energia e gestões sociais) atuem de forma conjunta e integrada. Ao contrário do VSM tradicional, cujo enfoque principal é alavancar apenas resultados no âmbito econômico, o VSM4S exige uma abordagem sistêmica para propor soluções conjuntas, com os diferentes especialistas sentindo-se parte integrante do sistema de manufatura da empresa. Um ponto que merece destaque é com relação ao posicionamento dos especialistas que, em sua maioria, concordam que o mapeamento na manufatura deve ser uma prática do setor operacional, porém com a participação ativa da alta gestão. Os indicadores representados na ferramenta devem estar totalmente alinhados com os indicadores estratégicos da empresa.

Recomenda-se que os todos os *stakeholders* (fornecedores, clientes e a sociedade civil) participem no mapeamento e avaliação dos processos, ainda que de forma indireta respondendo algumas questões, uma vez que esse público pode colaborar com informações e sugestões importantes a serem consideradas nos projetos de melhoria. Embora possam surgir dificuldades na implementação do VSM4S em suas primeiras aplicações, também nos anos seguintes, essa barreira operacional será superada, e as vantagens do VSM4S poderão ser compensatórias.

Em relação ao estudo de caso real, o Cenário 2, que foi elaborado com foco econômico, apresentou melhor desempenho comparativo geral após aplicação do cubo, sendo classificado como 'totalmente viável'. Para o Cenário 4, elaborado considerando melhorias econômicas, sociais e ambientais, seus três indicadores de performance (SSIS, B/C e 1/FTE) mostraram que é 'apenas sustentável', já que obteve um desempenho comparativamente melhor apenas para o SSIS. Os Cenários 1 e 3 (elaborados com foco exclusivamente ambiental e social, respectivamente) resultaram ser 'executável no prazo', ou seja, possuem desempenho positivo para o FTE, mas não para o SSIS e B/C. Para este estudo de caso, sugere-se que o Cenário 2 seja o escolhido para ser executado na empresa.

Para utilizar-se o Cubo como ferramenta proposta neste estudo é necessário que se tenha pelo menos 2 cenários (projetos) para o estado futuro, caso contrário não vai existir vários SSIS e, como consequência, não haveria a necessidade do Cubo, ou seja, se for definido apenas um projeto, ele será implementado sem a necessidade de avaliação.

Outra limitação está relacionada à impossibilidade de se comparar empresas, a menos que os mesmos indicadores, critérios e procedimentos utilizados no VSM4S aplicado entre as empresas sejam exatamente iguais.

## 10. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTURO

Durante o desenvolvimento desta tese, algumas ideias complementares foram surgindo, assim como algumas limitações foram encontradas. Por não pertencerem aos objetivos desta tese, e para cumprir com o cronograma estabelecido, elas não foram aqui desenvolvidas, mas sugerem-se futuros esforços sobre eles, incluindo:

- 1) Manter todos os princípios do VSM tradicional para continuar enxergando oportunidades na manufatura, porém motivar cada vez mais a expansão do perímetro de inclusão na prática de mapeamento, por meio da integração das áreas, que fazem a gestão das atividades relacionadas aos aspectos ambientais e sociais da empresa como participantes ativos. Essas iniciativas irão possibilitar medir o potencial desempenho do VSM4S como uma nova ferramenta proposta, indo além dos interesses econômicos.
- 2) Aplicar a ferramenta proposta em diferentes estudos de caso, tentando incluir maior número possível de setores de produção, possibilitando melhor discutir sobre sua aplicabilidade comparativamente ao VSM tradicional na busca de resultados de forma simples e rápida.
- 3) Aprofundar a discussão sobre a percepção dos especialistas em relação à aplicabilidade do VSM4S, considerando abordagens participativas (presenciais quando necessário), conforme métodos existentes como o Delphi.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, Feni et al. Sustainability assessment procedure for operations and production processes (SUAPRO). **Science of the total environment**, v. 685, p. 1006-1018, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.261>
- AGOSTINHO, Feni et al. Sustainability dynamics of the Brazilian MATOPIBA region between 1990-2018: Impacts of agribusiness expansion. **Applied Geography**, v. 159, p. 103080, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103080>
- AHMAD, Shamraiz; WONG, Kuan Yew; RAJOO, Srithar. Sustainability indicators for manufacturing sectors: A literature survey and maturity analysis from the triple-bottom line perspective. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 30, n. 2, p. 312-334, 2018. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0091>
- ALI, Syed Mithun et al. Barriers to lean six sigma implementation in the supply chain: An ISM model. **Computers & Industrial Engineering**, v. 149, p. 106843, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106843>
- ALTMAN, D.G. (1991). Practical statistics for medical research. New York: Chapman and Hall.
- ALVANDI, S. et al. Economic and environmental value stream map (E2VSM) simulation for multi-product manufacturing systems. **International journal of sustainable engineering**, v. 9, n. 6, p. 354-362, 2016. <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1161095>
- ANTOMARIONI, Sara et al. Lean projects' evaluation: the perceived level of success and barriers. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 32, n. 13-14, p. 1441-1465, 2020. <https://doi.org/10.1080/14783363.2020.1731301>
- BATWARA, Amber et al. Towards smart sustainable development through value stream mapping—a systematic literature review. **Heliyon**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15852>
- BROWN, Adam; AMUNDSON, Joseph; BADURDEEN, Fazleena. Sustainable value stream mapping (Sus-VSM) in different manufacturing system configurations: application case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 164-179, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.101>
- CHEN, Joseph C.; LI, Ye; SHADY, Brett D. From value stream mapping toward a lean/sigma continuous improvement process: an industrial case study. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 4, p. 1069-1086, 2010. <https://doi.org/10.1080/00207540802484911>
- CHEUNG, Wai M.; LEONG, Jun T.; VICHARE, Parag. Incorporating lean thinking and life cycle assessment to reduce environmental impacts of plastic injection moulded products. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 759-775, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.208>
- CHIARINI, Andrea. Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: an empirical observation from European motorcycle component manufacturers. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 226-233, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.080>

CLASEN, Arno P. et al. Shaping cities: A proposal for an integrative FEW nexus model. **Environmental Science & Policy**, v. 136, p. 326-336, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.06.013>

COSCIEME, Luca et al. Thermodynamics-based categorization of ecosystems in a socio-ecological context. **Ecological modelling**, v. 258, p. 1-8, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.02.031>

DINESH, S. N. et al. Improving the productivity in carton manufacturing industry using value stream mapping (VSM). **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 1221-1227, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.015>

DOS SANTOS, Luiz C. T. et al. Integrating environmental, social, and economic dimensions to monitor sustainability in the G20 countries. **Sustainability**, v. 15, n. 8, p. 6502, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15086502>

DOS SANTOS, Luiz C. Terra et al. Using the five sectors sustainability model to verify the relationship between circularity and sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132890, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132890>

FAULKNER, William; BADURDEEN, Fazleena. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 8-18, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042>

GAIKWAD, Sandesh Kanhu et al. Analyzing barriers and strategies for implementing Lean Six Sigma in the context of Indian SMEs. **Benchmarking: An International Journal**, v. 27, n. 8, p. 2365-2399, 2020. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2019-0484>

GARCÍA, Roberto R. Moreno et al. Assessing the sustainability of rice production in Brazil and Cuba. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 4, p. 100152, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100152>

GARZA-REYES, Jose Arturo et al. A PDCA-based approach to environmental value stream mapping (E-VSM). **Journal of cleaner production**, v. 180, p. 335-348, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.121>

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **The entropy law and the economic process**. Harvard university press, 1971. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674281653>

GHOLAMI, Hamed et al. Social value stream mapping (Socio-VSM): Methodology to societal sustainability visualization and assessment in the manufacturing system. **IEEE Access**, v. 7, p. 131638-131648, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940957>

GIANNETTI, Biagio F. et al. Five sector sustainability model: A proposal for assessing sustainability of production systems. **Ecological Modelling**, v. 406, p. 98-108, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.06.004>

GIANNETTI, Biagio F. et al. Overcoming poverty traps in Mozambique: Quantifying inequalities among economic, social and environmental capitals. **Journal of Cleaner Production**, v. 383, p. 135266, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135266>

GIANNETTI, Biagio Fernando et al. Enhancing the assessment of cleaner production practices for sustainable development: The five-sector sustainability model applied to water and wastewater treatment companies. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 4126, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14074126>

GIANNETTI, Biagio Fernando et al. Enhancing the assessment of cleaner production practices for sustainable development: The five-sector sustainability model applied to

water and wastewater treatment companies. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 4126, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14074126> GILBERT, A. J.; KUIK, O. J. Indicators of sustainable development. **Chapters**. In: Handbook of Environmental and Resource Economics, 1999.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R., 2001. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology report. **Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer**, (1999/36A).

GOHOUNGODJI, Paulin et al. What is stopping the automotive industry from going green? A systematic review of barriers to green innovation in the automotive industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123524, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123524>

GOODLAND, Robert. The concept of environmental sustainability. **Annual review of ecology and systematics**, v. 26, n. 1, p. 1-24, 1995. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000245>

GOODLAND, Robert; DALY, Herman. Environmental sustainability: universal and non-negotiable. **Ecological applications**, v. 6, n. 4, p. 1002-1017, 1996. <https://doi.org/10.2307/2269583>

HARIYANI, Dharmendra; MISHRA, Sanjeev. Barriers to the adoption of integrated sustainable-green-lean-six sigma-agile manufacturing system (ISGLSAMS): a literature review. **Benchmarking: An International Journal**, v. 30, n. 9, p. 3590-3636, 2022. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2021-0585>

HELLENO, André Luís; DE MORAES, Aroldo José Isaias; SIMON, Alexandre Tadeu. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. **Journal of cleaner production**, v. 153, p. 405-416, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.072>

HRISTOV, Ivo; CHIRICO, Antonio. The role of sustainability key performance indicators (KPIs) in implementing sustainable strategies. **Sustainability**, v. 11, n. 20, p. 5742, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11205742>

IMAI, M., 1986. Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. McGraw Hill, New York, USA.

ISE, 2023. Corporate Sustainability Index (Índice de Sustentabilidade Empresarial). Brazilian stock exchange 'B3'. Disponível em: <https://iseb3.com.br/>. Acesso em: 13 set. 2023.

JAMIL, Norhazrina et al. DMAIC-based approach to sustainable value stream mapping: towards a sustainable manufacturing system. **Economic research-Ekonomska istraživanja**, v. 33, n. 1, p. 331-360, 2020. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2020.1715236>

JUNIOR, Alaercio Nicoletti; DE OLIVEIRA, Maria Célia; HELLENO, André Luís. Sustainability evaluation model for manufacturing systems based on the correlation between triple bottom line dimensions and balanced scorecard perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 190, p. 84-93, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.136>

KUNDGOL, Suman; PETKAR, Praveenkumar; GAITONDE, V. N. Implementation of value stream mapping (VSM) upgrading process and productivity in aerospace manufacturing industry. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 4640-4646, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.282>

- LASA, Ibon Serrano; CASTRO, Rodolfo de; LABURU, Carlos Ochoa. Extent of the use of Lean concepts proposed for a value stream mapping application. **Production Planning & Control**, v. 20, n. 1, p. 82-98, 2009. <https://doi.org/10.1080/09537280802685322>
- LEE, Jocelyn Ke Yin et al. Sustainability-oriented application of value stream mapping: a review and classification. **IEEE Access**, v. 9, p. 68414-68434, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077570>
- LITOS, Lampros et al. Management tool design for eco-efficiency improvements in manufacturing—a case study. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 500-505, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.001>
- LU, T. et al. A framework of product and process metrics for sustainable manufacturing. In: **Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing**. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 333-338. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7_48)
- MAHMOOD, Zeeshan et al. Drivers and barriers of sustainability practices in emerging and developing economies. **Journal of Business and Social Review in Emerging Economies**, v. 5, n. 1, p. 213-222, 2019. <https://doi.org/10.26710/jbsee.v5i1.683>
- MALIK, Shahab Alam; YEZHUANG, Tian. Execution of continuous improvement practices in Spanish and Pakistani industry: a comparative analysis. In: **2006 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology**. IEEE, 2006. p. 761-765. <https://doi.org/10.1109/ICMIT.2006.262323>
- MISHRA, Aatish Kumar et al. Development of sustainable value stream mapping (SVSM) for unit part manufacturing: A simulation approach. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 11, n. 3, p. 493-514, 2019. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-04-2018-0036>
- MOHAMAD, Effendi et al. Cleaner production value stream mapping at a chromium plating plant: a case study. **International Journal of Agile Systems and Management**, v. 12, n. 3, p. 245-260, 2019. <https://doi.org/10.1504/IJASM.2019.101367>
- MUONEKE, Obumneke Bob; OKERE, Kingsley Ikechukwu; ALEMAYEHU, Fikru K. Interplay between socio-economic challenges, environmental sustainability and the moderating role of government effectiveness in the Med-9 countries. **Resources Policy**, v. 85, p. 104017, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104017>
- NACIMENTO, Rafael Araújo et al. Sustainability comparison of commercial Brazilian organic and conventional broiler production systems under a 5SENSU model perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, p. 134297, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134297>
- NORTON, Ann; FEARNE, Andrew. Sustainable value stream mapping in the food industry. In: **Handbook of waste management and co-product recovery in food processing**. Woodhead Publishing, 2009. p. 3-22. <https://doi.org/10.1533/9781845697051.1.3>
- ODUM, H.T., 1996. Environmental accounting – Emergy and environmental decision making, John Wiley & Sons Ltd, New York.
- OLIVEIRA, M. W. et al. Sustainable milk production: Application of the hierarchical analytical process towards a regional strategic planning. **J. Environ. Account. Manag**, v. 4, p. 385-398, 2016. <https://doi.org/10.5890/JEAM.2016.12.003>

ONU, 2023. The 17 Goals. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 24 set. 2023.

PALMER, Vincent S. Inventory management KAIZEN. In: **Proceedings 2nd International Workshop on Engineering Management for Applied Technology. EMAT 2001**. IEEE, 2001. p. 55-56. <https://doi.org/10.1109/EMAT.2001.991311>

PIERUCCI, Pedro Luiz et al. Innovative measure of urban sustainability: potentialities and weaknesses of the 'Mandala SDG'. In: **Handbook on Innovation, Society and the Environment**. Edward Elgar Publishing, 2023. p. 358-371. <https://doi.org/10.4337/9781802200065.00031>

PULSELLI, Federico M. et al. The world economy in a cube: A more rational structural representation of sustainability. **Global Environmental Change**, v. 35, p. 41-51, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.002>

RAJESH MENON, B. et al. Cost value-stream mapping as a lean assessment tool in a surgical glove manufacturing company. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 32, n. 1, p. 157-170, 2021. <http://dx.doi.org/10.7166/32-1-2368>

RASI, R. Z. R. et al. Value stream mapping using simulation at metal manufacturing industry. In: International conference on industrial engineering and operations management. **Bali: SCF Academy**, 2014. p. 2455-2464. Disponível em: <https://ieomsociety.org/ieom2014/pdfs/521.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2024.

ROCKSTRÖM, Johan et al. A safe operating space for humanity. **nature**, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009. <https://doi.org/10.1038/461472a>

ROCKSTRÖM, Johan et al. Safe and just Earth system boundaries. **Nature**, v. 619, n. 7968, p. 102-111, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>

ROTHER, Mike; SHOOK, John. **Aprender a ver: mapeamento do fluxo de valor para agregar valor e eliminar mudanças**. Lean Enterprise Institute, 2003.

ROTHER, Mike; SHOOK, John. Learning to See: Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda. Lean Enterprise Institute, 1999.

ROTHER, Mike; SHOOK, John. **Aprendendo a enxergar: mapeamento do fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. Tradução de José Roberto Ferro e Telma Rodriguez. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1996.

SALVADOR, Rodrigo et al. Towards a green and fast production system: Integrating life cycle assessment and value stream mapping for decision making. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, p. 106519, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106519>

SATYRO, Walter Cardoso et al. Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, p. 130456, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130456>

SATYRO, Walter Cardoso et al. Sustainable industries: Production planning and control as an ally to implement strategy. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 124781, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124781>

SEARCY, Cory; ELKHAWAS, Doaa. Corporate sustainability ratings: an investigation into how corporations use the Dow Jones Sustainability Index. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 79-92, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.022>

- SIMONS, David Wyn; MASON, Robert John. Environmental and transport supply chain evaluation with sustainable value stream mapping. 2002. Disponível em: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/49031>. Acesso em: 24 set. 2023.
- SONOBE, Tetsushi. How Kaizen brightens Africa's future. **Applying the Kaizen in Africa: A new avenue for industrial development**, p. 1-30, 2018. Disponível em: <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/22933/1/1007228.pdf#page=19>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- SPORCHIA, Fabio et al. Investigating environment-society-economy relations in time series in Europe using a synthetic input-state-output framework. **Environmental Science & Policy**, v. 125, p. 54-65, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.08.018>
- STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE, 2023. The SDGs wedding cake: A new way of viewing the Sustainable Development Goals and how they are all linked to food. Available in <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html>, accessed on 24th September 2023.
- SUGIMOTO, Seiji. Kaizen in practice. **Applying the Kaizen in Africa: A new avenue for industrial development**, p. 69-110, 2018. Disponível em: <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/22933/1/1007228.pdf#page=87>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- SULTAN, Farook Abdullah; ROUTROY, Srikanta; THAKUR, Maitri. A simulation-based performance investigation of downstream operations in the Indian Surimi Supply Chain using environmental value stream mapping. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125389, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125389>
- TENIWUT, Wellem Anselmus; HASYIM, Cawalinya Livsanthi; PENTURY, Frischilla. Towards smart government for sustainable fisheries and marine development: An intelligent web-based support system approach in small islands. *Marine Policy*, v. 143, p. 105158, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105158>
- TERRA DOS SANTOS, Luiz C. et al. Integrating environmental, social, and economic dimensions to monitor sustainability in the G20 countries. **Sustainability**, v. 15, n. 8, p. 6502, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15086502>
- TYAGI, Satish et al. Value stream mapping to reduce the lead-time of a product development process. **International journal of production economics**, v. 160, p. 202-212, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.002>
- USEPA, 2007. United States Environmental Protection Agency. The Lean & Environment Toolkit. Disponível em: <https://www.epa.gov/sustainability/lean-environment-toolkit>. Acesso em: 26 fev. 2023.
- VENUGOPAL, Vinay; SALEESHYA, P. G. Productivity improvement through the development of sustainability metrics in wire manufacturing industry. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 39, n. 1, p. 1-19, 2023. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2023.130891>
- VERMA, Neha; SHARMA, Vinay; BADAR, M. Affan. Entropy-based lean, energy and six sigma approach to achieve sustainability in manufacturing system. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 46, n. 8, p. 8105-8117, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05826-x>
- VINODH, S.; BEN RUBEN, R.; ASOKAN, P. Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: a case study. **Clean**

- Technologies and Environmental Policy**, v. 18, p. 279-295, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1016-8>
- WACKERNAGEL, M., REES, W.E., 1996. Our Ecological Footprint – Reducing Human Impact on the Earth. New Solutions Publishers, USA.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. From lean production to lean enterprise'Harvard Business Review March. 1994.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. Lean Thinking, Simon & Schuster. **New York, NY**, 1996.
- WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 11, p. 1148-1148, 1997. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600967>
- WU, Hui et al. Changes in habitat quality of nature reserves in depopulating areas due to anthropogenic pressure: Evidence from Northeast China, 2000–2018. *Ecological Indicators*, v. 138, p. 108844, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108844>
- YOSHIDA, Motonori. Chronological changes of government sectors' fiscal policies and fiscal sustainability in Japan. **Japan and the World Economy**, v. 66, p. 101178, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.japwor.2023.101178>
- YOUNG, Paul; BYRNE, G.; COTTERELL, Matthew. Manufacturing and the environment. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 13, p. 488-493, 1997. <https://doi.org/10.1007/BF01624609>
- ZANGHELINI, Guilherme Marcelo et al. Waste management Life Cycle Assessment: the case of a reciprocating air compressor in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 164-174, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.034>.

## APÊNDICES

### Apêndice A - Coeficientes do banco de dados do “Ecoivent”.

Tabela A1. Coeficientes “Ecoivent data base” Fatores de conversão das categorias de impactos: energia incorporada (em MJeq/kg), de aquecimento global (em kgCO<sub>2</sub>-eq./kg), potencial de acidificação (em kgSO<sub>2</sub>-eq./kg), utilizados para calcular os indicadores da Avaliação do Ciclo de Vida.

Item	Coeficiente de energia incorporada (MJ <sub>eq</sub> /kg) <sup>a</sup>	Potencial de aquecimento global (kgCO <sub>2</sub> -eq./kg) <sup>b</sup>	Potencial de acidificação (kgSO <sub>2</sub> -eq./kg) <sup>c</sup>	Especificação	Observação
Aço	158,94	17,365	0,057331	Casting, steel, lost-wax, CA-QC	Reference product: casting, steel, lost-wax [kg] (index 11)
Aço Fundido	17,189	2,1318	0,0068274	Cast iron production, RoW	Reference product: cast iron [kg] (index 14)
Alumínio	29,457	3,3078	0,023115	Aluminum alloy production, ALi, CA-QC	Reference product: aluminum alloy, ALi [kg] (index 3)
Cobre	88,197	7,8572	0,29514	Market for copper, GLO	Reference product: copper [kg] (index 57)
Energia Elétrica	0,050767	0,13297	2,4058E-05	Electricity production, hydro, reservoir, tropical region, BR-Southern grid	Reference product: electricity, high voltage [kWh] (index 310)

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Apêndice B - Memorial de cálculo da energia incorporada ( $k_{11}$ ) para o inventário da matéria prima utilizada nos processos mapeados do estudo de caso.**

Os cálculos para os cenários propostos se encontram nos apêndices de B a M e os dados foram baseados no cenário 1.

Vale reforçar que para todos os cenários propostos (1, 2, 3 e 4) o estator desse fluxo mapeado será fabricado com fio de alumínio em substituição ao fio de cobre.

Dados gerais:

Quant. de matéria prima para produção de 1 peça: (kg)

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça

Coeficiente de energia incorporada da matéria prima: (MJeq/kg)

Coeficiente de energia incorporada da energia elétrica (MJeq/kg)

Produção anual: (pç.)

Vida útil do produto: (anos)

-----

Processo 1 – Cobre para o processo do estator:

Quant. de cobre para produção de 1 peça: 0,70 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coeficiente de energia incorporada do cobre: 88,190 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 1 para o cobre:

$$\frac{(0,70 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 88,190 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 4,51E + 07 \text{ MJeq.}$$

Processo 1 – Aço para o processo do estator:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 1,00 kg

Produção anual: 7.305.480 pçs = 7,31E+06 pçs

Coeficiente de energia incorporada do aço: 158,94 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 1 para o aço:

$$\frac{(1,00 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 158,94 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 1,16E + 08 \text{ MJeq.}$$

Processo 1 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,017 kWh

Produção anual: 7.305.480 pçs = 7,31E+06 pçs

Coefficiente de energia incorporada para a energia elétrica: 0,050767 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 1 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,017 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,050767 \text{ Mjeq/kWh})}{10 \text{ anos}} = 6,30E + 02 \text{ MJeq.}$$

Processo 1 - Energia incorporada total (cobre, aço e energia elétrica):

$$(4,51E + 07\text{Mjeq.}) + 1,16E + 09\text{Mjeq.} + 63,0E + 02\text{Mjeq.}) = 1,61E + 08 \text{ MJeq.}$$

Processo 1 - Energia incorporada (Jeq/pç) =

$$\frac{1,61E+08 \text{ Mjeq}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 2,21E + 01 \frac{\text{MJeq}}{\text{pç}} \text{ ou } 22067,88 \frac{\text{kJeq}}{\text{pç}}$$

-----

Processo 2 – Alumínio para o processo do rotor:

Quant. de alumínio para produção de 1 peça: 0,17 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coefficiente de energia incorporada do alumínio: 29,457 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 2 para o alumínio:

$$\frac{(0,17 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 29,457 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 3,66E + 06 \text{ MJeq.}$$

Processo 2 – Aço para o processo do rotor:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 0,30 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coeficiente de energia incorporada do aço: 158,94 MJeq/kg  
 Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 2 para o aço:

$$\frac{(0,30 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 158,94 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 3,48E + 07 \text{ MJeq.}$$

Processo 2 – Energia elétrica para o processo do rotor:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,022 kWh  
 Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)  
 Coeficiente de energia incorporada para a energia elétrica: 0,050767 MJeq/kg  
 Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 2 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,022 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,050767 \text{ Mjeq/kWh})}{10 \text{ anos}} = 8,16E + 02 \text{ Jjeq.}$$

Processo 2 - Energia incorporada total (alumínio, aço e energia elétrica):

$$(3,66E + 06 \text{ Jjeq/kg} + 3,48E + 07 \text{ Jjeq/kg} + 8,16E + 02 \text{ Jjeq/kg}) = 3,85E + 07 \text{ MJeq}$$

Processo 2 - Energia incorporada (MJeq/pç) =

$$\frac{3,85E+07 \text{ MJeq}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 5,27E + 00 \frac{\text{MJeq}}{\text{pç}} \text{ ou } 5269,08 \frac{\text{kJeq}}{\text{pç}}$$

-----

Processo 3 – Aço fundido para o eixo:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 0,30 kg  
 Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)  
 Coeficiente de energia incorporada do aço fundido: 17,189 MJeq/kg  
 Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 3 para aço fundido:

$$\frac{(0,30 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 17,189 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 3,77E + 06 \text{ MJeq.}$$

Processo 3 – Energia elétrica para o processo do eixo:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,028 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coeficiente de energia incorporada para a energia elétrica: 0,0507679 MJeq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 3 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,028 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,0507679 \text{ Mjeq/kWh})}{10 \text{ anos}} = 1,04E + 03 \text{ Mjeq.}$$

Processo 3 - Energia incorporada total (aço fundido e energia elétrica):

$$(3,77E + 06 \text{ Mjeq.} + 1,04E + 03 \text{ Mjeq.}) = 3,85E + 07 \text{ Mjeq}$$

Processo 3 - Energia incorporada (Mjeq/pç) =

$$\frac{1,04E+03 \text{ Mjeq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 5,16E - 01 \frac{\text{Mjeq}}{\text{pç}} \text{ ou } 515,81 \frac{\text{kjeq}}{\text{pç}}$$

-----

Processo 4 – Energia elétrica para o processo de lavagem do rotor:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,011 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coeficiente de energia incorporada para a energia elétrica: 0,0507679 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 4 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,011 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,0507679 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 4,08E + 02 \text{ Mjeq}$$

Processo 4 - Energia incorporada total (energia elétrica) = 4,08E + 02 MJeq/kg

Processo 4 - Energia incorporada (Mjeq/pç) =

$$\frac{4,08E+02 \text{ Mjeq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 5,58E - 05 \frac{\text{Mjeq}}{\text{pç}} \text{ ou } 0,06 \frac{\text{kjeq}}{\text{pç}}$$

-----

Processo 5 – Energia elétrica para o processo de fosfatização do eixo:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,0145 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coeficiente de energia incorporada para a energia elétrica: 0,0507679 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 5 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,0145 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,0507679 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 5,38E + 02 \text{ MJe}q$$

Processo 5 - Energia incorporada total (energia elétrica) = 5,38E + 02 Mjeq.

Processo 5 - Energia incorporada (Mjeq/pç) =

$$\frac{5,38E+02 \text{ Mjeq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 7,36E - 05 \frac{\text{MJe}q}{\text{pç}} \text{ ou } 0,07 \frac{\text{kJe}q}{\text{pç}}$$

-----

Processo 6 – Energia elétrica para o processo de montagem e teste:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,03 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Coeficiente de energia incorporada para a energia elétrica: 0,0507679 MJeq/kg

Vida útil do produto: 10 anos

Energia incorporada do processo 6 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,03 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,0507679 \text{ Mjeq/kg})}{10 \text{ anos}} = 1,11E + 03 \text{ MJe}q.$$

Processo 6 - Energia incorporada total (energia elétrica) = 1,11E + 03 Mjeq.

Processo 6 - Energia incorporada (Mjeq/pç) =

$$\frac{1,11E+03 \text{ Mjeq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 1,52E - 04 \frac{\text{MJe}q}{\text{pç}} \text{ ou } 0,15 \frac{\text{kJe}q}{\text{pç}}$$

Valor determinado para Energia incorporada ( $k_{11}$ ) = 27,85 MJ<sub>eq</sub>/pç ou 27853,05 kJ<sub>eq</sub>/pç

## Apêndice C - Memorial de cálculo para o consumo de energia elétrica (k<sub>12</sub>)

Dados gerais:

Consumo mensal de energia elétrica

Produção anual: (pç.)

$$K_{12}, \quad \text{Consumo energia elétrica (kWh/unid)} = \frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}}$$

Processo 1 – Energia elétrica para o processo do estator:

$$\frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}} = \frac{1,24E+05\text{kWh/ano}}{7,31E+06\text{pç/ano}} = 0,017\text{kWh/pç ou } 16,92 \text{ Wh/pç}$$

Processo 2 – Energia elétrica para o processo do rotor:

$$\frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}} = \frac{1,61E+05\text{kWh/ano}}{7,31E+06\text{pç/ano}} = 0,022\text{kWh/pç ou } 22,00 \text{ Wh/pç}$$

Processo 3 – Energia elétrica para o processo do eixo:

$$\frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}} = \frac{2,05E+05\text{kWh/ano}}{7,31E+06\text{pç/ano}} = 0,028\text{kWh/pç ou } 28,00 \text{ Wh/pç}$$

Processo 4 – Energia elétrica para o processo de lavagem

$$\frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}} = \frac{8,04E+04\text{kWh/ano}}{7,31E+06\text{pç/ano}} = 0,011\text{kWh/pç ou } 11,00 \text{ Wh/pç}$$

Processo 5 – Energia Processo elétrica para o processo de fosfatização

$$\frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}} = \frac{1,06E+05\text{kWh/ano}}{7,31E+06\text{pç/ano}} = 0,0145\text{kWh/pç ou } 14,50 \text{ Wh/pç}$$

Processo 6 – Energia elétrica para o processo de montagem e teste

$$\frac{\text{kWh/ano}}{Q_{de.produzida/ano}} = \frac{2,19E+05\text{kWh/ano}}{7,31E+06\text{pç/ano}} = 0,030\text{kWh/pç ou } 30,00 \text{ Wh/pç}$$

Valor determinado para Consumo de energia elétrica (k<sub>12</sub>) = 0,12 kWh/pç ou 122,42 Wh/pç

## Apêndice D - Memorial de cálculo do aquecimento global ( $k_{21}$ ) para o inventário da matéria prima utilizada nos processos mapeados do estudo de caso

Dados gerais:

Quant. de matéria prima para produção de 1 peça: (kg)

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça

Potencial de aquecimento global da matéria prima: (kgCO<sub>2eq</sub>./kg)

Potencial de aquecimento global da energia elétrica (kgCO<sub>2eq</sub>./kg)

Produção anual: (pç.)

Vida útil do produto: (anos)

Processo 1 – Cobre para o processo do estator:

Quant. de cobre para produção de 1 peça: 0,70 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global do cobre: 7,8572 kgCO<sub>2eq</sub>./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento Global do processo 1 para o cobre:

$$\frac{(0,70 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 7,8572 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}./\text{kg})}{10 \text{ anos}} = 4,02E + 06 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}.$$

Processo 1 – Aço para o processo do estator:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 1,00 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global do cobre: 17,365 kgCO<sub>2eq</sub>./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento Global do processo 1 para o aço:

$$\frac{(1,00 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 17,365 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}./\text{kg})}{10 \text{ anos}} = 1,27E + 07 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}.$$

Processo 1 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,017 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global para a energia elétrica: 0,13297 kgCO<sub>2</sub>eq./kWh  
 Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 1 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,017 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,13297 \text{ kgCO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 1,65E + 03 \text{ Jeq.}$$

Processo 1 - Aquecimento Global total (cobre, aço e energia elétrica):

$$(4,02E + 06 \text{ kgCO}_2\text{eq.} + 1,27E + 07 \text{ kgCO}_2\text{eq. Jeq.} + 1,65E + 03 \text{ Jeq.}) = 1,67E + 07 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 1 – Aquecimento global (kgCO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,67E+07 \text{ kgCO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 2,29E + 00 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 2286,73 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

-----  
 Processo 2 – Alumínio para o rotor:

Quant. de alumínio para produção de 1 peça: 0,17 kg  
 Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)  
 Potencial de aquecimento global do cobre: 3,3078 kgCO<sub>2</sub>-eq./kg  
 Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento Global do processo 1 para o alumínio:

$$\frac{(0,17 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 3,3078 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 4,11E + 05 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 – Aço para o rotor:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 0,30 kg  
 Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)  
 Potencial de aquecimento global do cobre: 17,365 kgCO<sub>2</sub>eq./kg  
 Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento Global do processo 1 para o aço:

$$\frac{(0,30 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 17,365 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 3,81E + 06 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,022 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global para a energia elétrica: 0,13297 kgCO<sub>2</sub>eq./kWh

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 2 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,022 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,13297 \text{ kgCO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 2,14E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 - Aquecimento Global total (alumínio, aço e energia elétrica):

$$(4,11E + 05 \text{ kgCO}_2\text{eq.} + 3,81E + 06 \text{ kgCO}_2\text{eq.} + 2,14E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}) = 3,81E + 06 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

$$\text{Processo 2 – Aquecimento global (kgCO}_2\text{eq./pç)} = \frac{3,81E+06 \text{ kgCO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 5,21E - 01 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 521,24 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

-----

Processo 3 – Aço fundido para o eixo:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 0,30 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global do cobre: 2,1318 kgCO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 3 para o aço fundido:

$$\frac{(0,30 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,1318 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 4,67E + 05 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 3 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,028 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global para a energia elétrica: 0,13297 kgCO<sub>2</sub>eq./kWh

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 3 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,028 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,13297 \text{ kgCO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 2,72E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 3 – Aquecimento Global total (aço fundido e energia elétrica):

$$4,67E + 05 \text{ kgCO}_2\text{eq.} + 2,72E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.} = 4,70E + 05 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

$$\text{Processo 3 – Aquecimento global (kgCO}_2\text{eq./p}\zeta\text{)} = \frac{4,70E+05 \text{ kgCO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ p}\zeta} = 6,43E - 02 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{p}\zeta} \text{ ou } 64,33 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{p}\zeta}$$

-----

Processo 4 – Energia elétrica para o processo de lavagem do rotor:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,011 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global para a energia elétrica: 0,13297 kgCO<sub>2</sub>eq./kWh

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 4 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,011 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ p}\zeta \times 0,13297 \text{ kgCO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 1,07E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 4 – Aquecimento Global total (energia elétrica) = 1,07E + 03 kgCO<sub>2</sub>eq.

Processo 4 – Aquecimento global (kgCO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,07E+03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ p}\zeta} = 1,46E - 04 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{p}\zeta} \text{ ou } 0,15 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{p}\zeta}$$

-----

Processo 5 – Energia elétrica para o processo de fosfatização do eixo:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,0145 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global para a energia elétrica: 0,13297 kgCO<sub>2</sub>eq./kWh

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 5 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,0145 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ p}\zeta \times 0,13297 \text{ kgCO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 1,41E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 5 – Aquecimento Global total (energia elétrica) = 1,41E + 03 kgCO<sub>2</sub>eq.

Processo 5 – Aquecimento global (kgCO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,41E+03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ p}\zeta} = 1,93E - 04 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{p}\zeta} \text{ ou } 0,19 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{p}\zeta}$$

-----

Processo 6 – Energia elétrica para o processo de montagem e teste:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,03 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de aquecimento global para a energia elétrica: 0,13297 kgCO<sub>2</sub>eq./kWh

Vida útil do produto: 10 anos

Aquecimento global do processo 6 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,03 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,13297 \text{ kgCO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 2,91E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$$

Processo 6 – Aquecimento Global total (energia elétrica) = 2,91E + 03 kgCO<sub>2</sub>eq.

Processo 6 – Aquecimento global (kgCO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{2,91E+03 \text{ kgCO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 3,99E - 04 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 0,40 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

Valor determinado para Aquecimento global (k<sub>21</sub>) = 2,87 kgCO<sub>2</sub>eq./pç ou 2873,04 gCO<sub>2</sub>eq./pç

**Apêndice E - Memorial de cálculo do indicador potencial de acidificação (k<sub>22</sub>) para o inventário da matéria prima utilizada nos processos mapeados do estudo de caso**

Dados gerais:

Quant. de matéria prima para produção de 1 peça: (kg)

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça

Potencial de acidificação da matéria prima: (kgSO<sub>2</sub>-eq./kg)

Potencial de acidificação da energia elétrica: (kgSO<sub>2</sub>-eq./kg)

Produção anual: (pç.)

Vida útil do produto: (anos)

-----

Processo 1 – Cobre para o estator:

Quant. de cobre para produção de 1 peça: 0,70 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação do cobre: 0,29514 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 1 para o cobre:

$$\frac{(0,70 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,29514 \text{ kgSO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 1,51E + 05 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 1 – Aço para o estator:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 1,00 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação do aço: 0,057331 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 1 para o aço:

$$\frac{(1,00 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,057331 \text{ kgSO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 4,19E + 04 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 1 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,017 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação para a energia elétrica: 2,41E-05 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 1 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,017 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,41E-05 \text{ kgSO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 2,99E + 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 1 - Acidificação total (cobre, aço e energia elétrica):

$$(1,51E + 05 \text{ kgSO}_2\text{eq.} + 4,19E + 04 \text{ kgSO}_2\text{eq.} + 2,99E + 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}) = 1,93E + 05 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 1 – Acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,93E+05 \text{ kgSO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 2,64E - 02 \frac{\text{kgSO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 26,39 \frac{\text{gSO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

-----

Processo 2 – Alumínio para o rotor:

Quant. de alumínio para produção de 1 peça: 0,17 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação do alumínio: 0,023115 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 1 para o alumínio:

$$\frac{(0,17 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,023115 \text{ kgSO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 2,87E + 03 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 – Aço para o rotor:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 0,30 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação do aço: 0,057331 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 2 para o aço:

$$\frac{(0,30 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 0,057331 \text{ kgSO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 1,26E + 04 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,022 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação para a energia elétrica: 2,41E-05 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 2 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,022 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,41E-05 \text{ kgSO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 3,87E - 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 - Acidificação total (alumínio, aço e energia elétrica):

$$(2,87E + 03 \text{ kgSO}_2\text{eq.} + 1,26E + 04 \text{ kgSO}_2\text{eq.} \text{ kgSO}_2\text{eq.} + 3,87E - 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}) = 1,54E + 04 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 2 – Acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,54E+04 \text{ kgSO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 2,11E - 03 \frac{\text{kgSO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 2,11 \frac{\text{gSO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

Processo 3 – Aço fundido para o eixo:

Quant. de aço para produção de 1 peça: 0,30 kg

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação do aço fundido: 6,83E-03 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 3 para o aço fundido:

$$\frac{(0,30 \text{ kg} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 6,83E-03 \text{ kgSO}_2\text{eq./kg})}{10 \text{ anos}} = 1,50E + 03 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 3 – Energia elétrica para o processo do estator:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,028 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação para a energia elétrica: 2,41E-05 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 3 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,028 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,41E-05 \text{ kgSO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 4,92E - 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 3 – Acidificação total (aço fundido e energia elétrica):

$$1,50E + 03 \text{ kgSO}_2\text{eq.} + 4,92E - 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.} = 1,50E + 03 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 3 – Acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,50E+03 \text{ kgSO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 2,05E - 04 \frac{\text{kgSO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 0,20 \frac{\text{gSO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$


---

Processo 4 – Energia elétrica para o processo de lavagem do rotor:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,011 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação para a energia elétrica: 2,41E-05 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 4 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,011 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,41E-05 \text{ kgSO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 1,93E - 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 4 – Acidificação total (energia elétrica) = 1,93E – 01 kgSO<sub>2</sub>eq.

Processo 4 – Acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{1,93E-01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 2,65E - 08 \frac{\text{kgSO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 0,00 \frac{\text{gSO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$


---

Processo 5 – Energia elétrica para o processo de fosfatização do eixo:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,0145 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação para a energia elétrica: 2,41E-05 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 5 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,0145 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,41E-05 \text{ kgSO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 2,55E - 01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 5 – Acidificação total (energia elétrica) = 2,55E – 01 kgSO<sub>2</sub>eq.

Processo 5 – Acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{2,55E-01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 3,49E-08 \frac{\text{kgSO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 0,00 \frac{\text{gSO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

Processo 6 – Energia elétrica para o processo de montagem e teste:

Consumo de energia elétrica para produção de 1 peça: 0,03 kWh

Produção anual: 7.305.480 peças (7,31E+06 pç)

Potencial de acidificação para a energia elétrica: 2,41E-05 kgSO<sub>2</sub>eq./kg

Vida útil do produto: 10 anos

Acidificação do processo 6 para a energia elétrica:

$$\frac{(0,03 \text{ kWh} \times 7,31E+06 \text{ pç} \times 2,41E-05 \text{ kgSO}_2\text{eq./kWh})}{10 \text{ anos}} = 5,27E-01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}$$

Processo 6 – Acidificação total (energia elétrica) = 5,27E – 01 kgSO<sub>2</sub>eq.

Processo 6 – Acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq./pç) =

$$\frac{5,27E-01 \text{ kgSO}_2\text{eq.}}{7,31E+06 \text{ pç}} = 7,22E-08 \frac{\text{kgSO}_2\text{eq}}{\text{pç}} \text{ ou } 0,00 \frac{\text{gSO}_2\text{eq}}{\text{pç}}$$

Valor determinado para Acidificação (k<sub>22</sub>) = 0,03 kgSO<sub>2</sub>eq./pç ou 28,71 gSO<sub>2</sub>eq./pç

## Apêndice F - Eficiência Geral dos Equipamentos - OEE (k<sub>31</sub>)

Nota: Os dados a seguir foram obtidos no VSM tradicional existente

$$\text{Eficiencia Geral do Equipamento (OEE)} = \frac{\text{Qde total produzida aprovada}}{\text{Capac. nominal de produção do equip.}}$$

Processo 1 – Eficiência do processo do estator:

$$\text{OEE} = 83,31\%$$

Processo 2 – Eficiência do processo do rotor:

$$\text{OEE} = 74,12\%$$

Processo 3 – Eficiência do processo do eixo:

$$\text{OEE} = 54,50\%$$

Processo 4 – Eficiência do processo de lavagem:

$$\text{OEE} = 72,02\%$$

Processo 5 – Eficiência do processo de fosfatização:

$$\text{OEE} = 74,85\%$$

Processo 6 – Eficiência do processo de montagem e teste:

$$\text{OEE} = 75,47\%$$

Valor determinado para OEE (K<sub>31</sub>: valor mínimo: processo 3) = 54,50%

## Apêndice G - Índice de qualidade – First Time Quality - FTQ (k<sub>32</sub>)

Nota: Os dados a seguir foram obtidos no VSM tradicional existente

$$\text{Aprovado na Primeira Vez (FTQ \%)} = \frac{\text{Qde total produzida} - \text{Qde total aprovada}}{\text{Qde total produzida}}$$

Processo 1 – Índice de qualidade do processo do estator:

$$\text{FTQ} = 90,14\%$$

Processo 2 – Índice de qualidade do processo do rotor:

$$\text{FTQ} = 95,03\%$$

Processo 3 – Índice de qualidade do processo do eixo:

$$\text{FTQ} = 94,07\%$$

Processo 4 – Índice de qualidade do processo de lavagem:

$$\text{FTQ} = 100\%$$

Processo 5 – Índice de qualidade do processo de fosfatização:

$$\text{FTQ} = 100\%$$

Processo 6 – Índice de qualidade do processo de montagem e teste:

$$\text{FTQ} = 80,45\%$$

Valor determinado para FTQ (k<sub>32</sub> valor mínimo: processo 6) = 80,45%

## Apêndice H – Tempo de Setup nos processos (k<sub>33</sub>)

Nota: Os dados a seguir foram obtidos no VSM tradicional existente

*Setup Time (min) = Tempo entre a ultima peça aprov do mod ant e a primeira peça boa do novo modelo*

Processo 1 – Tempo de setup no processo do estator:

128 min

Processo 2 – Tempo de setup no processo do rotor:

70 min

Processo 3 – Tempo de setup no processo do eixo:

110 min

Processo 4 – Tempo de setup no processo de lavagem:

0 min

Processo 5 – Tempo de setup no processo de fosfatização:

0 min

Processo 6 – Tempo de setup no processo de montagem e teste:

60 min

Valor determinado para tempo de SETUP (k<sub>33</sub> valor máximo: processo 1) = 128 min

## Apêndice I – Lead Time do processo (tempo de passagem) ( $k_{34}$ )

Nota: Os dados a seguir foram obtidos no VSM tradicional existente

*Lead time nos processos = Tempo total de passagem de uma peça pelos processos considerados*

*Lead time nos estoques = Quantidade de peças no estoque x tempo takt do processo "cliente"*

Processo 1 – Lead time no processo do estator: 128 min

Processo 2 – Lead time no processo do rotor: 127 min

Processo 3 – Lead time no processo do eixo: 208,7 min (processo gargalo):

Processo 4 – Lead time no processo de lavagem: 3 min

Processo 5 – Lead time no processo de fosfatização: 8 min (processo gargalo)

Processo 6 – Lead time no processo de montagem e teste: 260 min

Lead time do estoque de matéria prima (Raw Material: RM): 8,13 dias

Lead time dos estoques entre os processos (Work In Process: WIP): 4,45 dias

Lead time do estoque de produto acabado (Finish Good: FG): 10,10 dias

Lead time total de estoques (RM/WIP/FG) = 22,71 dias = 29.979,43 min

Lead time determinado ( $k_{34}$ ) = 30.456,13 min

### Apêndice J - Memorial de cálculo para taxa de turnover (k<sub>41</sub>)

$$Taxa de Turnover = \frac{\left(\frac{Qde\ de\ demissões + Qde\ de\ admissões}{2}\right)}{Qde\ total\ final\ de\ Colaboradores}$$

Processo 1 – Taxa de turnover para o processo do estator:

$$Taxa\ de\ Turnover = \frac{\left(\frac{6\ colab.+3\ colab.}{2}\right)}{105\ Colaboradores} \times 100 = 4,29\%$$

Processo 2 – Taxa de turnover para o processo do rotor:

$$Taxa\ de\ Turnover = \frac{\left(\frac{2\ colab.+2\ colab.}{2}\right)}{16\ Colaboradores} \times 100 = 12,50\%$$

Processo 3 – Taxa de turnover para o processo do eixo:

$$Taxa\ de\ Turnover = \frac{\left(\frac{3\ colab.+5\ colab.}{2}\right)}{36\ Colaboradores} \times 100 = 11,11\%$$

Processo 4 – Taxa de turnover para o processo de lavagem

$$Taxa\ de\ Turnover = \frac{\left(\frac{0\ colab.+0\ colab.}{2}\right)}{2\ Colaboradores} \times 100 = 0,0\%$$

Processo 5 – Taxa de turnover para o processo de fosfatização

$$Taxa\ de\ Turnover = \frac{\left(\frac{0\ colab.+0\ colab.}{2}\right)}{3\ Colaboradores} \times 100 = 0,0\%$$

Processo 6 – Taxa de turnover para o processo de montagem e teste

$$Taxa\ de\ Turnover = \frac{\left(\frac{4\ colab.+6\ colab.}{2}\right)}{74\ Colaboradores} \times 100 = 6,76\%$$

Valor determinado para Taxa de turnover (k<sub>41</sub>) = 6,57%

### Apêndice K - Memorial de cálculo para taxa de equiparação salarial (k<sub>42</sub>)

$$\text{Taxa de equiparação salarial (\%)} = \frac{\text{Média salarial paga}}{\text{Média salarial de mercado}}$$

Processo 1 – Taxa de equiparação salarial para o processo do estator:

$$\text{Taxa de equiparação salarial} = \frac{\$2800,00}{\$2550,00} \times 100 = 109,80\%$$

Processo 2 – Taxa de equiparação salarial para o processo do rotor:

$$\text{Taxa de equiparação salarial} = \frac{\$2800,00}{\$2550,00} \times 100 = 109,80\%$$

Processo 3 – Taxa de equiparação salarial para o processo do eixo:

$$\text{Taxa de equiparação salarial} = \frac{\$2800,00}{\$2550,00} \times 100 = 109,80\%$$

Processo 4 – Taxa de equiparação salarial para o processo de lavagem

$$\text{Taxa de equiparação salarial} = \frac{\$2500,00}{\$2600,00} \times 100 = 96,15\%$$

Processo 5 – Taxa de equiparação salarial para o processo de fosfatização

$$\text{Taxa de equiparação salarial} = \frac{\$2800,00}{\$2550,00} \times 100 = 109,80\%$$

Processo 6 – Taxa de equiparação salarial para o processo de montagem e teste

$$\text{Taxa de equiparação salarial} = \frac{\$3100,00}{\$3150,00} \times 100 = 98,41\%$$

Valor determinado para Taxa de equiparação salarial (k<sub>42</sub>) = 96,15%

## Apêndice L - Memorial de cálculo para taxa de afastamento por acidente (k<sub>51</sub>)

Por convenção, a taxa básica padrão é de 200.000 horas de trabalho, equivalente a 100 funcionários trabalhando 40 horas semanais durante 50 semanas de trabalho por ano.

Para exemplificar, considerando uma empresa onde todos os funcionários juntos trabalharam 32.600 horas no ano, e a quantidade de dias perdidos por acidentes resultou em 3 dias. Logo:

$$Tx \text{ de dias perdidos por acidentes (\%)} = \left( \frac{Qde \text{ anual de dias perdidos por acidentes} \times 200.000 \text{ hs}}{Qde \text{ anual total de horas expostas ao risco}} \right)$$

$$(3 \times 200.000) / 32.600 = 18,4\%$$

De cada 100 funcionários, 18,4 deles (18,4%) tiveram perda de tempo devido a acidentes com afastamento no trabalho.

Processo 1 – Taxa de dias perdidos por acidente para o processo do estator:

$$Tx \text{ de dias perd. por acid.} = \left( \frac{52 \text{ dias} \times 200.000 \text{hs}}{3.300.000 \text{ hs}} \right) = 3,15\%$$

Processo 2 – Taxa de dias perdidos por acidente para o processo do rotor:

$$Tx \text{ de dias perd. por acid.} = \left( \frac{42 \text{ dias} \times 200.000 \text{hs}}{3.300.000 \text{ hs}} \right) = 2,55\%$$

Processo 3 – Taxa de dias perdidos por acidente para o processo do eixo:

$$Tx \text{ de dias perd. por acid.} = \left( \frac{58 \text{ dias} \times 200.000 \text{hs}}{3.300.000 \text{ hs}} \right) = 3,52\%$$

Processo 4 – Taxa de dias perdidos por acidente para o processo de lavagem

$$Tx \text{ de dias perd. por acid.} = \left( \frac{12 \text{ dias} \times 200.000 \text{hs}}{3.300.000 \text{ hs}} \right) = 0,73\%$$

Processo 5 – Taxa de dias perdidos por acidente para o processo de fosfatização

$$Tx \text{ de dias perd. por acid.} = \left( \frac{18 \text{ dias} \times 200.000 \text{hs}}{3.300.000 \text{ hs}} \right) = 1,09\%$$

Processo 6 – Taxa de dias perdidos por acidente para o processo de montagem e teste

$$Tx \text{ de dias perd. por acid.} = \left( \frac{55 \text{ dias} \times 200.000 \text{hs}}{3.300.000 \text{ hs}} \right) = 3,33\%$$

Valor determinado para Taxa de dias perdidos por acidentes de trabalho

$$(k_{51}) = 14,36\%$$

## Apêndice M - Memorial de cálculo para taxa de absenteísmo (k<sub>52</sub>)

$$\text{Taxa de absenteísmo (\%)} = 1 - \left( \frac{Q_{\text{de tot de horas planejadas}} - Q_{\text{de total de horas ausentes}}}{Q_{\text{de total de horas planejadas}}} \right) \times 100$$

Processo 1 – Taxa de absenteísmo para o processo do estator:

$$\text{Taxa de absenteísmo} = \left( 1 - \frac{2112 \text{ hs} - 66 \text{ hs}}{2112 \text{ hs}} \right) \times 100 = 3,13\%$$

Processo 2 – Taxa de absenteísmo para o processo do rotor:

$$\text{Taxa de absenteísmo} = \left( 1 - \frac{2112 \text{ hs} - 162 \text{ hs}}{2112 \text{ hs}} \right) \times 100 = 7,67\%$$

Processo 3 – Taxa de absenteísmo para o processo do eixo:

$$\text{Taxa de absenteísmo} = \left( 1 - \frac{2112 \text{ hs} - 71 \text{ hs}}{2112 \text{ hs}} \right) \times 100 = 3,36\%$$

Processo 4 – Taxa de absenteísmo para o processo de lavagem

$$\text{Taxa de absenteísmo} = \left( 1 - \frac{2112 \text{ hs} - 28 \text{ hs}}{2112 \text{ hs}} \right) \times 100 = 1,33\%$$

Processo 5 – Taxa de absenteísmo para o processo de fosfatização

$$\text{Taxa de absenteísmo} = \left( 1 - \frac{2112 \text{ hs} - 52 \text{ hs}}{2112 \text{ hs}} \right) \times 100 = 2,46\%$$

Processo 6 – Taxa de absenteísmo para o processo de montagem e teste

$$\text{Taxa de absenteísmo} = \left( 1 - \frac{2112 \text{ hs} - 98 \text{ hs}}{2112 \text{ hs}} \right) \times 100 = 4,64\%$$

Valor determinado para Taxa de absenteísmo (k<sub>52</sub>) = 3,76%

## Apêndice N - Valores calculados na programação por metas para o VSM4S como proposta do modelo, baseados no caso hipotético

Tabela N1. Valores hipotéticos calculados na programação por metas para o VSM4S como proposta do modelo

VSM4S	SECTOR 1, ENVIRONMENT PROVIDING RESOURCES								
	K11 - Embodied energy (MJeq/unit)	Nij (K11)	Pij (K11)	ISG (K11)	K12 - Electricity demand (kWh/unit)	Nij (K12)	Pij (K12)	ISG (K12)	SSI of Sector 1
VSM4S Current-State	3,12E-06	0,00E+00	1,20E-07	4,00E-02	3,72E-05	0,00E+00	3,33E-05	8,54E+00	8,58E+00
VSM4S Future-State Scenario 1	3,20E-06	0,00E+00	2,00E-07	6,67E-02	3,20E-05	0,00E+00	2,81E-05	7,21E+00	7,27E+00
VSM4S Future-State Scenario 2	3,08E-06	0,00E+00	8,00E-08	2,67E-02	3,42E-05	0,00E+00	3,03E-05	7,77E+00	7,80E+00
VSM4S Future-State Scenario 3	3,15E-06	0,00E+00	1,50E-07	5,00E-02	3,55E-05	0,00E+00	3,16E-05	8,10E+00	8,15E+00
VSM4S Future-State Scenario 4	3,24E-06	0,00E+00	2,40E-07	8,00E-02	3,00E-05	0,00E+00	2,61E-05	6,69E+00	6,77E+00
Goal for indicator	3,00E-06				3,90E-06				
Punishment		2,30E+00	1,00E+00			2,30E+00	1,00E+00		
Weight of importance for the sector	1,00E+00								
Objective	Minimize				Minimize				

VSM4S	SECTOR 2, ENVIRONMENT RECEIVING RESIDUES								
	K21 - Global warming potential (kgCO2eq./unit)	Nij (K21)	Pij (K21)	ISG (K21)	K22 - Acidification potential (kgSO2eq/unit)	Nij (K22)	Pij (K22)	ISG (K22)	SSI of Sector 2
VSM4S Current-State	7,85E-06	0,00E+00	7,15E-06	1,02E+01	1,38E-08	0,00E+00	1,27E-08	1,15E+01	2,18E+01
VSM4S Future-State Scenario 1	7,00E-06	0,00E+00	6,30E-06	9,00E+00	1,48E-08	0,00E+00	1,37E-08	1,25E+01	2,15E+01
VSM4S Future-State Scenario 2	7,55E-06	0,00E+00	6,85E-06	9,79E+00	1,28E-08	0,00E+00	1,17E-08	1,06E+01	2,04E+01
VSM4S Future-State Scenario 3	7,22E-06	0,00E+00	6,52E-06	9,31E+00	1,60E-08	0,00E+00	1,49E-08	1,35E+01	2,29E+01
VSM4S Future-State Scenario 4	7,85E-06	0,00E+00	7,15E-06	1,02E+01	1,80E-08	0,00E+00	1,69E-08	1,54E+01	2,56E+01
Goal for indicator	7,00E-07				1,10E-09				
Punishment		2,3	1,00			2,3	1,00		
Weight of importance for the sector	1,0								
Objective	Minimize				Minimize				

VSM4S	SECTOR 3, PRODUCTION UNIT								
	K31 - Overall efficiency - OEE (%)	Nij (K31)	Pij (K31)	ISG (K31)	K32 - First Time Quality (%)	Nij (K32)	Pij (K32)	ISG (K32)	SSI of Sector 3
VSM4S Current-State	77,00	13,00	0,00	0,14	4580,00	0,00	780,00	0,21	0,35
VSM4S Future-State Scenario 1	80,00	10,00	0,00	0,11	4200,00	0,00	400,00	0,11	0,22
VSM4S Future-State Scenario 2	90,00	0,00	0,00	0,00	4000,00	0,00	200,00	0,05	0,05
VSM4S Future-State Scenario 3	79,00	11,00	0,00	0,12	4225,00	0,00	425,00	0,11	0,23
VSM4S Future-State Scenario 4	74,00	16,00	0,00	0,18	4500,00	0,00	700,00	0,18	0,36
Goal for indicator	90,00				3800,00				
Punishment		1	1,80			1,8	1,00		
Weight of importance for the sector	1,0								
Objective	Maximize				Minimize				

Tabela N1. (continuação)

VSM4S	SECTOR 4, SOCIETY AS PROVIDER								
	K41 - Turnover rate (%)	Nij (K41)	Pij (K41)	ISG (K41)	K42 - Salary equivalence rate (%)	Nij (K42)	Pij (K42)	ISG (K42)	SSI of Sector 4
VSM4S Current-State	13,00	0,00	3,00	0,30	1045,00	45,00	0,00	0,04	0,34
VSM4S Future-State Scenario 1	12,00	0,00	2,00	0,20	1070,00	20,00	0,00	0,02	0,22
VSM4S Future-State Scenario 2	12,00	0,00	2,00	0,20	1020,00	70,00	0,00	0,06	0,26
VSM4S Future-State Scenario 3	11,50	0,00	1,50	0,15	1030,00	60,00	0,00	0,06	0,21
VSM4S Future-State Scenario 4	10,80	0,00	0,80	0,08	1055,00	35,00	0,00	0,03	0,11
Goal for indicator	10,00				1090,00				
Punishment		4,90	1,00			1	4,90		
Weight of importance for the sector	1,0								
Objective	Minimize				Maximize				

VSM4S	SECTOR 5, SOCIETY AS RECEIVER								
	K51 - Lost time accident rate (%)	Nij (K51)	Pij (K51)	ISG (K51)	K52 - Absenteeism rate (%)	Nij (K52)	Pij (K52)	ISG (K52)	SSI of Sector 5
VSM4S Current-State	3,00	0,00	2,20	2,75	5,00	0,00	3,20	1,78	4,53
VSM4S Future-State Scenario 1	2,00	0,00	1,20	1,50	3,00	0,00	1,20	0,67	2,17
VSM4S Future-State Scenario 2	2,50	0,00	1,70	2,13	2,00	0,00	0,20	0,11	2,24
VSM4S Future-State Scenario 3	1,10	0,00	0,30	0,38	3,00	0,00	1,20	0,67	1,04
VSM4S Future-State Scenario 4	1,20	0,00	0,40	0,50	2,20	0,00	0,40	0,22	0,72
Goal for indicator	0,80				1,80				
Punishment		4,90	1,00			4,90	1,00		
Weight of importance for the sector	1,0								
Objective	Minimize				Minimize				

VSM4S		SSIS
VSM4S Current-State		35,56
VSM4S Future-State Scenario 1		31,33
VSM4S Future-State Scenario 2		30,77
VSM4S Future-State Scenario 3		32,49
VSM4S Future-State Scenario 4		33,55

## Apêndice O - Valores calculados na programação por metas para o VSM4S resultante do estudo de caso

Tabela O1. Valores calculados na programação por metas para o VSM4S resultante do estudo de caso

VSM4S	SECTOR 1, ENVIRONMENT PROVIDING RESOURCES								
	K11 - Embodied energy (MJeq./unit)	Nij (K11)	Pij (K11)	ISG (K11)	K12 - Electricity demand (kWh/unit)	Nij (K12)	Pij (K12)	ISG (K12)	SSI of Sector 1
VSM4S Current-State	27853.05	0.00E+00	2.12E+03	0.08	122.42	0.00E+00	9.30E+00	0.08	0.08
VSM4S Future-State Scenario 1	22268.28	3.47E+03	0.00E+00	0.06	97.94	1.52E+01	0.00E+00	0.06	0.06
VSM4S Future-State Scenario 2	27853.05	0.00E+00	2.12E+03	0.08	122.42	0.00E+00	9.31E+00	0.08	0.08
VSM4S Future-State Scenario 3	27853.05	0.00E+00	2.12E+03	0.08	122.42	0.00E+00	9.31E+00	0.08	0.08
VSM4S Future-State Scenario 4	22268.28	3.47E+03	0.00E+00	0.06	97.94	1.52E+01	0.00E+00	0.06	0.06
Goal for indicator	25736.22				113.11				
Punishment		2.3	1.00			2.3	1.00		
Weight of importance for the sector	1.0								
Objective	Minimize				Minimize				

VSM4S	SECTOR 2, ENVIRONMENT RECEIVING RESIDUES								
	K21 - Global warming potential (kgCO2eq./unit)	Nij (K21)	Pij (K21)	ISG (K21)	K22 - Acidification potential (kgSO2eq./unit)	Nij (K22)	Pij (K22)	ISG (K22)	SSI of Sector 2
VSM4S Current-State	2873.04	0.00E+00	2.18E+02	0.08	28.71	0.00E+00	2.18E+00	0.08	0.08
VSM4S Future-State Scenario 1	2388.86	2.66E+02	0.00E+00	0.04	8.51	1.80E+01	0.00E+00	0.30	0.17
VSM4S Future-State Scenario 2	2873.04	0.00E+00	2.18E+02	0.08	28.71	0.00E+00	2.18E+00	0.08	0.08
VSM4S Future-State Scenario 3	2873.04	0.00E+00	2.18E+02	0.08	28.71	0.00E+00	2.18E+00	0.08	0.08
VSM4S Future-State Scenario 4	2388.86	2.66E+02	0.00E+00	0.04	8.51	1.80E+01	0.00E+00	0.30	0.17
Goal for indicator	2654.69				26.53				
Punishment		2.3	1.00			2.3	1.00		
Weight of importance for the sector	1.0								
Objective	Minimize				Minimize				

Tabela O1. (continuação)

VSM4S	SECTOR 3, PRODUCTION UNIT								
	K31 - Overall efficiency - OEE (%)	Nij (K31)	Pij (K31)	ISG (K31)	K32 - Fist Time Quality (%)	Nij (K32)	Pij (K32)	ISG (K32)	SSI of Sector 3
VSM4S Current-State	54.50	40.50	0.00	0.43	80.45	14.55	0.00	0.15	
VSM4S Future-State Scenario 1	54.50	40.50	0.00	0.43	80.45	14.55	0.00	0.15	
VSM4S Future-State Scenario 2	74.00	21.00	0.00	0.22	88.00	7.00	0.00	0.07	
VSM4S Future-State Scenario 3	54.50	40.50	0.00	0.43	80.45	14.55	0.00	0.15	
VSM4S Future-State Scenario 4	74.00	21.00	0.00	0.22	88.00	7.00	0.00	0.07	
Goal for indicator	95.00				95.00				
Punishment		1	1.80			1	1.80		
Weight of importance for the sector	1.0								
Objective	Maximize				Maximize				
VSM4S	SECTOR 3, PRODUCTION UNIT								
	K33 - Setup Time (min)	Nij (K33)	Pij (K33)	ISG (K33)	K34 - Lead Time (hr)	Nij (K34)	Pij (K34)	ISG (K34)	SSI of Sector 3
VSM4S Current-State	128.00	0.00	113.00	7.53	30456.13	0.00	20739.43	2.13	2.56
VSM4S Future-State Scenario 1	128.00	0.00	113.00	7.53	30456.13	0.00	20739.43	2.13	2.56
VSM4S Future-State Scenario 2	73.00	0.00	58.00	3.87	9716.70	0.00	0.00	0.00	1.04
VSM4S Future-State Scenario 3	128.00	0.00	113.00	7.53	30456.13	0.00	20739.43	2.13	2.56
VSM4S Future-State Scenario 4	73.00	0.00	58.00	3.87	9716.70	0.00	0.00	0.00	1.04
Goal for indicator	15.00				9716.70				
Punishment		1.80	1.00			1.80	1.00		
Weight of importance for the sector									
Objective	Minimize				Minimize				
VSM4S	SECTOR 4, SOCIETY AS PROVIDER								
	K41 - Unemployment rate (%)	Nij (K41)	Pij (K41)	ISG (K41)	K42 - Average salary (R\$)	Nij (K42)	Pij (K42)	ISG (K42)	SSI of Sector 4
VSM4S Current-State	6.57	2.43	0.00	0.06	96.15	3.85	0.00	0.04	0.05
VSM4S Future-State Scenario 1	6.57	2.43	0.00	0.06	96.15	3.85	0.00	0.04	0.05
VSM4S Future-State Scenario 2	6.57	2.43	0.00	0.06	96.15	3.85	0.00	0.04	0.05
VSM4S Future-State Scenario 3	2.75	6.25	0.00	0.14	110.00	0.00	10.00	0.02	0.08
VSM4S Future-State Scenario 4	2.75	6.25	0.00	0.14	110.00	0.00	10.00	0.02	0.08
Goal for indicator	9.00				100.00				
Punishment		4.90	1.00			1.00	4.90		
Weight of importance for the sector	1.0								
Objective	Minimize				Maximize				
VSM4S	SECTOR 5, SOCIETY AS RECEIVER								
	K51 - Lost time accident rate (%)	Nij (K51)	Pij (K51)	ISG (K51)	K52 - Absenteeism Index (%)	Nij (K52)	Pij (K52)	ISG (K52)	SSI of Sector 5
VSM4S Current-State	14.36	0.00	2.30	0.19	3.76	0.00	1.96	1.09	0.64
VSM4S Future-State Scenario 1	14.36	0.00	2.30	0.19	3.76	0.00	1.96	1.09	0.64
VSM4S Future-State Scenario 2	14.36	0.00	2.30	0.19	3.76	0.00	1.96	1.09	0.64
VSM4S Future-State Scenario 3	12.06	0.00	0.00	0.00	1.88	0.00	0.08	0.05	0.02
VSM4S Future-State Scenario 4	12.06	0.00	0.00	0.00	1.88	0.00	0.08	0.05	0.02
Goal for indicator	12.06				1.80				
Punishment		4.90	1.00			4.90	1.00		
Weight of importance for the sector	1.0								
Objective	Minimize				Minimize				

<b>VSM4S</b>	<b>SSIS</b>
VSM4S Current-State	3.41
VSM4S Future-State Scenario 1	3.48
VSM4S Future-State Scenario 2	1.89
VSM4S Future-State Scenario 3	2.83
VSM4S Future-State Scenario 4	1.37

## Apêndice P – Questionário aplicado à especialistas para avaliar a aplicabilidade da ferramenta VSM4S.

Questionário desenvolvido utilizando-se o aplicativo gratuito ‘Google Forms’. Esse questionário foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa Científica da Universidade Paulista, conforme parecer consubstanciado de número 6.932.871.

---

### VSM4S - Value Stream Mapping For Sustainability

---

**B** *I* U ↻ ✕

Proposta de inclusão de indicadores ambientais e sociais no VSM tradicional / Proposal to include environmental and social indicators in the traditional VSM

---

Prezado (a) \*

O resumo abaixo fornece informações sobre uma proposta de Value Stream Mapping (VSM) modificado, chamado de " Value Stream Mapping For Sustainability" (VSM4S), onde inclui-se os indicadores tradicionais do VSM, adicionados à indicadores sociais e ambientais em busca de decisões orientadas para a sustentabilidade. Esse curto questionário (10 questões de alternativas) busca melhor entender sobre a 'aplicabilidade' da ferramenta proposta. Nenhuma informação pessoal ou da empresa em que você trabalha será necessário e/ou divulgado, apenas a sua (anônima) percepção sobre a aplicabilidade da ferramenta proposta.

---

Os dados obtidos serão utilizados para fins exclusivamente acadêmicos, integrando parte de minha tese de doutorado em Engenharia de Produção.

Se você estiver de acordo em responder esta pesquisa, favor anotar no espaço abaixo "Eu concordo".

Desde já agradeço sua colaboração. Ela será de crucial importância.

Proposal to include environmental and social indicators in the traditional VSM

Dear

The following summary provides information on a modified Value Stream Mapping (VSM) proposal, called "Value Stream Mapping For Sustainability" (VSM4S), which includes traditional VSM indicators, added to social and environmental indicators in search of decisions oriented towards sustainability. This short questionnaire (10 alternative questions) seeks to better understand the 'applicability' of the proposed tool. No personal information or information about your company will not be necessary and/or disclosed, just your (anonymous) perception about the proposed tool applicability. The data obtained will be used for exclusively academic purposes, forming part of my doctoral thesis in Production Engineering.

If you agree to answer this survey, please write in the space below "I agree"

Texto de resposta longa

---

## Resumo

Diante da crescente demanda por recursos naturais para geração de produtos industriais e diluição de resíduos, tornou-se muito importante incorporar propostas com projetos de melhoria que considerem não apenas os aspectos econômicos, mas também os aspectos ambientais e sociais quando se trata de otimização de processos na manufatura. Além de outras possibilidades, a inclusão de aspectos de sustentabilidade durante o mapeamento de processos é muito importante do ponto de vista estratégico, uma vez que o Value Stream Mapping (VSM) tradicional já é uma ferramenta amplamente difundida e utilizada mundialmente em empresas de manufatura. Embora existam tentativas de incluir aspectos de sustentabilidade no VSM, a maioria não considera de forma integrada os capitais econômico, social e ambiental, além de não apresentar modelos conceituais de sustentabilidade epistemologicamente enraizados para sustentar a escolha de indicadores, discussões e decisões.

O objetivo deste estudo é propor o "Value Stream Mapping for Sustainability" (VSM4S), uma ferramenta que combina as vantagens do VSM tradicional com a inclusão de aspectos de sustentabilidade baseados no modelo de sustentabilidade dos cinco setores (5SEnSU) que quantifica a sustentabilidade através do Indicador de Sustentabilidade do Sistema (SSIS).

A exemplo do que já ocorre no VSM tradicional, com base nos resultados obtidos na elaboração do "estado atual" do VSM4S e nas metas estratégicas definidas para o próximo período, uma equipe interna de especialistas de diferentes áreas do conhecimento da empresa realizam as análises necessárias, para a elaboração do VSM4S "estado futuro", podendo apresentar diferentes cenários de projetos Kaizen com seus respectivos resultados de SSIS. Isso possibilita aos tomadores de decisão a escolha pelo cenário que julgarem mais alinhado ao planejamento estratégico da empresa.

Caso queira, comente algo a respeito (opcional).

## Abstract

Given the growing demand for natural resources to generate industrial products and dilute waste, it has become very important to incorporate proposals with improvement projects that consider not only economic aspects, but also environmental and social aspects when it comes to optimizing manufacturing processes. In addition to other possibilities, the inclusion of sustainability aspects during process mapping is very important from a strategic point of view, since traditional Value Stream Mapping (VSM) is already a widely disseminated tool used worldwide in manufacturing companies. Although there are attempts to include aspects of sustainability in the VSM, most do not consider economic, social and environmental capital in an integrated way, Furthermore, they often lack epistemologically rooted conceptual models of sustainability to support the choice of indicators, discussions and decisions.

The objective of this study is to propose "Value Stream Mapping for Sustainability" (VSM4S), a tool that combines the advantages of traditional VSM with the inclusion of sustainability aspects based on the five sectors sustainability model (5SEnSU) that quantifies the sustainability through the System Sustainability Indicator (SSIS).

As example of what already occurs in traditional VSM, based on the results obtained in the elaboration of the "current state" of VSM4S and the strategic goals defined for the next period, an internal team of specialists from different areas of the company perform the needed analysis for the preparation of the VSM4S "future state", which can present different Kaizen project scenarios with their respective SSIS results. This allows decision makers to choose the scenario that they believe is most aligned with the company's strategic planning.

If you wish, feel free to add comments (optional).

Texto de resposta longa

---

Caso tenha (opcional) interesse em se aprofundar mais no assunto, segue abaixo o link para acessar o artigo publicado na revista "Sustainable Production and Consumption" a respeito da ferramenta VSM4S proposta: / If you are (optional) interested in delving deeper into the subject, below is the link to access the published paper in the journal "Sustainable Production and Consumption" regarding the proposed VSM4S tool.:

[VSM4S – Value Stream Mapping For Sustainability](#)

Caso tenha lido o artigo, comente a seguir sobre o mesmo (opcional) / In case you have read the paper, comment below on it (optional)

Texto de resposta longa

---

⋮

\*

1 - Qual o seguimento da empresa em que você trabalha? Se a resposta for "outros", favor especificar se possível. / What is the sector of the company you work for? If the answer is "other", please specify if possible.

- Metal mecânico / Mechanical metal company
- Textil / Textile company
- Químico / Chemical company
- Alimentos / Foods company
- Outros...  
.....

2 - Profissionalmente, em qual dos níveis abaixo sua atual posição corresponde? Se a resposta for, "outros", favor especificar se possível. / Professionally, which of the levels below does your current position correspond to? If the answer is "other", please specify if possible.

- Supervisão / Supervisor
- Gerência / Manager
- Diretoria / Director
- Presidência / President
- Outros...  
.....

⋮

\*

3 - Por favor, indique o seu nível de familiaridade com a ferramenta VSM: / Please inform your familiarity level with the VSM tool:

- Atuo fortemente na aplicação do VSM na empresa em que trabalho. / I heavily act on the VSM applicatio...
- Atuo moderadamente na aplicação do VSM na empresa em que trabalho, reservando parte do meu temp...
- A empresa em que trabalho utiliza da ferramenta VSM, mas eu não participo em nenhum momento de s...
- Conheço a ferramenta VSM, mas ela não é utilizada (ou não sei se é utilizada) na empresa em que trabal...
- Não conheço o VSM e não sei se a empresa em que trabalho utiliza essa ferramenta. / I don't know VSM...

⋮

4 - A utilização do VSM4S em comparação ao VSM tradicional, mesmo considerando novos times para atuarem juntamente ao time de manufatura, pode aumentar a carga de trabalho para os envolvidos, e como consequência passar a ser uma ferramenta inviável para ser aplicada. / Using VSM4S in comparison to traditional VSM, even considering new teams to work alongside the manufacturing team, can increase the workload for those involved, and as a consequence become an unfeasible tool to be applied. \*

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree
- Concorda totalmente / Totally agree

⋮

5 - Com a inclusão dos indicadores ambientais e sociais, o VSM4S passa a ser uma ferramenta complexa, deixando de cumprir o seu principal propósito que é enxergar as perdas e desperdícios na manufatura e combatê-los. / Including environmental and social indicators, the VSM4S becomes a complex tool, failing to fulfill its main purpose of identifying losses and waste in production in order to combat them. \*

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree
- Concorda totalmente / Totally agree

6 - Devido às atuais demandas por sistemas de produção mais sustentáveis, o VSM4S deve substituir o VSM tradicional em todo e qualquer segmento de manufatura existente. / Due to current demands for more sustainable production systems, VSM4S must replace traditional VSM in any and all existing production segments.

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree
- Concorda totalmente / Totally agree

7 - O VSM4S proposto nesse estudo é uma ferramenta que pode conflitar com os princípios adotados no VSM tradicional. / The proposed VSM4S in this study is a tool that may conflict with the principles adopted in the traditional VSM. \*

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree
- Concorda totalmente / Totally agree

8 - As áreas que gerenciam os aspectos ambientais e sociais nas empresas seriam muito bem-vindas para se juntarem ao time de manufatura que tradicionalmente conduz os workshops de mapeamento na empresa. / Areas that manage environmental and social aspects will be very welcome to join the manufacturing team who traditionally conducts production flow mapping workshops at companies.

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree
- Concorda totalmente / Totally agree

9 - A aplicação do mapeamento na manufatura deve ser uma prática exclusivamente operacional sem o envolvimento da alta gestão, considerando que tal prática, mesmo alavancando os indicadores operacionais, acaba não conseguindo impactar em indicadores estratégicos de lucratividade da empresa. / In manufacturing, the mapping application must be an exclusively operational practice without the top management involvement, considering that such a practice, even improving operational indicators, ends up failing to impact the company's strategic profitability indicators.

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree

10 - O VSM4S pode não ser atraente para as áreas de sustentabilidade e de gestão social nas empresas, uma vez que essas áreas podem concluir que mesmo participando de forma mais ativa do mapeamento, seus indicadores não seriam impactados, e o VSM4S pode não contribuir com iniciativas nos aspectos ambientais e sociais. / VSM4S may not be attractive to the sustainability and social management areas in companies, since these areas may conclude that even if they participate more actively in mapping, their indicators would not be impacted, and VSM4S may not contribute to initiatives in the environmental and social aspects.

- Discorda totalmente / Totally disagree
- Discorda / Disagree
- Não discorda nem concorda / Neither disagree nor agree
- Concorda / Agree

11 – O espaço abaixo é aberto (opcional) para você adicionar comentários e considerações que julgar importantes sobre o assunto. / The space bellow is open (optional) for you in order to add comments and considerations that you deem important regarding the subject.

Texto de resposta longa

---

## **Apêndice Q – Comentários conclusivos dos respondentes para a questão aberta (Questão 11) do questionário do Apêndice P.**

Os parágrafos a seguir representam *ipsis literis* conforme respondido pelos especialistas. Cada parágrafo representa a colaboração/comentário de um único revisor. Todos esses parágrafos são avaliados criticamente e discutidos de forma conjunta no texto principal desta tese. Como a Questão 11 não era obrigatória, tem-se apenas 16 respostas ao invés do total de 29 respondentes.

Especialista: *“A integração da ferramenta com outros métodos já consolidados como o estudo de mapeamento de carbono, balanços de massa e energia são alternativas relevantes para a adoção da ferramenta”.*

Especialista: *“Management must have significant knowledge about how to use and design systems for VSM4S before taking the initiatives from the workers end. Also, management commitment, employees career growth, respect for the human values, fair operating practices, and equal opportunities for all are important part for the organizations for the long term survival/success of the manufacturing strategy. Special care must be taken care of that. The gap or mismatch will cause the failure of the system. Employees' ideas must be implemented in line with the requirement of VSM4S. Your concept is good. Gap must be identified or in-depth study must be done for the system failure for VSM4S in large, medium, and small organizations”.*

Especialista: *“Como resumo geral a ferramenta VSM4S integrada ao VSM pode tornar-se empecilho ao cumprimento de metas no evento Kaizen quanto ao seu principal objetivo: ações simples fáceis e rápidas”.*

Especialista: *“Em suma na minha visão, o SVM4S como metodologia pode ser aplicável no levantamento de oportunidades de melhorias no aspecto da Sustentabilidade, entretanto, parece não ser tão eficaz quanto ao VSM no alcance de resultados de formas simples/fáceis e rápidos”.*

Especialista: *“Na abordagem VSM4S deve ser considerado quais são os principais impactos e compromissos em relação a Environment Social e Governance – ESG, estabelecendo os processos e indicadores onde podem gerar impacto/contribuição no VSM4S. Nesse aspecto recomenda-se considerar também todo o supply chain e não apenas o processo de manufatura”.*

Especialista: *“Avalio que o modelo proposto possa conectar ainda mais os direcionamentos de ESG da Cia na visão atual e futura da empresa quanto aos controles ambientais e demais impactos, gerando maior sinergia entre os processos”.*

Especialista: *“É verdade que no Brasil muitas vezes tendemos a fazer análises superficiais, e acredito que isso esteja enraizado em nossa cultura. O desejo por respostas rápidas nem sempre resulta na melhor solução. Métodos como o VSM4S são úteis para aqueles que buscam soluções mais profundas e queiram realmente identificar a causa raiz dos problemas. Ao adotar abordagens mais completas e detalhadas, podemos enfrentar os desafios de forma mais eficaz e duradoura”.*

Especialista: *“Em relação à questão #7, embora a resposta tenha sido "DISCORDA", pessoalmente tenho alguma preocupação de conflito com o VSM. Isto porque os insumos e rejeitos em muitos casos dependem muito de ações e ambientes externos que fogem ao controle interno das empresas. Também nessas preocupações se incluem a velocidade da implementação das ações do "ESTADO FUTURO", com isso estendendo muito a conclusão do evento”.*

Especialista: *“Como mencionado anteriormente, entendo como favorável a extensão de escopo das ferramentas e modelos tradicionais de análise onde seja possível incluir as premissas de sustentabilidade. Entendo também que a maioria das ferramentas e gestão que são propostas na engenharia de produção são passíveis dessa extensão de escopo. A combinação com esses elementos estendidos (VSM e VSM4S), se devidamente usados como elementos de gestão, acabam por melhorar a eficiência e a reputação sob o ponto de vista de governança”.*

Especialista: *“Vimos nos últimos anos as áreas de “Environment, Health and Safety”- EHS ganhando visibilidade na indústria, mas são poucas as ferramentas que conectam a manufatura e os indicadores de EHS. O VSM4S é uma ferramenta que irá contribuir para as indústrias”.*

Especialista: *“Acredito que com o crescente foco na sustentabilidade essa pode ser uma ferramenta muito bem-vista nas organizações, principalmente se vier mais simples e automatizada / digitalizada”.*

Especialista: *“Muito boa essa proposta de VSM4S. É mais uma forma de enxergar ganhos ou perdas no processo”.*

Especialista: *“Eu trabalho em uma empresa para o ramo de Energia Renováveis onde a sustentabilidade é o valor nosso”.*

Especialista: *“O tema sustentabilidade tem que fazer parte da gestão diária das empresas em questão, visando incorporar esses aspectos ao que já existe. Tratando sustentabilidade como o “algo a mais”, perde-se a oportunidade de alavancar mais resultados e conseqüentemente ser mais competitivo. Sustentabilidade chegou pra ficar e dever ser uma matéria de conhecimento e execução de todos”.*

Especialista: *“Many manufacturing companies still struggle to apply more sustainable practices to their businesses. Therefore, the proposal of Value Stream Mapping for Sustainability presented here will be relevant for introducing sustainability more deeply into company dynamics and the starting point anchored in an already known tool such as Value Stream Mapping can facilitate its adoption”.*

Especialista: *“Penso que a aplicação prática do VSM4S exigirá um approach técnico embasado para adquirir o buy-in dos stakeholders da empresa, ou seja, será necessário um processo de entendimento da metodologia por aqueles que irão patrocinar a iniciativa. Essa compreensão técnica deverá ser cascateada a jusante na empresa. Vejo muito potencial nessa metodologia, pois alia indicadores técnicos com o poder de uma ferramenta muito visual que é o VSM. Acredito que poucas ferramentas têm tamanho poder de visualização dos processos e suas conexões”.*