

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO
DA SUSTENTABILIDADE
DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO (ASUPRO): Transporte da
soja no Brasil como estudo de caso

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.

THAMES RICHARD SILVA

SÃO PAULO
2019

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO
DA SUSTENTABILIDADE
DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO (ASUPRO): Transporte da
soja no Brasil como estudo de caso

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 Ecologia Industrial.

Projeto de Pesquisa: Avaliação energética-ambiental de sistemas de produção utilizando abordagem sistêmica.

THAMES RICHARD SILVA

SÃO PAULO

2019

Silva, Thames Richard.

Proposta de procedimento para avaliação da sustentabilidade de operações e processos de produção (ASUPRO) : transporte da soja no Brasil como estudo de caso / Thames Richard Silva. - 2019.

151 f. : il. color. + CD-ROM.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2019.

Área de Concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.
Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho.

1. Avaliação da sustentabilidade. 2. Operações e processos de produção. 3. Sistemas de transporte. I. Agostinho, Feni Dalano Roosevelt (orientador). II. Título.

THAMES RICHARD SILVA

Data de aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

_____/____/____
Prof. Orientador Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho, Universidade Paulista - UNIP

_____/____/____
Prof. Dr. Biagio Fernando Giannetti, Universidade Paulista – UNIP

_____/____/____
Prof.^a Dra. Cecilia Maria Villas Boas Almeida, Universidade Paulista – UNIP

_____/____/____
Prof. Dr. Luca Coscieme, Trinity College Dublin

_____/____/____
Prof. Dr. Fernando Jorge Cutrim Demetrio, Universidade Estadual do Maranhão

DEDICATÓRIA

*A DEUS, por ter me dado forças e
inspiração na realização deste trabalho*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela saúde, sabedoria, fé e por não permitir que eu desista de lutar pelos meus sonhos.

À minha esposa, Márcia, e aos meus filhos, Murilo e Gustavo, pelo apoio, estímulo e compreensão durante o tempo em que me dediquei ao curso.

Aos meus pais, Rubens e Teresinha (*in memoriam*), que sempre me incentivaram a buscar novos conhecimentos por meio do estudo.

Ao professor Feni Agostinho, que com paciência e dedicação me orientou. Juntos, finalizamos este trabalho de pesquisa.

Aos professores Biagio Fernando Giannetti, Cecilia Maria Villas Boas de Almeida, Fábio Sevegnani e Roberto Rene Moreno Garcia, pelas saudáveis discussões e valiosas sugestões, visando aprimorar a qualidade deste estudo.

Aos colegas de pós-graduação.

Aos Doutores e membros da banca dos exames de qualificação e defesa da tese, Feni, Biagio, Cecília, Luca Coscieme e Fernando Cutrim, pelas valiosas sugestões oferecidas, possibilitando que este trabalho fosse concluído de forma mais rica.

RESUMO

A avaliação da sustentabilidade é um passo fundamental para apoiar as decisões voltadas para o desenvolvimento sustentável, e vários procedimentos para avaliar a sustentabilidade de sistemas de produção antrópicos têm sido sugeridos. No entanto, a maioria deles carece de um construto de base científica que suporte seu modelo conceitual de sustentabilidade, o que geralmente resulta em uma escolha de indicador (es) sem critério que possa melhor representar uma fração do maior e mais profundo conceito de sustentabilidade. Este trabalho propõe um novo framework, denominado Procedimento para Avaliação da Sustentabilidade de Operações e Processos de Produção (ASUPRO), apoiado pelo método de gestão de quatro etapas do PDCA (planejar, fazer, verificar e agir) e o modelo de sustentabilidade de cinco setores (5SEnSU). Fundamentada em bases científicas, o ASUPRO fornece os passos para uma avaliação de sustentabilidade, incluindo sua contextualização (objetivos, unidade funcional, limites, diagrama de energia), a escolha de indicadores baseados no modelo 5SEnSU, a etapa de quantificação incluindo programação de metas como ferramenta multicritério, e concluir o primeiro ciclo com análise de sensibilidade. Para ilustrar uma aplicação da ASUPRO, as opções de transporte rodoviário e ferroviário para a soja no Brasil são consideradas como um estudo de caso. Os resultados mostram que o modal ferroviário apresenta melhor desempenho quanto ao Indicador Global de Sustentabilidade (WSI de $3,6 \pm 0,4$) do que o modo rodoviário (WSI de $4,0 \pm 0,3$). Para uma melhoria do WSI, a análise de sensibilidade destaca que as políticas públicas ou até mesmo as ações privadas devem se concentrar principalmente na redução da emergência investida no sistema ferroviário, enquanto a opção transporte rodoviário reivindica esforços para reduzir seu aquecimento global e potenciais de acidificação. O procedimento ASUPRO é a principal contribuição neste trabalho, na medida em que tenta superar as deficiências normalmente encontradas em artigos científicos com o objetivo de avaliar a sustentabilidade de sistemas antrópico.

Palavras-chave: Avaliação da Sustentabilidade. Operações e processos de produção. Sistemas de transporte.

ABSTRACT

Sustainability assessment is a fundamental step to support decisions towards sustainable development, and several procedures to assess the sustainability of anthropic production systems have been suggested. However, most of them lack a scientific-based construct supporting their conceptual model of sustainability, which usually results in a choice of indicator(s) without criterion that can best represent a fraction of the larger and deeper concept of sustainability. This work proposes a novel framework, named Sustainability Assessment Procedure for Operations and Production Processes (SUAPRO), supported by the PDCA four-step management method (plan, do, check, and act) and the five sectors sustainability(5SEnSU) model. Grounded on scientific bases, SUAPRO provides the steps for a sustainability assessment, including its contextualization (objectives, functional unit, boundaries, energy diagram), the choice of indicators based on the 5SEnSU model, the quantification step including goal programming as a multicriteria tool, and conclude the first cycle with sensitivity analysis. To illustrate an application of SUAPRO, the road and railroad transportation options for soybean in Brazil are considered as a case study. Results show that the railroad mode has better performance as for the Global Sustainability Indicator (WSI of $3,6 \pm 0,4$) than the road mode (WSI of $4,0 \pm 0,3$). Towards a WSI improvement, the sensitivity analysis highlights that public policies or even private actions should be mainly focused on reducing the emergy invested in the railroad system, while the road transportation option claims effort in reducing its global warming and acidification potentials. SUAPRO is the main contribution in this work, as it tries to overcome shortcomings as usually found in scientific papers aiming to assess the sustainability of anthropic systems.

Keywords: Sustainability assessment. Operations and production processes. Transport systems.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Domínios ambiental, social e econômico do TSIP (Transportation Index for Sustainable Places).....	37
Tabela 2: Relação dos indicadores ambientais de transporte mais usados e suas referências.....	38
Tabela 3: Critérios para escolha dos indicadores ambientais.....	39
Tabela 4: Relação dos indicadores sociais mais usados e suas referências.....	40
Tabela 5: Número de indicadores chave de acordo com as dimensões do <i>tripple bottom line</i> por período de tempo.....	41
Tabela 6: Indicadores medidos pela Millennium Cities Database for Sustainable Mobility.....	42
Tabela 7: Símbolos utilizados na elaboração de diagramas de energia.....	54
Tabela 8: Percentuais por categoria e critério.....	60
Tabela 9: Pesos considerados no ASUPRO conforme critério e setor.....	61
Tabela 10: Pesos atribuídos aos desvios dos indicadores em relação às suas metas	67
Tabela 11: Princípios de avaliação de sustentabilidade.....	72
Tabela 12: Principais municípios produtores de soja em 2014 e distâncias ao porto de Santos e ao terminal Rondonópolis.....	77
Tabela 13: Avaliação em emergia do transporte rodoviário de soja dos municípios produtores até o porto de Santos. Memorial de cálculo é apresentado no apêndice A.	89
Tabela 14: Avaliação em emergia do transporte ferroviário de soja de Rondonópolis, em Mato Grosso, até o porto de Santos. Memorial de cálculo é apresentado no Apêndice B.....	91
Tabela 15: Valor do frete em função das distâncias médias percorridas.....	96
Tabela 16: Resumo dos indicadores por sistema de transporte.....	103

Tabela 17: Definição das metas dos indicadores para cada setor do modelo 5SEnSU aplicado aos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário de soja no Brasil.....	107
Tabela 18: Indicador de sustentabilidade (por setores ISMES e global WSI) no critério igualitário.....	108
Tabela 19: Intervalos de variação dos pesos simulados no MONTE CARLO para visão igualitária.....	109
Tabela 20: Resumo dos indicadores por sistema e suas respectivas metas.....	113
Tabela 21: Impacto de variação do valor da energia do sistema ferroviário sobre o WSI global.....	114
Tabela 22: Impacto de variação do valor do Potencial de Acidificação (PA) do sistema ferroviário sobre o WSI global.....	114
Tabela 23: Impacto de variação do valor da receita do sistema ferroviário sobre o WSI global.....	114
Tabela 24: Impacto da variação do valor do potencial de aquecimento do sistema rodoviário sobre o WSI global.....	115
Tabela 25: Impacto de variação do valor do lucro por empregado do sistema rodoviário sobre o WSI global.....	115
Tabela 26: Impacto de variação do valor do número de empregos do sistema rodoviário sobre o WSI global.....	115
Tabela 27: Impacto de variação do valor do salário pago no sistema rodoviário sobre o WSI global	116
Tabela 28: Impacto de variação da emissão de CO no sistema rodoviário sobre o WSI global.....	116
Tabela 29: Impacto de variação do número de acidentes no sistema rodoviário sobre o WSI global	116
Tabela 30: Ações propostas para melhoria da sustentabilidade global do transporte ferroviário.....	117

Tabela 31: Ações propostas para melhoria da sustentabilidade global do transporte rodoviário.....118

Tabela 32: Estudo comparativo dos procedimentos de avaliação de sustentabilidade de sistemas de produção.....125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Uma maneira popular de representar desenvolvimento sustentável.....	20
Figura 2: Representação da sustentabilidade fraca, intermediária e forte.....	21
Figura 3: Representação do modelo entrada-estado-saída de um sistema econômico	23
Figura 4: modelo dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável.....	23
Figura 5: Reformulação do modelo proposto pela ONU.....	25
Figura 6: The Environmental roots to achieving the post 2015 Sustainable Development Goals (SDGs).....	26
Figura 7: Modelo de integração do mundo material e sociedade humana.....	27
Figura 8: Etapas de análise do ciclo de vida.....	29
Figura 9: Esquema de aplicação dos métodos de avaliação de impacto ambiental e indicadores calculados.....	34
Figura 10: Ciclo PDCA.....	43
Figura 11: Métodos e ferramentas para optar pelo MODM e MADM.....	47
Figura 12: Estágios do procedimento para avaliação de sustentabilidade de sistemas de produção.....	51
Figura 13: Modelo dos cinco setores de sustentabilidade (5SEnSU) representado na simbologia de emergia.....	56
Figura 14: Representação da filosofia da programação por metas aplicado ao modelo 5 SEnSU.....	63
Figura 15: Fluxograma dos estágios do ASUPRO.....	70
Figura 16: Representação esquemática de um framework conceitual para avaliação da sustentabilidade	74
Figura 17: Critérios da metodologia utilizada em procedimentos de sustentabilidade	76

Figura 18: Representação dos trajetos e operações até a região portuária de Santos	79
Figura 19: Diagrama de energia dos sistemas estudados.....	80
Figura 20: Integração dos sistemas de transporte com o modelo 5SEnSU.....	102
Figura 21: Gráfico comparativo dos 10 indicadores do modelo 5SEnSU para os sistemas ferroviário e rodoviário.....	105
Figura 22: Avaliação do desempenho de sustentabilidade dos sistemas rodoviário e ferroviário.....	108
Figura 23: análise de incerteza do WSI para os sistemas ferroviário e rodoviário em relação aos intervalos de pesos.....	110
Figura 24: Gráfico com os diversos pontos do WSI e suas variações de pesos para o sistema ferroviário.....	111
Figura 25: Gráfico com os diversos pontos do WSI e suas variações para os sistema rodoviário.....	111
Figura 26: Avaliação de robustez do procedimento proposto	120
Figura 27: Avaliação de robustez (AIA) Avaliação de impacto ambiental.....	121
Figura 28: Avaliação de robustez (IDH) Índice de desenvolvimento humano.....	122
Figura 29: Avaliação de Robustez (PE) Pegada ecológica.....	122
Figura 30: Avaliação de Robustez (ACV) Avaliação do ciclo de vida.....	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Modelos conceituais de sustentabilidade.....	20
3.2	Métricas e indicadores de sustentabilidade	28
3.2.1	Métricas e indicadores de sustentabilidade para transporte.....	35
3.3	Gerenciamento e tomada de decisão.....	43
3.3.1	PDCA.....	43
3.3.2	Método de análise multicritério.....	45
4	PROPOSTA DO PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DE PRODUÇÃO (ASUPRO).....	51
4.1	Estágio 1 do ASUPRO – Contexto da avaliação.....	52
4.2	Estágio 2 do ASUPRO – Escolha e obtenção dos indicadores.....	55
4.3	Estágio 3 do ASUPRO – Avaliação da sustentabilidade das operações e processos de produção.....	58
4.4	Estágio 4 do ASUPRO – Proposta de melhorias das operações e processos de produção.....	68
4.5	Fluxograma dos estágios do ASUPRO.....	70
4.6	Instrumentos e princípios utilizados em procedimentos de avaliação de sustentabilidade.....	71
5.	APLICAÇÃO DO ASUPRO: TRANSPORTE DE SOJA NO BRASIL COMO ESTUDO DE CASO.....	77
5.1	Estágio 1 – Contextualizando o estudo de caso.....	77
5.2	Estágio 2 – Escolha dos indicadores de sustentabilidade para o estudo de caso	81
5.3	Estágio 3 – Quantificando a sustentabilidade.....	103
5.3.1	Análise de incerteza.....	109
5.4	Estágio 4 - Proposta de melhorias das operações e processos de produção: estudo do transporte da soja.....	113
5.4.1	Análise de sensibilidade do WSI para o sistema ferroviário.....	113

5.4.2	Análise de sensibilidade do WSI para o sistema rodoviário.....	114
5.4.3	Propostas de ações para melhoria da sustentabilidade dos sistemas de transporte de soja baseadas na análise gráfica.....	116
5.4.3.1	Propostas de ações para o sistema de transporte ferroviário com base na análise de sensibilidade.....	117
5.4.3.2	Propostas de ações para o sistema de transporte rodoviário com base na análise de sensibilidade.....	117
6.	DISCUSSÕES.....	119
6.1	Discussão sobre o ASUPRO.....	119
6.2	Discussão sobre a aplicação do procedimento no estudo de caso.....	126
7	CONCLUSÕES.....	128
7.1	Sobre o ASUPRO.....	128
7.2	Sobre o estudo de caso.....	129
8	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
9	REFERÊNCIAS.....	132
10	APÊNDICES.....	143
10.1	Apêndice A. Memorial de cálculo do sistema de transporte rodoviário (Tabela 16).....	143
10.2	Apêndice B. Memorial de cálculo do sistema de transporte ferroviário.....	146
10.3	Apêndice C. Memorial de cálculo do sistema de transporte rodoviário para rota 1 (Tabela 17)	149
10.4	Apêndice D. Conversão da energia de sej/ano para sej/ton.km.....	149
10.5	Apêndice E. Planilha de Cálculo do WSI.....	151

1 INTRODUÇÃO

Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável são conceitos que se tornaram populares a partir do final da década de 1980 em diante, através do Relatório Brundtland, e que continuam sendo um desafio para os formuladores de políticas ambientais e para a comunidade científica (RAMCILOVIC e PÜLZL, 2018). O conceito de sustentabilidade diz que “o desenvolvimento deve ser planejado a fim de atender as necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras proverem as suas próprias necessidades”. Este conceito que relaciona sustentabilidade e desenvolvimento sustentável afirma que a economia deve respeitar os limites do ecossistema. Um dos principais desafios em relação à sustentabilidade é operacionalizar as resoluções do Relatório Brundtland, a fim de orientar as decisões organizacionais.

No meio científico, estudos voltados para classificar a sustentabilidade, mensurar índices de sustentabilidade e propor modelos para escolha de indicadores vêm sendo realizados como forma de atender estes desafios. Daly (1990) descreveu o desenvolvimento da economia humana como um subsistema de um ecossistema global finito que não cresce e que pode deixar de ser sustentável por longos períodos, caso os limites de utilização dos recursos não sejam controlados. O autor propôs classificar a sustentabilidade em fraca, intermediária e forte, como forma de avaliar modelos de sustentabilidade.

Na sustentabilidade fraca, os capitais natural, social e econômico são considerados substitutos, na intermediária, o capital natural pode ser parcialmente substituído pelo capital econômico e, na forte, as atividades econômicas preservam os recursos naturais e promovem o bem-estar social. Entre os modelos propostos pela literatura, pode-se citar o modelo SUMMA (Sustainability Multicriteria Multiscale Assessment), proposto por Ulgiati et al. (2006), que utilizou diferentes métodos na obtenção de indicadores a montante, como análise da energia incorporada e contabilidade em energia, e a jusante, como potencial de aquecimento global e acidificação. Entretanto, este modelo não considerou indicadores relacionados à economia.

Outra proposta para modelo de sustentabilidade foi aprovada pelas Nações Unidas em setembro de 2015, com a criação de 17 objetivos de desenvolvimento

sustentável (SDGs) a serem alcançados pelos estados membros até 2030 e avaliados através de 169 indicadores. Entretanto, alguns autores apresentaram alguns problemas e obstáculos na implementação dos SDGs. Persson et al. (2016) relataram que, em função de uma ampla e extensa agenda, torna-se difícil definir uma forma de implementação e eventual responsabilidade no processo. Wackernagel et al. (2017) relataram que a eficácia dos SDGs pode ser reduzida por não considerar a diminuição do capital natural necessário para movimentar a economia de cada nação, região e cidade. Para os autores, deve-se considerar a preservação do capital natural visando o bem-estar da atual e futura geração.

Giannetti et al. (2015) realizaram estudo para apontar pontos fortes e fracos de indicadores que avaliam a sustentabilidade. Entre eles estavam Energia, Pegada Ecológica, Gross National Happiness, Wellbeing index, Green GDPs, entre outros. Os autores concluíram que se a humanidade está preocupada com o desenvolvimento sustentável do planeta como um todo, então indicadores de progresso medidos apenas em termos sociais são limitados e restritos ao modelo de sustentabilidade fraco ou médio, devendo ser complementados por indicadores biofísicos. A mensuração do uso e a depreciação do capital natural é um grande problema, e os indicadores biofísicos são os únicos que podem ser associados a um modelo de sustentabilidade forte.

Embora tenham sido realizados estudos para avaliação da sustentabilidade apresentando modelos e métodos para escolha e cálculo de indicadores, utilizando avaliação multicritério e com diferentes escalas e métricas, não foi encontrado na literatura um procedimento que reúna estas características e que também permita ao analista comparar a sustentabilidade de sistemas, operações e processos de produção com base em um único índice.

Este trabalho tem o objetivo de propor um procedimento para avaliação da sustentabilidade de operações e processos da produção (ASUPRO), composto de quatro estágios e que reúne estas características utilizando um índice composto denominado índice global de sustentabilidade (WSI). Para isso, indicadores do setor ambiental, social e econômico são escolhidos através de um novo modelo conceitual de sustentabilidade, denominado 5SEnSU (cinco setores da sustentabilidade) que, adicionalmente, podem ser comparados com metas escolhidas pelo analista. A aplicação da programação por metas, utilizada no ASUPRO, permite a realização de

uma análise multicritério com base em pesos atribuídos aos indicadores e seus desvios em relação às metas. O último estágio do ASUPRO, por meio da análise de sensibilidade, dá ao analista a possibilidade de estudar/avaliar a melhoria da sustentabilidade do sistema, tendo como parâmetro a redução do índice global WSI. Para mostrar a aplicação do procedimento, foram escolhidos dois sistemas de transporte de soja da região de Mato Grosso até o porto de Santos, sendo avaliada a sustentabilidade de cada um.

Espera-se que o ASUPRO seja discutido pela comunidade científica e utilizado considerando outros estudos de caso. Espera-se também que as avaliações de sustentabilidade através do ASUPRO passem a ter um padrão de aplicação com justificativas e critérios claramente apresentados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um procedimento para avaliação da sustentabilidade de operações e processos de produção.

2.2 Objetivos específicos

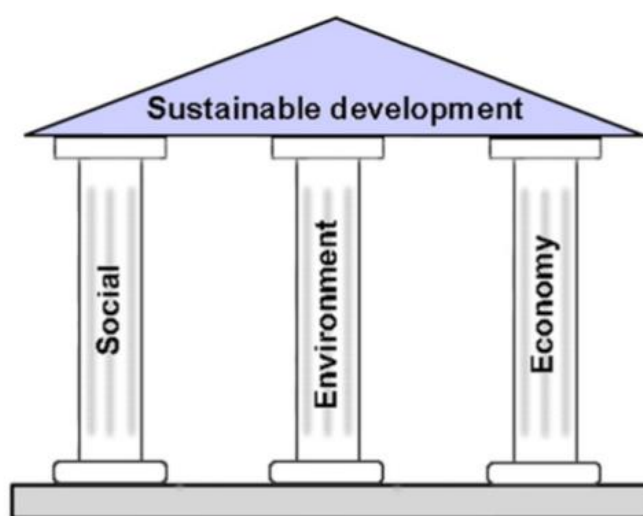
- a) Descrever as etapas do ASUPRO para avaliação da sustentabilidade de operações e processos de produção com base no conceito PDCA (planejar, fazer, checar e agir);
- b) Avaliar a robustez do ASUPRO com base em critérios científicos;
- c) Aplicar o ASUPRO para dois sistemas de transporte de soja via modal ferroviário e rodoviário, avaliando a sustentabilidade de cada um deles;
- d) Apontar indicadores a serem melhorados em cada sistema de transporte e suas respectivas oscilações percentuais, visando maior sustentabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelos conceituais de sustentabilidade

Segundo Heijungs et al. (2010), a definição de desenvolvimento sustentável (SD) estabelece ligações claras com muitas questões de preocupação: pobreza, equidade, qualidade ambiental, segurança, população, controle da população e assim por diante. Em geral, o campo de SD é subdividido em três áreas: econômica, ambiental e social (Figura 1). Estes chamados pilares ou dimensões da sustentabilidade precisam ser abordados na avaliação da sustentabilidade de um projeto ou política ambiental. Os princípios da política ambiental e a responsabilidade corporativa exigem uma análise da sustentabilidade. Assim, a interpretação restrita em que sustentabilidade e SD são restritos ao pilar ecológico é substituída por uma interpretação mais ampla, na qual todos os três pilares estão cobertos.

Figura 1 Uma maneira popular de representar desenvolvimento sustentável



Fonte: Heijungs et al. (2010)

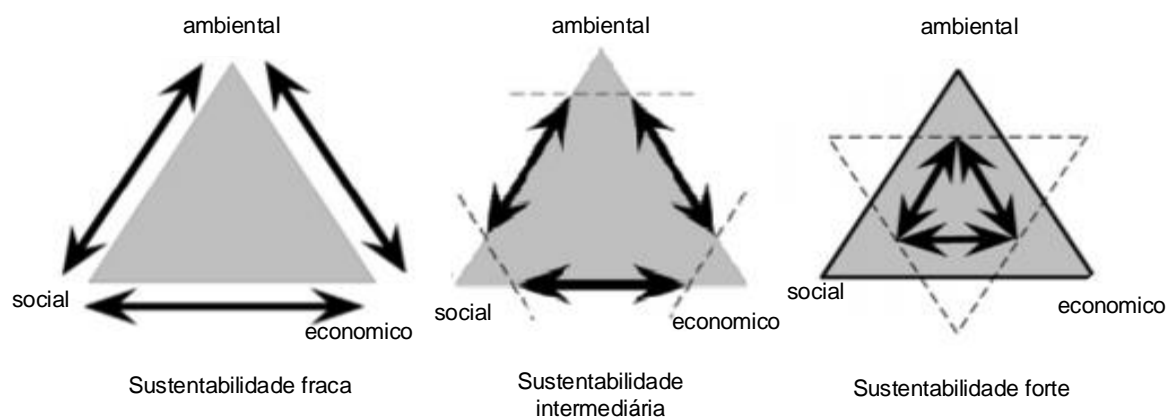
Uma maneira popular de expressar os três pilares da SD é conhecida por Pessoas, Planeta, Lucro (ou PPP ou P3), onde 'pessoas' representa o pilar social, 'planeta', o pilar ambiental, e 'lucro', o pilar econômico.

Diversos modelos conceituais de sustentabilidade vêm sendo aplicados no meio científico ao longo dos últimos anos. Dally (1991) propôs um sistema de

classificação que distinguia três tipos de sustentabilidade: fraca, intermediária e forte (Figura 2). O autor define que em fraca sustentabilidade, os capitais econômico, natural e social são considerados substitutos; em sustentabilidade intermediária, o capital natural pode ser parcialmente substituído pelo capital econômico; em sustentabilidade forte, a atividade econômica preserva os recursos naturais e promove o bem-estar social.

Giannetti et al. (2015) descreveram sustentabilidade fraca como sendo aquela que ocorre através da interação entre sistemas humanos e naturais, utilizando compartimentos separados e ilimitados. Para sustentabilidade fraca a soma de todo o capital (ambiental, econômico e social) é mantida constante, sem diferenciar o tipo de capital. Isso permite que os recursos naturais sejam esgotados, desde que esgotamento seja substituído por aumentos de outras formas de capital. Os autores salientaram que na sustentabilidade intermediária, a soma dos três tipos de capital (ambiental, econômico e social) também é mantida constante, mas a troca entre diferentes tipos de capital deve ser limitada. Na sustentabilidade forte, considera-se que o ambiente contém sistemas humanos e fornece recursos (como minerais e energia) e serviços ambientais (como a dispersão de poluentes). Esses recursos e serviços ambientais são a base do desenvolvimento socioeconômico e da verdadeira prosperidade humana. Os sistemas humanos estão contidos no sistema natural e o capital econômico e social não podem crescer além das limitações intrínsecas.

Figura 2: Representação da sustentabilidade fraca, intermediária e forte



Fonte: Giannetti et al. (2015)

Coscieme et al. (2013) utilizaram um modelo denominado “input-state-output” utilizando três diferentes indicadores, sendo eles a energia para contabilização das

entradas, a eco-exergy para descrição do estado do sistema e os serviços ecossistêmicos para avaliação das saídas do sistema. No modelo de entrada-estado-saída, as relações mútuas entre diferentes indicadores são investigadas, destacando como efetivamente os ecossistemas transformam recursos, se auto organizam por meio de processos e produzem bens e serviços que representem benefícios fundamentais para o nosso bem-estar.

Segundo Coscieme et al. (2013), o uso conjunto de indicadores termodinâmicos e serviços ecossistêmicos parece ser promissor na detecção de propriedades do ecossistema e nas interações com a esfera antrópica. Jørgensen (2008) conecta a estrutura e a organização de descrição de um sistema com uma abordagem do lado do usuário (ecossistema serviços), destacando uma relação entre um indicador biofísico e uma avaliação econômica do meio ambiente.

Esta análise pode ser estendida para investigar outros tipos de sistemas abertos, tais como cidades, sistemas sociais e economias, usando apropriadamente diferentes indicadores. De fato, esses sistemas, embora caracterizados por diferentes dinâmicas, têm muitas semelhanças com as ecológicas: são abertos, usam insumos de energia e matéria e são organizados através de trabalho humano para processar e transformar recursos em bens e serviços.

Bastiononi et al. (2016) utilizaram o modelo entrada-estado-saída para representar as relações entre meio ambiente, sociedade e economia, bem como suas dinâmicas. Três métricas diferentes foram utilizadas: o fluxo de emerggia (Odum, 1996) para entrada, o índice GINI de distribuição de renda como um descritor de estado e o produto interno bruto (PIB) como uma medida de saída produzida pelo sistema econômico (Figura 3). Esta relação, conforme Figura 3, visa ser altamente informativa, para melhor entender as relações complexas entre qualidade e quantidade de energia e recursos utilizados, equidade na distribuição de renda e o valor total da produção econômica.

Figura 3: Representação do modelo entrada-estado-saída de um sistema econômico



Fonte: Bastiononi et al. (2016)

Os esforços dos governos em definir padrões de sustentabilidade, como o ocorrido na Conferência da Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92), geraram resultados positivos. Em setembro de 2015, foi aprovada pela ONU (2017) uma agenda de sustentabilidade a ser implantada até 2030. Um novo framework com 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável foi criado. (Figura 4).

Figura 4: modelo dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável



Fonte: ONU (2017)

Segundo Wackernagel et al. (2017), os indicadores dentro do índice SDG podem ser divididos em três categorias: (1) aqueles que diminuem a dependência de recursos das pessoas (por exemplo, atividades que aumentam a disponibilidade de água, culturas ou energia zero-carbono), (2) aqueles que aumentam a dependência dos recursos das pessoas e (3) aqueles que não aumentam ou diminuem a

dependência de recursos. As duas primeiras são atividades que exigem recursos adicionais de consumo para serem realizadas (por exemplo, atividades que fornecem benefícios, mas precisam ser alimentadas por recursos para funcionar, como hospitais ou escolas). Já a terceira, são atividades que simplesmente organizam a sociedade de forma diferente, no entanto, não protegem recursos nem exigem mais deles (por exemplo, garantir direitos iguais para as mulheres ou aumentar a transparência da tomada de decisão).

Espera-se que os novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e seus alvos – em vigor desde 1º de janeiro de 2016 – orientem as decisões a serem tomadas ao longo dos próximos 15 anos e que influenciem fundamentalmente a política internacional e as finanças disponíveis para o desenvolvimento sustentável, e, assim, moldarão os futuros esforços e a dinâmica do capital natural (Terama et al., 2015). Além disso, espera-se que os governos usem essas metas para combater a pobreza extrema e enfrentar os desafios, que garantirão o desenvolvimento sustentável ambiental, social e econômico em suas respectivas comunidades (Choi et al., 2016).

Embora seja um modelo composto por vários objetivos e que abrange aspectos sociais, ambientais e econômicos, estudos realizados vêm apontando problemas e obstáculos na implementação dos SDGs. Segundo Kumi et al. (2014), os princípios de uma agenda econômica neoliberal, tais como mercantilização, desregulamentação, privatização e vários cortes nos gastos públicos, podem de alguma forma dificultar o desenvolvimento sustentável, aumentando a pobreza e a desigualdade. Kumi et al. (2014) também sugerem que as teorias econômicas do neoliberalismo teriam implicações para os SDGs e que deveriam fazer parte de uma agenda fundamental que ajudaria a orientar a intervenção social, econômica e de desenvolvimento nos próximos 15 anos. Segundo Koehler (2016), no que diz respeito às políticas de desigualdade de gênero, entre outros tipos de desigualdade, os SDGs são modestos e não apresentam consistência. Isto é principalmente devido ao fato de que as propostas políticas sobre gênero e justiça muitas vezes são escassas, graduais e fragmentadas. Sukhdev (2016) propôs uma reformulação do modelo proposto pela ONU (2017), cujos objetivos foram realocados de acordo com seis aspectos envolvendo biosfera, resiliência, acesso igualitário, sociedade, produtividade e economia. Pelo modelo proposto, percebe-se que a sua base contém o planeta e sua capacidade de resiliência estando a sociedade inserida no contexto do planeta e a

economia inserida no contexto da sociedade (Figura 5). Tanto a sociedade quanto a economia dependem dos recursos oriundos da biosfera. Portanto, pela visão de Sukhdev (2016), pode-se concluir que, embora os setores ambiental, social e econômico formem um só sistema, é preciso considerar os impactos causados à biosfera.

Figura 5: Reformulação do modelo proposto pela ONU



Fonte: Sukhdev (2016)

Reid et al. (2017) propuseram uma nova conceitualização dos SDGs: os objetivos são colocados em formato de árvore. Na visão dos autores, a vida abaixo da água e a vida na terra são as raízes de todos os demais objetivos e, portanto, merecem atenção especial (Figura 6). Os autores argumentaram que, apesar de um claro mandato para integrar objetivos sociais, econômicos e ambientais no modelo, a saúde do ecossistema continua sub-representada. Para Reid et al. (2017), manter a saúde do ecossistema (objetivo 14: vida abaixo da água e objetivo 15: vida na terra) é uma pré-condição necessária para atingir a meta de 2030 proposta pela ONU.

Os autores concluíram que abordar problemas ecológicos a partir de uma perspectiva multidisciplinar, em que a saúde do ecossistema é gerida e mantida por si mesma bem como a dos usuários humanos e setores associados, é de vital

importância para a próxima geração de cientistas e profissionais, que serão cobrados com a implementação dos SDGs.

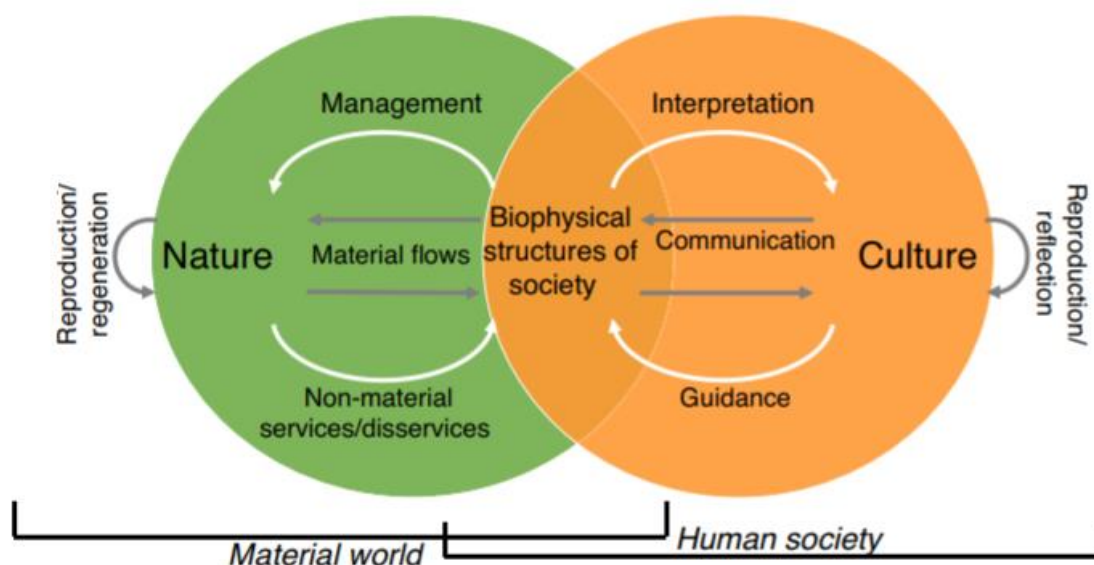
Figura 6: The Environmental roots to achieving the post 2015 Sustainable Development Goals (SDGs)



Fonte: Reid et al. (2017)

A busca em medir o progresso em direção à sustentabilidade por meio dos SDGs resultou em uma proliferação de metas e indicadores alimentados por um conjunto cada vez maior de observações. Esta proliferação acaba prejudicando um dos principais objetivos dos SDGs, que é proporcionar um marco para a coordenação de políticas regulamentais. Para resolver este problema, Reyers et al. (2017) propuseram um processo para identificar os indicadores essenciais dos SDGs (Figura 7).

Figura 7: Modelo de integração do mundo material e sociedade humana



Fonte: Reyers et al. (2017)

Segundo os autores, a natureza e a cultura estão ligadas através do fluxo de efeitos materiais e não-materiais (e feedbacks) que ocorrem entre a natureza e a estrutura biofísica da sociedade. Tais estruturas incluem a população humana, o ambiente construído, bem como outros bens materiais que determinam o acesso a serviços e à distribuição de benefícios e de bem-estar. Esses fluxos são determinados por recursos naturais e por processos sociais, e são moldados pelo sistema cultural de leis, normas, valores, conhecimentos e crenças. As ligações entre o biofísico e o sistema cultural da sociedade são mediados pela "comunicação", isto é, os processos reflexivos de troca de informação, interpretação e compreensão, que pode incluir processos legais, econômicos e monetários.

Como se pode observar por meio dos dois modelos conceituais de sustentabilidade apresentados, a preocupação com a sustentabilidade forte está presente nos modelos propostos por Reid et al. (2017) e por Sukhdev (2016), onde os sistemas econômico e social estão contidos no sistema ambiental. O conceito de sustentabilidade fraca, intermediária e forte avalia o grau de utilização dos recursos da economia provenientes do meio ambiente, bem como seus limites. O modelo entrada-estado-saída proposto por Coscieme et al. (2013) avalia da mesma forma o

grau de utilização dos recursos provenientes da natureza e os produtos gerados e entregues à sociedade.

Em relação aos objetivos de desenvolvimento sustentável (SDGs), observou-se que estudos feitos a posteriori enfatizaram a importância da preservação do meio ambiente. Finalmente, o último modelo apresentado considera a integração da sociedade com o meio ambiente enfatizando a estrutura biofísica utilizada pela sociedade.

Pode-se notar que os modelos analisados consideraram os três pilares da sustentabilidade como sendo as áreas ambiental, social e econômica. Entretanto, notou-se nestes modelos a falta de critérios que auxiliem o analista na escolha apropriada de indicadores considerando a interferência que as áreas ambiental, social e econômica exercem uma sobre as outras.

3.2 Métricas e indicadores de sustentabilidade

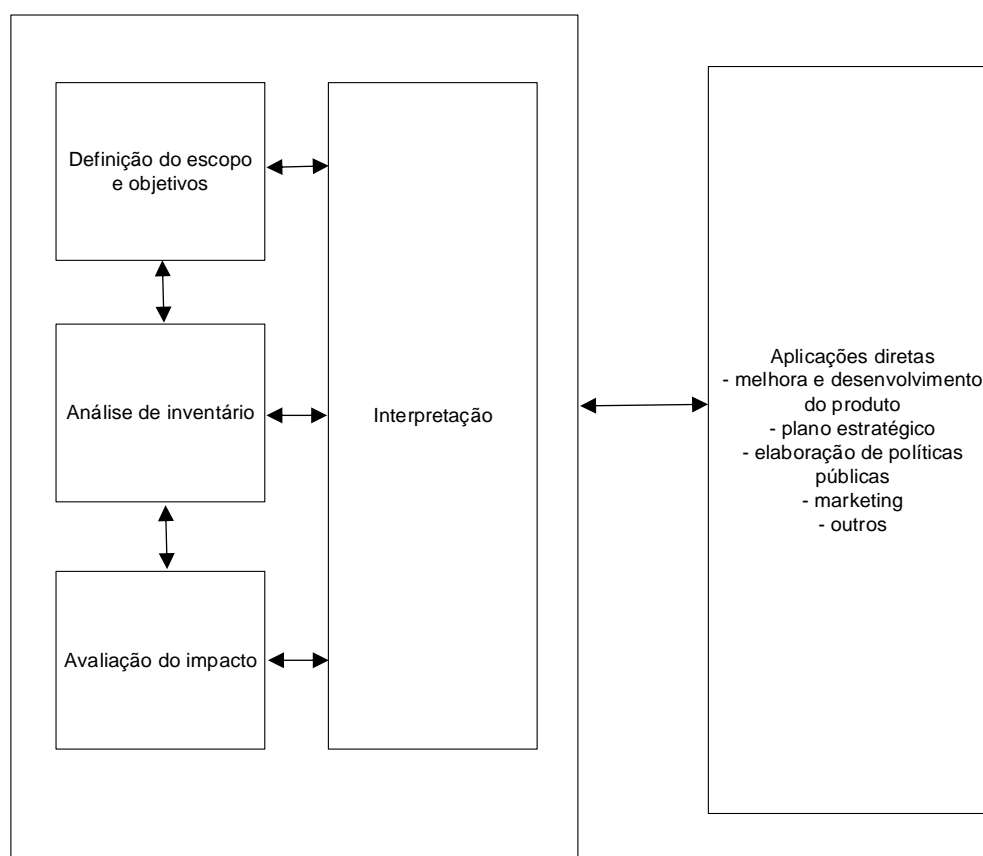
Para medir a sustentabilidade, faz-se necessário métricas e indicadores escolhidos por meio dos modelos propostos. Entre as diversas métricas e indicadores de sustentabilidade, pode-se citar o Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM), o Ecological Rucksack e o Global Reporting Initiative. Para área social, pode-se citar o coeficiente Gini, e, para área econômica, o Gross Domestic Product (GDP).

Entretanto, este estudo buscou avaliar a análise do ciclo de vida, pegada ecológica, emergia, Sustainability Multicriteria Multiscale Assessment (SUMMA), entre as mais usadas.

Segundo Heijungs et al. (2010), o conceito de ciclo de vida aparece em diversas disciplinas e tópicos. Organismos têm um ciclo de vida do nascimento até a morte. Negócios, política e tecnologias também possuem um ciclo de vida. Produtos, ao serem desenhados, gerados e comercializados, representam um ciclo de vida. Uma perspectiva empreendedora, começando com a identificação do mercado por meio dos custos de pesquisa e desenvolvimento e terminando com os custos de distribuição e descarte de resíduos, também representa um ciclo de vida. A ISO (2010) define ciclo de vida como “fases consecutivas e interligadas de um sistema de produtos, desde a aquisição de matérias-primas, fabricação do produto, uso do produto e eliminação”.

Segundo a ISO 14040 (2006), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta para avaliar os potenciais impactos ambientais de um produto ou serviço durante todo o ciclo de vida, isto é, da aquisição de matérias-primas à gestão de resíduos via fase de produção e utilização (Figura 8). A ACV pode ser usada para analisar produtos ou serviços ou para comparar produtos ou serviços que cumprem funções similares. Todos os resultados em uma ACV estão relacionados a uma unidade funcional, que é uma medida quantitativa das funções que o produto ou serviço fornece.

Figura 8: Etapas de análise do ciclo de vida



Fonte: ISO 14040. (2006)

A maneira tradicional de realizar a análise de inventário de uma ACV é analisar cada processo dentro do limite do sistema em relação à unidade funcional e adicionar todas as entradas e saídas juntas. A seguir são descritas cada etapa de uma ACV.

1. Definição do objetivo e do escopo. Esta etapa consiste na descrição do sistema de produto a ser estudado e apresenta o propósito e a extensão do estudo

por meio do estabelecimento de suas fronteiras (HAUSCHILD, 2005). O objetivo do estudo deve especificar a aplicação pretendida e o público alvo a quem serão comunicados os resultados. Nesta fase, é importante definir a unidade funcional, principalmente em estudos comparativos de diferentes produtos, de forma a quantificar o sistema e permitir a determinação de fluxos de referência.

2. Análise de inventário. A fase de inventário constitui uma ferramenta indispensável para a avaliação quantitativa de impactos ambientais. Engloba a coleta de dados e procedimentos de cálculo utilizados na quantificação de fluxos de entrada e saída de matéria e energia para um determinado sistema de produto. Com relação aos cálculos realizados, é importante destacar a importância em se considerar procedimentos de alocação para os processos que produzam mais de uma saída ou para materiais que sejam reciclados.

Segundo Frankl e Rubik (2000), os inventários possibilitam a identificação de limitações ou a necessidade de maiores informações para a avaliação do processo e podem gerar mudanças nos procedimentos de coleta de dados, revisão dos objetivos ou escopo do estudo sendo realizado. A consistência dos dados viabiliza a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

3. Avaliação de impacto. A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) permite avaliar a significância de aspectos ambientais apresentados durante a etapa de inventário e agregar as intervenções em vários ou em um único indicador. Os fluxos elementares do sistema são relacionados aos impactos gerados ao meio ambiente, em nível global, regional ou mesmo local.

4. Interpretação. Esta quarta fase da ACV consiste na avaliação do estudo, de acordo com os objetivos estabelecidos, ou seja, na análise dos resultados e na formulação de conclusões e recomendações para a minimização de impactos ambientais potencialmente gerados pelo sistema (GRAEDEL, 1998). Segundo Frank e Rubik (2000), esta fase envolve um processo iterativo de revisão do escopo da ACV, assim como a natureza e a qualidade dos dados coletados. Aspectos como sensibilidade e incertezas também são avaliados no julgamento de qualidade dos resultados obtidos (HAUSCHILD, 2005).

Bartzas e Komnitsas (2017) realizaram um estudo de avaliação do ciclo de vida sobre o cultivo de pistache na Grécia para avaliar a pegada de uso de energia e os impactos ambientais associados. As principais categorias de impacto avaliadas foram o potencial de acidificação (PA), potencial de eutrofização (PE), potencial de aquecimento global (GWP), potencial de destruição de ozono (PDO), potencial de criação de ozônio (PCO) e demanda acumulada de energia (DAE). Foram comparados três cenários, nomeadamente o Cenário de Base (CB), que envolve práticas atuais de cultivo, o cenário da Green Energy (GE), que envolve o uso de compostos para fertilizantes, e o cenário de Utilização de Resíduos (UR), que envolve a produção de biocarvão a partir de pistache.

De acordo com os resultados da ACV, a produção de 1 tonelada de pistache usando o cenário UR, envolvendo o uso combinado de biocarvão (70%) e fertilizantes químicos (30%), exibiu o melhor desempenho ambiental, em média, com índices 10% menores para a maioria das categorias de impacto, exceto pela demanda acumulada de energia.

A Pegada Ecológica é uma forma de avaliar a conformidade com os dois primeiros princípios identificados por Daly (1990): que as taxas de consumo não devem exceder as taxas de regeneração e que as taxas de emissão de resíduos não devem exceder as capacidades naturais de assimilação dos ecossistemas em que os resíduos são emitidos. É um conceito criado para representar a relação entre o consumo, a exploração e a utilização dos recursos naturais e a capacidade do planeta em repor tais elementos naturalmente. Significa, portanto, a capacidade de o planeta suportar as atividades humanas para garantirmos uma sociedade sustentável, sem comprometer sua disponibilidade para as gerações futuras. Como se trata de um dado, a pegada ecológica mede, em termos quantitativos, os elementos naturais que são necessários para manter o nosso estilo de vida e o da sociedade em geral. Com isso, se o nosso nível de consumo for maior do que aquilo que pode ser repostado pela natureza, significa que estamos vivendo em uma sociedade não sustentável, representando uma ameaça à manutenção da vida no nosso planeta.

Segundo Goldfinger et al. (2014), os resultados para a pegada ecológica (medida de demanda) e para a biocapacidade (medida da capacidade de atender àquela demanda) são expressos em uma unidade padronizada globalmente

comparável, chamada de “hectare global”. Esta unidade representa um hectare de área biologicamente produtiva de terra ou mar com bioprodutividade média mundial em um determinado ano.

A contabilização da Pegada Ecológica não mede por si só a sustentabilidade, mas oferece informações relevantes a ela, ou seja, quanta biocapacidade existe em comparação com o quanto as pessoas a usam. Conhecer essa informação é fundamental para garantir que o caminho de desenvolvimento das sociedades opera dentro dos limites biofísicos do planeta. Sendo um sistema de contabilidade, fornece um panorama instantâneo de onde estamos hoje e onde estivemos no passado, mas não diz para aonde estamos indo, significando que as contas de pegada são mais históricas que preditivas.

Mancini et al. (2018) investigaram o papel da contabilização da Pegada Ecológica como uma abordagem biofísica para medir o valor de serviços ecossistêmicos através de uma unidade equivalente de superfície. Para os autores, esta ferramenta de contabilidade permite acompanhar tanto a demanda humana quanto o suprimento da natureza de um subconjunto preciso de serviços ecossistêmicos, podendo, assim, estabelecer um nível de equilíbrio ecológico do país.

Os autores concluíram que, em comparação com avaliações monetárias caracterizadas por uma maior flexibilidade na análise de várias faixas de serviços ecossistêmicos, a estrutura da Pegada Ecológica está limitada ao rastreamento apenas de um subconjunto de serviços de provisionamento e regulação, aqueles baseados em áreas biologicamente produtivas.

Outra forma de abordagem da sustentabilidade é através do método de contabilidade ambiental em emergia proposto por Odum (1996).

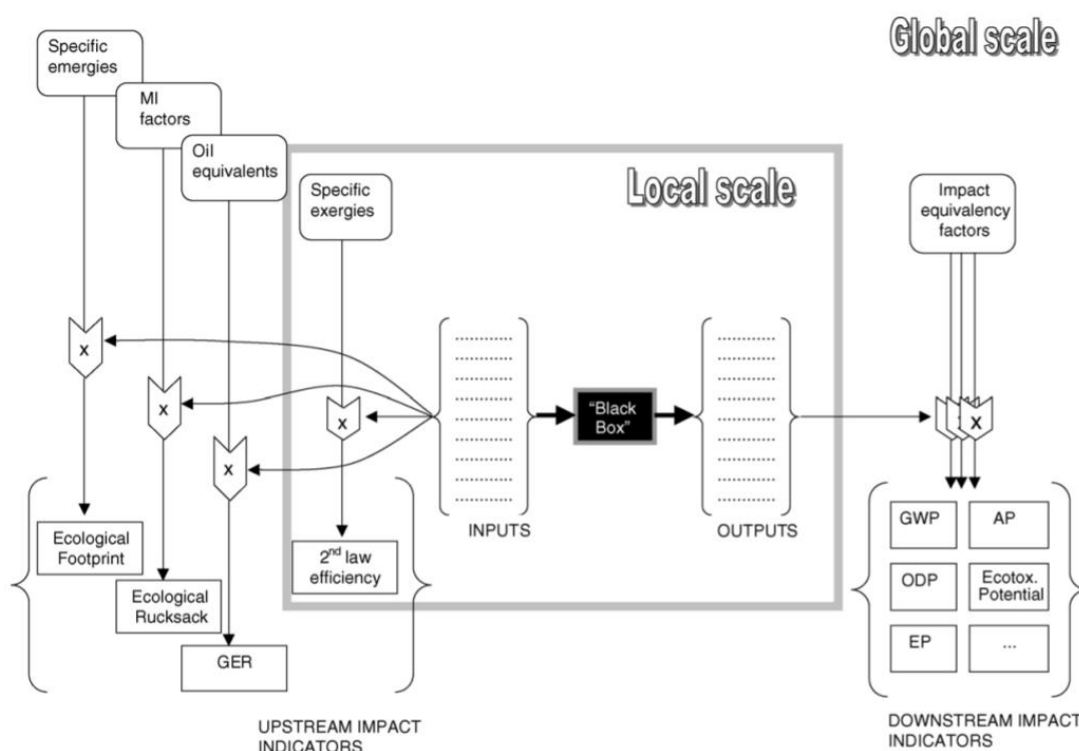
Segundo Amaral et al. (2016), a teoria de emergia foi desenvolvida a partir da percepção do quão importante é a qualidade de energia e como é conveniente usar um denominador comum para diferentes tipos de fluxos de energia. Odum (1996) desenvolveu a ideia de que a energia fornece uma base comum para a integração econômica e para as ciências ecológicas usando linguagem de sistemas de energia para estudar sistemas abertos.

Segundo Odum (1996), emergia é definida como a energia disponível que era anteriormente usada, direta ou indiretamente, para produzir um produto ou serviço e é contabilizada usando uma única unidade de energia. A análise em emergia é uma análise quantitativa que avalia recursos, bens e serviços em unidades comuns de energia solar, sendo medida como emergia solar “sej”. Para a análise em emergia, todas as entradas do sistema (incluindo diferentes tipos de energia e energia inerentes a diferentes materiais e serviços) devem sofrer um processo de conversão em unidades de emergia usando um fator de conversão chamado de transformidade, que é um conceito fundamental na análise em emergia, sendo definida como a emergia solar necessária para fornecer um Joule de um produto ou serviço em Sej/J.

Segundo Amaral et al. (2016), a análise em emergia fornece uma abordagem de ciclo de vida que, em comparação com a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), sintetiza informações e usa uma quantidade menor de dados. Para o autor, a análise em emergia tem a capacidade de avaliar todos recursos, bens e serviços sob uma única unidade de medida. Ao usar esse recurso, é possível preencher a lacuna que existe em vários estudos entre os setores econômico e ambiental sobre visões do mesmo problema. A análise em Emergia tem sido aplicada a todos os tipos de sistemas: seja um país, economia ou soluções de gestão de resíduos.

O modelo proposto por Ulgiati et al. (2006) foi denominado Sustainability Multicriteria Multiscale Assessment (SUMMA) ou Avaliação de Sustentabilidade Multicritério e Multiescala. Os autores escolheram empregar uma seleção de métodos “a montante” e “a jusante” que oferecem pontos de vista complementares sobre a complexa questão da avaliação de impacto ambiental (Figura 9).

Figura 9: Esquema de aplicação dos métodos de avaliação de impacto ambiental e indicadores calculados



Fonte: Ulgiati et al. (2006)

O sistema ou processo analisado é tratado como "Black Box" e um inventário completo de todos os fluxos de entrada e saída são primeiramente executados em escala local. É importante sublinhar que esse inventário forma a base comum para todas as avaliações de impactos subsequentes, que são realizadas em paralelo, garantindo a máxima consistência dos dados de entrada e suposições inerentes.

Cada método de avaliação individual é aplicado de acordo com seu próprio conjunto de regras. Os métodos "a montante" estão preocupados com as entradas e contam o esgotamento dos recursos ambientais, enquanto que os métodos "a jusante" são aplicados às saídas e olham para as consequências ambientais das emissões. Os indicadores de impacto calculados são então interpretados, "a montante" e "a jusante", dentro de um quadro comparativo, em que os resultados de cada método são estabelecidos entre si e contribuem para fornecer uma visão abrangente sobre quais conclusões podem ser tiradas. SUMMA é estruturado de modo a permitir uma análise de sensibilidade consistente de todos os indicadores de impacto calculados,

um procedimento que é de importância crucial para avaliar a variabilidade e confiabilidade dos resultados, mas que raramente é adotado.

Pode-se notar que a análise do ciclo de vida permite avaliar os impactos ambientais considerando as entradas de recursos utilizadas no desenvolvimento do produto, podendo-se rever os processos utilizados e alterar sua forma de produção, tornando-a mais sustentável. A pegada ecológica utiliza as taxas de consumo de recursos naturais e avalia a capacidade de regeneração do meio ambiente em repor os recursos naturalmente. Embora não meça a sustentabilidade, oferece informações relevantes e uma unidade comparável globalmente. A emergia é considerada como indicador completo porque tem a capacidade de avaliar todos os recursos, bens e serviços sob uma única unidade de medida. O modelo SUNMA é considerado um modelo de sustentabilidade forte e permite a utilização de diversos indicadores a montante e a jusante, trabalhando em escala local e global.

Entretanto, notou-se em todas as propostas de avaliação de sustentabilidade a falta de um critério na escolha de indicadores bem como a falta de uma ferramenta de avaliação multicritério, permitindo apontar quais dos indicadores utilizados devem ser trabalhados para o aumento da sustentabilidade.

3.2.1 Métricas e indicadores de sustentabilidade para transporte

De acordo com Zheng et al. (2013), métricas tradicionais de desempenho de transporte tendem a se concentrar na mobilidade do transporte e no congestionamento de veículos e não conseguem levar a resultados sustentáveis. A falta de métricas adequadas muitas vezes não possui informações suficientes para avaliar sustentabilidade como resultado. Para os autores, o que é necessário é uma definição de sustentabilidade que priorize os aspectos ambiental, social e econômico, já que avaliar estes aspectos de forma igualitária torna a quantificação da sustentabilidade difícil de ser avaliada.

Após revisão literária, Zheng et al. (2013) descreveram que a utilização de um índice composto é um método de medição que usa agregação para combinar vários componentes em um único valor facilmente comparado com outros índices.

A maioria dos índices compostos combina indicadores que são medidos usando variáveis que contêm dados em diferentes escalas numéricas. O cálculo do

índice composto envolve a criação de uma escala de índices, incluindo seleção de indicadores, normalização de dados, distribuição de peso e, finalmente, a agregação. Da mesma forma, Zheng et al. (2013) sugeriram a adoção de critérios para escolha dos indicadores mais apropriados.

A intenção de Zheng et al. (2013) foi fornecer um indicador de transporte abrangente e flexível para locais sustentáveis provido de várias escalas espaciais. O indicador denominado de Transportation Index for Sustainable Places (TISP) foi sugerido pelos autores baseado em três domínios.

Para cada elemento da Tabela 1, foram definidos indicadores e variáveis. Os resultados são normalizados por meio da transformação de escala linear a fim de se obter valores absolutos. Zheng et al. (2013) concluíram que a utilização do Analytical Hierarchy Process (AHP) é uma alternativa para equalizar pesos onde experts do transporte são consultados e solicitados para dar pesos aos componentes.

Os indicadores do domínio ambiental escolhidos foram: consumo de energia, consumo de materiais usados na infraestrutura, consumo de materiais usados nos veículos, uso da terra, utilização e perdas do sistema ecológico, emissão de gás, efeito estufa, índice de poluição e geração de resíduos.

Os indicadores do domínio social escolhidos foram: saúde, segurança de tráfego, operacionalidade do governo, envolvimento da comunidade, interação social, igualdade social e acessibilidade.

Os indicadores do domínio econômico escolhidos foram: gastos com transporte, mobilidade, gastos do governo federal em transporte e gasto do PIB em transporte e combustível.

Tabela 1: Domínios ambiental, social e econômico do TSIP (Transportation Index for Sustainable Places)

Elementos do domínio ambiental	Elementos do domínio social	Elementos do domínio econômico
Minimizar o consumo de recursos não renováveis para o transporte.	O sistema de transporte atende às necessidades de acesso de forma consistente com a saúde humana e segurança.	O transporte é acessível para os indivíduos.
O sistema de transporte e sua implantação é projetado para maximizar a eficiência do uso da terra.	Planejamento e gerenciamento do sistema de transporte incorporam diferentes níveis de governo e participação da comunidade.	O sistema de transporte é eficiente para o movimento de bens e pessoas.
Minimizar o impacto e implantação do sistema de transporte em sistemas ecológicos.	O sistema de transporte e sua implantação e operação promovem a interação e a equidade social.	O sistema de transporte é operado sem integração de modais.
Limitar os resíduos relacionados com o transporte e a poluição sonora.	O sistema de transporte satisfaz todas as necessidades básicas de acesso a todos os indivíduos.	O sistema de transporte não contribui para a vulnerabilidade econômica da sociedade.

Fonte: Zheng et al. (2013)

Segundo Dobranskyte-Niskota et al. (2007), o desenvolvimento de indicadores para o transporte desempenha um importante papel no processo de tomada de decisão para o transporte sustentável. Os indicadores representam um fator primordial no destaque de problemas, identificação de tendências, formulação de políticas e de avaliação. Para os autores, as diferenças na escolha dos indicadores são devido às diferentes missões e políticas aplicadas por diferentes organizações reguladoras.

Segundo Varzaneh (2014), a relação de indicadores ambientais que mais aparecem na literatura estão na Tabela 2.

Tabela 2: Relação dos indicadores ambientais de transporte mais usados e suas referências

Indicador ambiental	Frequência	Referência
Emissão de gás efeito estufa	13	Zito e Salvo (2011) Castillo e Pittfield (2010) D'Amico et al. (2012) Dobranskyte-Niskota et al. (2007) Jeon e Amekudzi (2005) Kane (2010) Kolak et al. (2011) Litman (2009) Spiekermann e Wegener (2004) Zegras (2006)
Uso de energia	9	Castillo e Pittfield (2010) Dobranskyte-Niskota et al. (2007) Gilbert et al. (2002) Haghshenas e Vazini (2012) Jeon e Amekuzi (2005) Kane (2010) Litman (2009)
Outros poluentes do ar	9	Castillo e Pittfield (2010) D'Amico et al. (2012) Dobranskyte-Niskota et al. (2007) Haghshenas e Vaziri (2012) Jeon e Amekudzi (2005) Litman (2009) Nicolas et al. (2003) Spiekermann e Wegener (2004)
População exposta ao barulho	8	D'Amico et al. (2012) Dobranskyte- Niskota et al. (2007) Haghshenas e Vaziri (2012) Jeon e Amekudzi (2005) Litman (2009) Nicolas et al. (2003) Spiekermann e Wegener (2004) Zegras (2006)
Consumo de terra/área para transporte	4	Haghshenas e Vaziri (2012) Jeon e Amekudzi (2005) Nicolas et al. (2003) Spiekermann e Wegener (2004)
Quilômetros de viagem por veículo	4	Jeon e Amekudzi (2005) Litman (2009) Zito e Salvo(2011) Nicolas et al. (2003)
Distância das rodovias e ferrovias	2	Jeon e Amekudzi (2005) Gilbert et al. (2002)

Fonte: Varzaneh (2014)

Varzaneh (2014) em seu estudo adotou alguns critérios para escolha dos indicadores ambientais, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Critérios para escolha dos indicadores ambientais

Critério	Descrição	Referência
Relevância	Cada indicador deve abranger a definição e a base teoria da sustentabilidade	Dur et al. (2010)
Representativo e de fácil compreensão	Devem abordar as áreas ambiental, social e econômica	Dur et al. (2010) Li et al. (2009) Spiekermann e Wegener (2004) Zito e Salvo (2010)
Dados disponíveis	Os dados necessários devem estar disponíveis e a um baixo custo	Hagshenas e Vaziri (2012) Zito e Salvo (2011)
Quantificáveis	Devem ser de fácil quantificação	Li et al. (2009)
Fácil entendimento	Indicadores devem ser simples	Hagshenas e Vaziri (2012) Zito e Salvo (2011)
Independentes	Independentes	Hagshenas e vaziri (2012) Li et al. (2009)
Predição	Devem ser usados para avaliar impactos futuros de políticas ambientais	Dur et al. (2010) Spierkermann e Wegener (2004)

Fonte: Varzaneh (2014)

Indicadores sociais são uma parte importante na avaliação da sustentabilidade do transporte. Um sistema de transporte sustentável deve prover acessibilidade para todas as pessoas e também minimizar os perigos à saúde e os riscos de acidente, conforme Castillo et al. (2010). Após pesquisa bibliográfica, Varzaneh (2014) reúne os indicadores sociais mais citados e que estão relacionados à sustentabilidade do transporte, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Relação dos indicadores sociais mais usados e suas referências

Indicador	Frequencia de uso	Referência
Fatalidade	10	Castillo e Pitfield (2010) D'Amico et al. (2012) Gilbert et al. (2002) Haghshenas e Vaziri (2012) Jeon e Amekudzi (2005) Kolak et a. (2011) Litman (2009) Spiekrmann e wegener (2004) Tanguay et al. (2010)
Acessibilidade a lugares e transporte público	8	Castillo e Pitfield (2010) Dur et al. (2010) Haghshenas e Vaziri (2012) Jeon e Amekudzi (2005) Spiekermann e Wegener (2004) Zegras (2006) Dobranskyte-Niskota et al. (2007) Kolak et at. (2011)
Qualidade do transporte para pessoas deficientes, crianças e não motoristas	5	Haghshenas e Vaziri (2012) Dobranskyte-Niskota et al. (2007) Jeon e Amekudzi (2005) Kane (2010) Litman (2009)
Satisfaça dos cidadãos e variedade de opções de transporte	3	Awashti e Chauhanet (2011) Haghshenas e Vaziri (2012) Litman (2009)
Fatalidade e prejuízos resultantes da poluição do ar	3	Dobranskyte-Niskota et al. (2007) Jeon e Amekudzi (2005) Zegras (2006)
Proporção de residentes com serviços públicos de transporte dentro de 500 m	3	D'Amico et al. (2012) Jeon e Amekudzi (2005) Kane (2010)

Fonte: Varzaneh (2014)

Rodrigues et al. (2016) apresentaram, através de uma revisão sistemática da literatura, seguida de uma sistematização de indicadores, um total de 787 indicadores classificados de acordo com as dimensões de sustentabilidade, fases de desenvolvimento do produto e unidades de medida. Os resultados apontam para uma assimetria relevante no número de indicadores propostos para cada dimensão de sustentabilidade, com forte predominância de indicadores econômicos (Tabela 5).

Tabela 5: Número de indicadores chave de acordo com as dimensões do *triple bottom line* por período de tempo

Dimensões	Número de indicadores chave			
	Período 1993-1999	2000-2005	2006-2010	2011-2015
Econômico	127	129	87	241
Social	13	11	15	112
Ambiental				25
Todas as dimensões				16
Econômico e social				7
Social e ambiental				2
Econômico e ambiental				2
Total	140	140	102	405

Fonte: Rodrigues et al. (2016)

Haghshenas e Vaziri (2012) relataram que o transporte tem impactos econômicos, sociais e ambientais duradouros, sendo, desta forma, importantes dimensões da sustentabilidade urbana.

Os autores pesquisaram as categorias de indicadores urbanos obtidos por meio de vários estudos relacionando o número de indicadores e sua frequência. O estudo do transporte urbano global foi realizado em cerca de 100 cidades, localizadas nos Estados Unidos, Europa, Ásia, África e América Latina, através do Banco de dados "Millennium cities database for sustainable Mobility" ou MCDST. Haghshenas e Vaziri (2012) apresentaram os indicadores com frequência superior a 3, separados por categoria ambiental, social e econômica. A Tabela 6 mostra os indicadores que são medidos pela MCDST e aqueles de maior frequência de uso, apontando 9 indicadores.

Tabela 6: Indicadores medidos pela Millennium Cities Database for Sustainable Mobility

Indicadores de impacto do transporte	Frequência de uso	Medida pela MCDST
Indicador de impacto ambiental do transporte		
Emissões de CO,NOX etc. (kg)	12	x
Emissões de gás efeito estufa	12	
Uso per capita de energia para transporte (MJ)	9	x
Consumo de área para infraestrutura de transporte (m2)	9	x
População exposta ao trabalho	9	
Total de consumo de energia renovável per capita/ano	4	
Indicador de impacto econômico do transporte		
Percentual do orçamento familiar alocado para transporte (%)	10	x
Gastos do governo local no transporte (% PIB per capita)	6	x
Tempo total gasto no trânsito (min)	5	x
Indicador de impacto social do transporte		
Fatalidades e acidentes per capita	14	x
Acesso ao transporte público	11	x
Satisfação dos usuários e opções de transporte	4	x
Qualidade do transporte para deficientes, crianças e não motoristas	4	

Fonte: Haghshenas e Vaziri (2012)

Nota-se que as métricas e indicadores de sustentabilidade para transporte adotaram indicadores pertencentes às três dimensões: social, ambiental e econômica. Em relação à dimensão ambiental, houve uma maior incidência de indicadores relacionados com o aumento da produção de gases efeito estufa. Em relação à dimensão social, os indicadores utilizados foram aqueles relacionados com a maior incidência do número de fatalidades. Pode-se também observar que, a partir de 2011, passou-se a utilizar indicadores relacionados a todas as dimensões do *triple bottom line*.

3.3 Gerenciamento e tomada de decisão

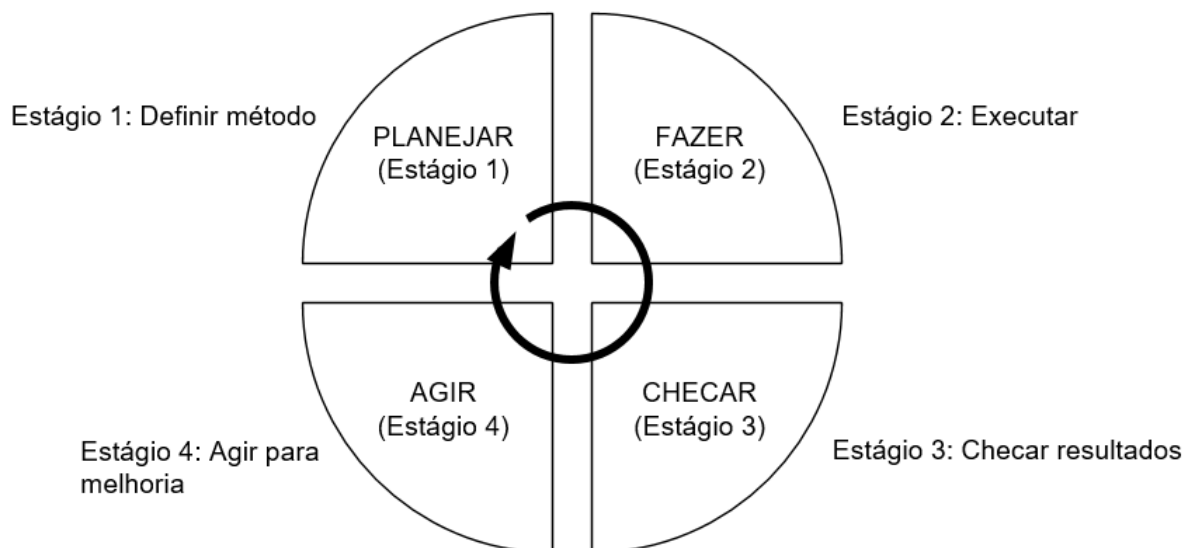
3.3.1 PDCA

O ASUPRO utilizou o conceito PDCA para estruturar seus quatro estágios, sendo uma importante ferramenta na sistematização da avaliação de sustentabilidade de operação e de processos de produção.

O criador do método foi o especialista americano em estatística Walter A. Shewhart. No entanto, foi William Edward Deming que na década de 1950 desenvolveu uma das ferramentas mais conhecidas do mundo. Este método foi implementado com sucesso em empresas japonesas, e mais tarde começou a ser conhecido como o Ciclo de Deming.

A sigla PDCA vem do inglês e significa *plan, do, check and action*, ou planejar, fazer, checar e agir (Figura 10).

Figura 10: Ciclo PDCA



Segundo Maruta (2012), o ciclo PDCA foi inicialmente usado como uma ferramenta para controlar a qualidade dos produtos, mas logo depois foi reconhecido como um método para desenvolver melhorias nos processos organizacionais. O ciclo é caracterizado por seu foco na melhoria contínua ou, em outras palavras, uma busca contínua dos melhores métodos para melhorar produtos e processos. É uma filosofia

de melhoria contínua introduzida na cultura da organização. Essa metodologia induz mudanças graduais, liderando a evolução da empresa.

Segundo Gorenflo e Moran (2010), as fases do PDCA podem ser entendidas da seguinte forma:

- a) Planejar: Nesta fase, oportunidades de melhoria são identificadas e priorizadas. A situação atual do processo é investigada por meio de dados e as causas do problema são determinadas. Possíveis ações para mitigar os problemas são riscados;
- b) Fazer: O objetivo desta etapa é implementar voluntariamente o plano de ação, selecionar e documentar dados, observar os eventos inesperados, lições aprendidas e conhecimento adquirido;
- c) Verificar: Neste ponto, os resultados das ações são analisados. A nova situação é comparada com a antiga, verificando se houve melhorias e se os objetivos foram cumpridos. Para isso, várias ferramentas de suporte a gráficos são usadas;
- d) Ação: Nesta fase, a equipe envolvida desenvolve métodos que irão padronizar a melhoria (se o resultado for alcançado). Em seguida, o procedimento é repetido e novos dados são colhidos, reavaliando a intervenção.

Prashar (2017) adotou a abordagem do processo PDCA para propor um procedimento de gerenciamento de energia para pequenas e médias empresas em busca de uma eficiência energética consistente e uma produção mais limpa. Para validar o procedimento, foi selecionada uma fábrica de papel de pequeno porte. A Etapa I (Planejar) envolveu a criação de funções de gerenciamento de energia com suporte de gerenciamento, auditoria de energia, identificação de oportunidades de economia de energia e desenvolvimento de um plano de ação. O passo II (Fazer) foi sobre a criação de comunicação, sensibilização e motivação antes da implementação do plano de ação. A Etapa III (Verificar) envolveu monitoramentos, análises e relatórios periódicos dos principais indicadores de desempenho de energia e benchmarking do desempenho energético da empresa. A análise do caso mostrou que uma redução de 35% em consumo de energia de um dos sistemas de vácuo da Máquina de Papel pela implementação do gerenciamento das atividades técnicas gerou uma economia de energia anual de 0,3 GJ/t. No passo IV (Ação), foi

desencadeada uma revisão semestral da gestão para explorar oportunidades de economia de energia na empresa.

Reyes et al. (2018) propuseram uma abordagem utilizando o PDCA para implementar e conduzir sistematicamente uma pesquisa sobre a aplicação do mapeamento do fluxo de valor ambiental num processo de laminagem helicoidal de uma empresa multinacional. Os autores concluíram que a utilização do PDCA contribui para melhorar a performance ambiental das operações através da redução do consumo de energia e de resíduos, bem como da redução de calor, necessário para laminação.

Sangpikul (2017) propôs um estudo de caso de uma abordagem de ensino e aprendizagem com o objetivo de melhorar os benefícios de aprendizagem através da implementação de um projeto de serviço acadêmico e do ciclo PDCA em um curso de Marketing de pós-graduação. Através do PDCA, o projeto de serviço acadêmico proporcionou aos alunos uma experiência real de aprendizado e, ao mesmo tempo, reverteu seu papel de provedores de conhecimento (e não de receptores de conhecimento), ao mesmo tempo em que este conhecimento dos alunos contribuiu para as empresas turísticas que os contrataram, melhorando suas estratégias de marketing. As contribuições do PDCA foram o desenvolvimento de um método de ensino e aprendizagem que promoveu novas oportunidades para os alunos aprenderem e ajudarem os outros, e para gerar benefícios de aprendizagem para as empresas e instrutores.

Pode-se observar que os estudos utilizando a abordagem PDCA permitem uma melhor estruturação de processos e estágios, possibilitando não só o planejamento, execução e checagem dos resultados, como também a identificação de ações que podem ser aplicadas no processo de planejamento e que visam a melhoria contínua.

3.3.2 Método de análise multicritério

O ASUPRO trabalha com diferentes indicadores sujeitos a diferentes metas. Alguns indicadores precisam ser maximizados, enquanto que outros precisam ser minimizados conforme a intenção do decisor. Para resolver este problema, é proposto um método de análise multicritério.

Segundo Kumar et al. (2017), a análise de decisão multicritério é uma ferramenta valiosa na resolução de problemas caracterizada por múltiplos atores, critérios e objetivos. Os problemas avaliados pelo *multicriteria decision making* (MCDM) são: objetivo, preferências do tomador de decisão, alternativas, critérios e resultados. A análise MCDM pode adotar três tipos de modelos. O primeiro modelo é denominado Multiobjective Decision Making (MODM), o segundo, Multiattribute Decision Making (MADM) e o terceiro, uma combinação de MODM e MADM. Com base no número de alternativas em consideração, as diferenças podem ser atendidas entre MADM e a MODM.

A análise MODM é adequada para a avaliação de alternativas contínuas para as quais antecipam-se restrições na forma de vetores de variáveis de decisão. Um conjunto de funções objetivas é otimizado considerando as restrições ao desagregar o desempenho de um ou mais objetivos.

Na análise MADM, as características que são inerentes a ela são abordadas levando em consideração um número menor de alternativas e, portanto, a priorização se torna mais difícil.

Os modelos MCDM são desenvolvidos de acordo com a perspectiva do decisor, podendo ter uma abordagem direta ou indireta. Na abordagem direta, a atribuição de prioridades ou pesos é feita em função das entradas oriundas de um sistema, sociedade ou do conhecimento da pesquisa. Em um método indireto, todos os critérios possíveis são separados em componentes e pesos e são atribuídos em problemas similares prévios, julgamentos de decisões baseados em experiência etc.

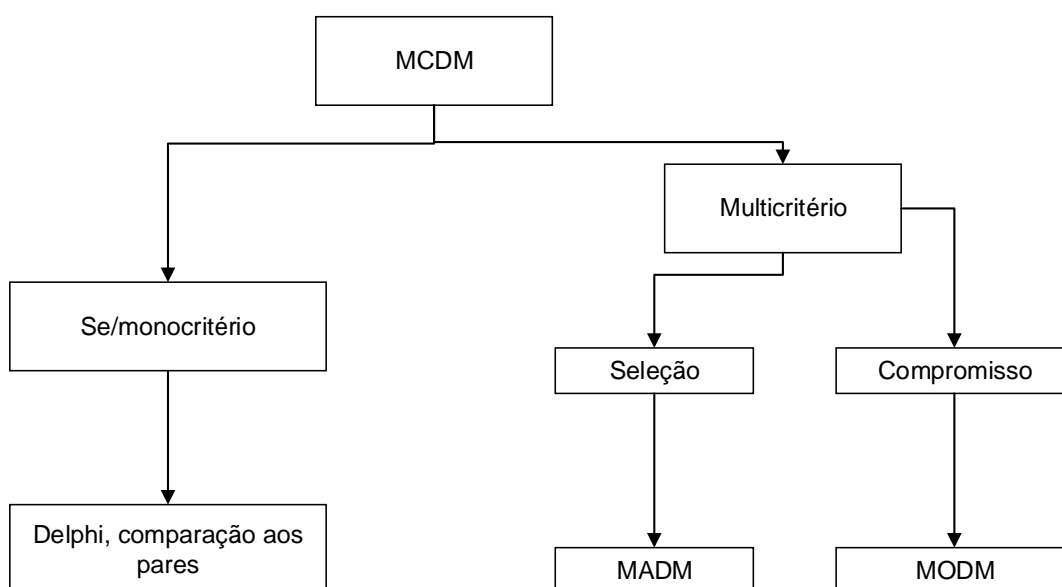
Segundo Kumar et al. (2017), os métodos de análise multicritério são sempre complexos devido ao envolvimento de fatores, incluindo técnicas institucionais, padrões sociais, econômicos e partes interessadas. Os modelos também envolvem engenharia e nível gerencial de análise.

Um procedimento pode permanecer controverso porque os objetivos podem levar a diferentes soluções em diferentes momentos, com base na prioridade estabelecida pelos tomadores de decisão ou em pessoas envolvidas no procedimento. Deve ser entendido que o método escolhido para tomar uma decisão não é apenas uma questão de preferência, mas pode afetar diretamente o resultado e pode dar-lhe outro completamente diferente. Não há um método único e certo para cada situação, mas há um ponto de partida certo.

Para Kumar et al. (2017), a escolha de um método de decisão depende do tipo de decisão que o decisor esteja tomando. A maioria das decisões são "se" ou "quais". A primeira é chamada de decisão não comparativa porque não requer comparação com problemas semelhantes, e o resultado não afeta diretamente qualquer outro problema.

A segunda é chamada de decisão comparativa porque cada resultado deve ser comparado com todos os outros para decidir "qual" deles é a escolha certa. A Figura 11 mostra a relação dos métodos e ferramentas adotadas para se optar por MADM ou MODM.

Figura 11: Métodos e ferramentas para optar pelo MODM e MADM



Fonte: Kumar et al. (2017)

Os principais métodos empregados para MCDM são os seguintes: MAUT (Multi-Attribute Utility Theory), de difícil aplicação prática, devido ao seu rigor quanto à fundamentação teórica; Análise Hierárquica de Processo (Analytic Hierarchy Process, AHP) (SAATY, 1980; SAATY, 2001), de utilização largamente disseminada; Análise em Redes (Analytic Network Process, ANP) (SAATY, 2001); abordagem de Decisão Nebulosa (LIANG; WANG, 1991); e TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), proposto por Hwang e Yoon (1981).

Além disso, neste contexto, diversos métodos de origem europeia, tais como o MCDA (Multi-Criteria Decision Aid), dos quais se destacam o ELECTRE (Élimination

et Choix Traduisant la Realité), o PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), o MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), proposto por Bana e Costa et al. (1994), o GP(Goal Programming), proposto por Charnes e Cooper (1961), e o GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) – todos eles têm sido explorados por pesquisadores.

Em relação ao outro ramo da análise multicritério, a literatura apresenta a programação por metas, que é um ramo de otimização multiobjetivo, também conhecido como critérios múltiplos para tomada de decisão (MCDM).

Em Programação Linear, somente um objetivo é incorporado à função objetiva para ser otimizado (maximizado ou minimizado). Se houver mais de um, este ou estes vão ser tomados como restrições do problema e são totalmente desvinculados da função objetiva. O resultado obtido, então, satisfará inteiramente todas as restrições do problema e otimizará sua função objetiva.

A programação por meta é capaz de abordar problemas de decisão que tratam como simples um objetivo com múltiplos subobjetivos, bem como problemas com múltiplos objetivos com múltiplos subobjetivos, sendo um programa de otimização.

A maioria dos problemas do mundo real são formulados em metodologia de programação linear objetiva. Segundo Tamiz et al. (1998), pesquisadores e profissionais estão cada vez mais conscientes da presença de múltiplos critérios em problemas reais de gestão e decisão. Tzeng e Chen (1999) definem análise multicritério como um meio para resolver problemas de decisão que envolvem múltiplos objetivos, às vezes conflitantes.

A programação por meta, que é uma extensão de programação linear e é uma ramificação da análise multicritério, é comumente aplicada para lidar com os problemas multiobjetivos. Charnes e Cooper (1961) descrevem que análise multicritério é usada para derivar um conjunto de objetivos de conflito o mais próximo possível.

Basicamente, as estruturas de programação por meta e programação linear são as mesmas. O conceito de programação por meta é introduzir variáveis auxiliares adicionais, chamados desvios, que não atuam como "decisor", mas "facilitador" para formular o modelo.

Esses desvios representam a distância entre a aspiração de objetivos (valores-alvo) e os resultados realizados. São considerados dois tipos de desvios que podem

ser representados como subavaliação do objetivo por desvio negativo (d-) e superação do objetivo por desvio positivo (d+). Cada objetivo é expresso como uma equação linear com desvio (s). Ao contrário da programação linear, que otimiza diretamente os objetivos, a programação por meta tenta minimizar os desvios indesejados entre o nível de aspiração do objetivo e a melhor solução.

O modelo de programação por meta consiste em dois conjuntos de restrições, isto é, restrições do sistema e restrições de objetivo. As restrições do sistema são formuladas seguindo o conceito de programação linear, enquanto que as restrições de metas são tomadas como restrições auxiliares que determinam a melhor solução possível em relação a um conjunto de metas desejadas.

A programação por meta é usada para realizar três tipos de análises:

- 1) Determinar os recursos necessários para alcançar o conjunto desejado de objetivos;
- 2) Determinar o grau de realização dos objetivos com os recursos disponíveis;
- 3) Fornecer a melhor solução satisfatória sob uma quantidade variável de recursos e prioridades dos objetivos.

Em função dos métodos de análise multicritério apresentados no item anterior, optou-se por adotar no procedimento proposto neste trabalho a programação por metas. Como a sustentabilidade engloba aspectos ambientais, sociais e econômicos, muitas vezes os objetivos podem ser distintos, bem como as possíveis alternativas. Sendo assim, a programação por metas, que permite trabalhar com conjuntos de restrições e que permite estabelecer a alternativa mais adequada, demonstra ser adequada para o uso de avaliação de sustentabilidade de sistemas de produção.

Conforme se verifica em Tamiz et al. (1995, 1998), Yaghoobi e Tamiz (2007), Chang (2007, 2008), Jamalnia e Soukhakian (2009), Umarusman (2013), os principais modelos de programação por metas são:

- Programação por Metas ponderada (Weighted Goal Programming – WGP): foi a primeira proposta desenvolvida, em que se atribuem pesos para os desvios das variáveis (para mais ou para menos) com relação às metas estabelecidas para os objetivos;
- Programação por Metas com priorização (Lexicographic Goal Programming – LGP): também conhecida por Preemptive Goal Programming: nela, os objetivos são ordenados de acordo com a sua importância, a partir de uma priorização (hierarquização) feita pelos decisores a priori;

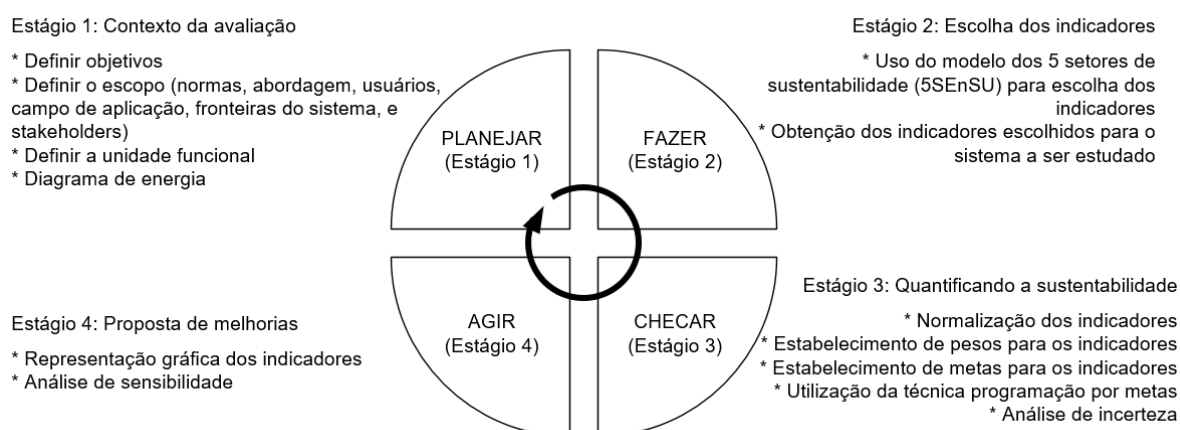
- Programação por Metas Minmax (Minmax Goal Programming – Minmax GP): aqui se trabalha com as funções de realização que consideram a soma das variáveis desvio;
- Programação por Metas estendida (Extended Goal Programming – EGP): é uma combinação convexa da WGP, da LGP e da Minmax GP;
- Programação por Metas inteira (Integer Goal Programming – IGP): há a atribuição de funções de penalidade;
- Programação por Metas binária (Binary Goal Programming – BGP): há variáveis inteiras binárias associadas à realização ou não das metas estabelecidas para os objetivos;
- Programação por Metas e Análise por Envoltória de dados (Goal Programming and Data Envelopment Analysis – GPDEA): desenvolvida para, nas aplicações da DEA, melhorar a discriminação de Unidades Tomadoras de Decisão (Decision Making Units – DMUs) quando o número de DMUs é inferior ao número total de variáveis de entrada e saída do modelo.

Destaca-se que, conforme Yaghoobi e Tamiz (2007), Romero (2004), Jamalnia e Soukhakian (2009), e Caballero et al. (2009), os três tipos de modelos de GP determinística mais utilizados por pesquisadores (desenvolvimentos teóricos) e tomadores de decisão (aplicações reais) são: Modelos WGP, LGP e Minmax GP.

4 PROPOSTA DO PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DE PRODUÇÃO (ASUPRO)

Como forma de atender aos objetivos geral e específico deste estudo, foi elaborado um PDCA do ASUPRO (Figura 12) e, posteriormente, um PDCA aplicado ao sistema estudado. Para aplicação do procedimento é exigido no mínimo dois sistemas a serem avaliados e comparados.

Figura 12: Estágios do procedimento para avaliação de sustentabilidade de sistemas de produção



4.1 Estágio 1 do ASUPRO – Contexto da avaliação

O estágio 1 do ASUPRO tomou como referência as normas adotadas para a análise do ciclo de vida (ACV). O objetivo e escopo devem ser consistentes com a aplicação pretendida e devem ser claramente definidos; deve-se declarar inequivocamente a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, isto é, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo.

Na definição do escopo do estágio 1, devem ser considerados e claramente descritos os seguintes itens: as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas; a unidade funcional; o sistema de produto a ser estudado; as fronteiras do sistema de produto; procedimentos de alocação; tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada; requisitos dos dados; suposições; limitações; requisitos da qualidade dos dados iniciais; tipo de análise crítica, se aplicável; e tipo e formato do relatório requerido para o estudo. Convém que o escopo seja suficientemente bem definido para assegurar que a extensão, a profundidade e o grau de detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo estabelecido.

Em relação à abordagem realizando estudos comparativos, a equivalência dos sistemas que são comparados deve ser avaliada antes da interpretação dos resultados. Sistemas devem ser comparados usando a mesma unidade funcional e considerações metodológicas equivalentes, como desempenho, fronteiras dos sistemas, qualidade dos dados, procedimentos de alocação, regras de decisão na avaliação de entradas e saídas e avaliação de impactos. Quaisquer diferenças entre sistemas com respeito a estes parâmetros devem ser identificadas e relatadas.

As fronteiras do sistema determinam quais unidades do processo devem ser incluídas no procedimento. Vários fatores determinam as fronteiras do sistema, inclusive a aplicação pretendida do estudo, as suposições feitas, os critérios de corte, restrições de dados e custo e o público-alvo pretendido.



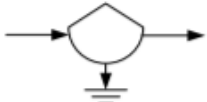

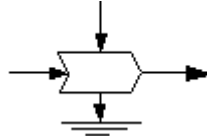
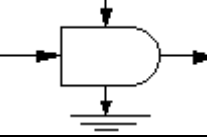
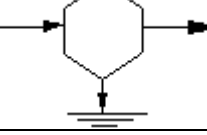
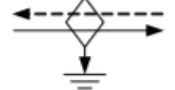
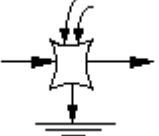

A seleção de entradas e saídas, o nível de agregação numa categoria de dados e a modelagem do sistema devem ser consistentes com o objetivo do estudo. Convém que o sistema seja modelado de tal modo que as entradas e saídas nas suas fronteiras sejam fluxos elementares. Os critérios usados no estabelecimento das fronteiras do sistema devem ser identificados e justificados no escopo do estudo.

A próxima etapa do estágio 1 do ASUPRO é a definição da unidade funcional. Segundo Goldstein et al. (2013), a unidade funcional é a base da comparação para dois sistemas de produção, seja para produtos ou para serviços fornecidos. De acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006), a unidade funcional é um “desempenho quantificado de um sistema de produção para uso como unidade de referência”.

O propósito primário de uma unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. A partir do seu uso, é possível adotar uma gestão ambiental através da aplicação de uma política ambiental, planejamento ambiental, implementação e operação, verificação e ações corretivas e, finalmente, uma revisão da gestão. A unidade funcional relacionada deve ser definida e mensurável. Na última etapa do estágio 1 deste procedimento, deve-se elaborar um diagrama de energia utilizando os conceitos e símbolos propostos por Odum (1996).

Segundo o autor, o diagrama de energia é fundamental para o analista entender o que está estudando e para o leitor rapidamente visualizar o sistema estudado. Trata-se de um modelo conceitual da realidade, neste caso, o modelo estudado. O diagrama indica os fluxos que compõem o sistema estudado, sejam eles de recursos naturais renováveis (R), recursos não renováveis (N) ou de recursos provenientes da economia (F). O diagrama também apresenta as interações do processo e suas saídas. Para auxiliar nessa tarefa, Odum (1996) desenvolveu símbolos com diferentes significados para serem utilizados na elaboração de diagramas de energia (Tabela 7).

Tabela 7: Símbolos utilizados na elaboração de diagramas de energia

Símbolo	Significado
	Fluxo de energia: um fluxo cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à qualidade da fonte que o produz.
	Fonte: fonte de energia externa.
	Depósito: uma reserva energética dentro do sistema, que guarda uma quantidade de energia de acordo com o balanço de entrada e saída.
	Sumidouro de energia: dispersão de energia potencial empregada no sistema. A energia potencial é utilizada para produzir trabalho e o custo dessa transformação é a degradação da energia, a qual deixa o sistema como energia de baixa intensidade (2ª Lei da Termodinâmica).
	Interação: intersecção de dois fluxos para produzir uma saída em proporção a uma função de ambos ou controle de ação de um fluxo sobre outro.
	Produtor: unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade (baixa intensidade) em energia com qualidade superior.
	Consumidor: unidade que transforma a qualidade da energia, armazena e a retroalimenta em relação à etapa anterior (sistema autocatalítico), para melhorar o fluxo de energia que recebe.
	Transação: uma unidade que indica a venda de bens ou serviços (linha contínua) em troca de um pagamento em dinheiro (linha tracejada).
	Interruptores: processo que inicia e termina, que não é constante.
	Caixa: símbolo para definir os limites de um sistema e subsistemas.

Fonte: Adaptado de Odum (1996)

4.2 Estágio 2 do ASUPRO – Escolha e obtenção dos indicadores

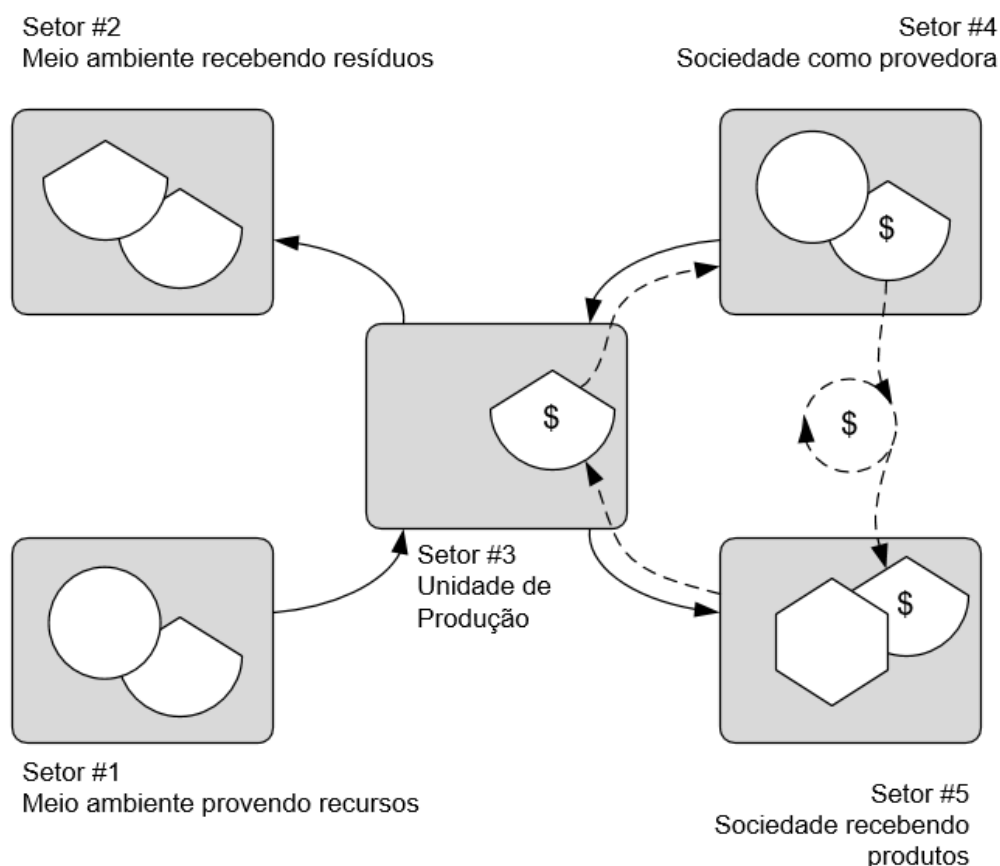
A escolha dos indicadores no estágio 2 do ASUPRO foi feita com base no modelo 5SEnSU, por ser um modelo de sustentabilidade conceitual intermediário. Segundo Bossel (1999), a escolha dos indicadores para avaliação de sistemas é um processo complexo, já que o número de indicadores deve ser o mínimo possível, mas tantos quanto forem necessários. Bonisoli et al. (2018) estudaram diversos autores e chegaram a oito critérios para a escolha dos indicadores, sendo eles: disponibilidade de dados, relevância, válidos analiticamente, flexível para mudanças, mensuráveis, relevantes para políticas, implementável e de fácil entendimento. Para facilitar na escolha de indicadores, o método Delphi pode ser usado. Segundo Linstone e Turoff (1975), o método pode ser caracterizado como uma estruturação de um processo de comunicação em grupo, para que, agindo como um todo, possa lidar com um problema complexo. O método é usado para desenvolver o consenso do grupo sobre a relativa importância de determinada questão.

Segundo Giannetti et al. (under review), o modelo 5SEnSU baseia-se nos três axiomas básicos propostos por Daly (1990) sobre os limites dos recursos naturais em relação aos ritmos que são explorados e consumidos esses recursos. Para garantir o ritmo atual de desenvolvimento sustentável, outros três axiomas foram adicionados pelos autores do modelo:

- Deve haver um equilíbrio entre o meio ambiente como fornecedor de recursos (setor 1) e como destinatário de resíduos e poluentes (setor 2), com boas práticas de produção limpa e cuidados ambientais e conservação prevaletentes;
- A produção de bens e serviços deve limitar-se às restrições impostas pela exploração sustentável dos recursos naturais e pelo consumo responsável da sociedade, o que garante sua sustentabilidade (setor 3);
- Para o homem como um ser social, seu relacionamento deve ser como um fornecedor de mão de obra (setor 4) e receptor de produtos e serviços do setor econômico (setor 5).

A Figura 13 mostra uma representação geral do Modelo dos Cinco Setores e sua relação com as dimensões clássicas do modelo de sustentabilidade representada usando a simbologia utilizada para o diagrama de energia proposto por Odum (1996).

Figura 13: Modelo dos cinco setores de sustentabilidade (5SEnSU) representado na simbologia de energia



Fonte: Giannetti et al. (under review)

Segundo Giannetti et al. (under review), este modelo atribui ao ambiente a função de um fornecedor, bem como de um receptor. O ambiente no setor 1 tem uma função de origem, fornecendo matérias-primas em geral para suportar as funções da unidade de produção (setor 3). O ambiente no setor 2 tem uma função de sumidouro, sendo o receptor dos resíduos e emissões gerados pelas atividades da unidade de produção. O mesmo acontece com a sociedade, que detém as funções de fornecedor e consumidor. A sociedade do setor 4 fornece recursos socioeconômicos para a unidade de produção, como mão de obra, conhecimento e know-how, e recebe dinheiro para isso. A unidade de produção do setor 5, por outro lado, fornece produtos

que serão consumidos pela sociedade, que paga por eles ou situações que podem afetar o bem-estar do ser humano, como emissões de gases poluentes ou acidentes de trabalho.

Vale a pena notar que o dinheiro circula apenas no lado direito do diagrama em atividades que são conduzidas por seres humanos, enquanto que as trocas no lado esquerdo do diagrama contemplam apenas fluxos de materiais. Em outras palavras, os recursos fornecidos pelo ambiente são vistos como “recursos livres”, já que ninguém “pagou” por isso. O mesmo acontece com os resíduos liberados para o meio ambiente. Não há um pagamento feito pela unidade de produção ao meio ambiente como contrapartida dos serviços de diluição e decomposição, por exemplo.

Com base no modelo 5SEnSU, é feita pelo analista a escolha dos indicadores que estão de acordo com os significados dos 5 setores.

Para o setor 1, pode-se optar pela contabilidade em energia desenvolvida por Odum (1996). O indicador energia é sugerido como indicador por representar os recursos renováveis e não renováveis utilizados no processo de transformação e produção de bens e serviços. Este método leva em conta o trabalho realizado pela natureza para gerar serviços ecossistêmicos, expressando todos os recursos em uma base comum, o que permite uma comparação entre sistemas. Energia é uma expressão da energia disponível consumida, direta e indiretamente para produzir algo, expresso em unidades de energia da mesma forma, geralmente energia solar. As unidades são em joules solares (sej).

Para o setor 2, os indicadores utilizados devem refletir o que o sistema em estudo devolve para natureza em forma de resíduos de qualquer natureza. Um indicador que pode facilmente expressar esta análise é a emissão de gases poluentes provenientes da combustão de motores ou indústrias.

Para o setor 3, a coleta dos indicadores leva em consideração uma cadeia produtiva de um bem final, como, por exemplo, o sistema de transporte. Um indicador que pode expressar esta análise é a receita obtida pelo transporte.

Para o setor 4, a coleta dos indicadores deve levar em consideração os recursos oriundos da sociedade expressa, na maioria das vezes, em horas de trabalho aplicadas ao sistema, tendo sua relação com a quantidade de funcionários empregados. Este indicador pode ser apresentado de forma monetária, também sendo representado pelo salário pago aos trabalhadores.

Para o setor 5, a coleta dos indicadores deve considerar o que o sistema devolve para a sociedade. Neste caso, pode-se adotar como indicador emissões nocivas aos seres humanos, representado pela emissão de CO e também pelo número de acidentes causados.

Uma vez escolhidos os indicadores, deve-se converter todos os resultados em uma única unidade funcional, de espaço e tempo (definida anteriormente no estágio 1), que permita estabelecer uma comparação.

4.3 Estágio 3 do ASUPRO – Avaliação da sustentabilidade das operações e processos de produção

No estágio 3, a primeira etapa é a normalização dos indicadores e sua representação por meio de um gráfico radar.

Ulgati et al. (2011) propuseram três diferentes procedimentos de normalização que podem ser aplicados dependendo do caso a ser investigado. São eles:

- a) normalização baseada no escore padrão: cada valor individual é subtraído pela média aritmética e dividido pelo desvio padrão;
- b) normalização com referência ao impacto total gerado: para cada indicador I_j , o impacto total é calculado adicionando-se os valores em todos os conjuntos de dados, então, o valor do indicador I_j para um determinado conjunto de dados é dividido pelo impacto total I_j para calcular sua fração ou porcentagem;
- c) normalização com referência ao primeiro ano de investigação: todos os valores são divididos pelo valor do primeiro ano de investigação.

Neste estudo, foi adotada a normalização com referência ao impacto total gerado. Entretanto, os indicadores que se desejam minimizar têm seus resultados invertidos, ou seja, $1/\text{valor do indicador}$. Para identificar qual dos sistemas é o mais sustentável, deve-se observar aquele que apresenta a maior área. Entretanto, para escolha da maior área, os indicadores que se desejam minimizar devem ter seus resultados invertidos para que os números apresentados graficamente sejam alocados no gráfico em uma mesma escala crescente do centro para extremidade. Esta primeira análise permite identificar de forma visual o melhor sistema de produção. No entanto, para áreas muito semelhantes ou mesmo avaliando diversos sistemas ao mesmo tempo, torna-se difícil estabelecer e apontar o sistema com maior desempenho em sustentabilidade.

Para resolver este eventual problema, é proposta a segunda etapa do estágio 3, que inicia com a atribuição de pesos aos desvios dos indicadores. Estes pesos são atribuídos conforme os critérios apresentados na Tabela 12, que será explicada mais adiante.

O procedimento utiliza dois indicadores para avaliar o nível de sustentabilidade. O primeiro, chamado indicador de sustentabilidade meta por setor (ISMES), considera N_{ijk}^+ ; N_{ijk}^- como variáveis de desvio negativas do indicador positivo e negativo, respectivamente, P_{ijk}^+ ; P_{ijk}^- como variáveis de desvio positiva do indicador positivo e negativo, respectivamente, e G_{jk}^+ ; G_{jk}^- como valores da meta para o indicador positivo ou negativo, respectivamente. Também considera W_{jk}^+ e W_{jk}^- , que são os valores ponderados ou “pesos” para cada indicador. Quanto menor for o valor do ISMES, cujo cálculo será explicado a seguir, melhor é o desempenho daquele indicador ou indicadores pertencentes aos setores ambiental, social e econômico.

O segundo indicador, denominado indicador de sustentabilidade global do sistema (WSI), é o somatório de todos os indicadores ISMES. Como o WSI considera os desvios relativos às metas e seus respectivos pesos, quanto menor for o seu valor, maior será a sustentabilidade do sistema estudado, permitindo-se, desta forma, um comparativo dos resultados.

A etapa seguinte do estágio 3, portanto, é o cálculo dos indicadores de sustentabilidade meta por setor (ISMES) e, por último, o cálculo do indicador de sustentabilidade global (WSI). Para verificar a influência dos pesos sobre o resultado final do WSI, é realizada a análise de incerteza. A análise de sensibilidade dos indicadores utilizada no procedimento permite identificar quais indicadores exercem maior impacto sobre o desempenho do sistema de produção estudado.

De acordo com ESI (2005), diferentes métodos para determinação de pesos têm sido desenvolvidos, incluindo ferramentas estatísticas e opiniões de especialistas baseadas em julgamento próprio. Segundo Oliveira et al. (2016), pesos determinados estatisticamente têm a vantagem de serem considerados neutros. Entretanto, pesos estatísticos nem sempre refletem as prioridades dos analistas. Para Oliveira et al. (2016), a ponderação de pesos pode ser feita de três diferentes formas: (i) pelos valores assumidos pelo analista de acordo com sua experiência sobre o tema; (ii) através de uma abordagem junto à comunidade especializada utilizando métodos de diagnóstico participativo objetivando o consenso; (iii) pela utilização de dados quantitativos relativos a trabalhos publicados.

A participação da comunidade especializada utilizando métodos de diagnóstico participativo pode ser considerada a melhor opção. De qualquer forma, pode-se utilizar dados quantitativos relativos a trabalhos publicados, como os escolhidos do Ecoindicador 99 (Goedkoop e Spriensma, 2000). Ecoindicador 99 é uma das abordagens existentes para a estrutura de cálculo utilizada na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. O critério adotado foi igualitário, hierárquico e individualista. As categorias foram divididas entre saúde humana, qualidade do ecossistema e de reservas. Os percentuais para cada uma das categorias relativamente aos critérios podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8: Percentuais por categoria e critério

Critério	Categoria: Saúde humana	Categoria: Qualidade do ecossistema	Categoria: Reservas
Igualitário	30%	50%	20%
Hierárquico	40%	40%	20%
Individualista	55%	25%	20%

Fonte: Oliveira et al. (2016)

Da mesma forma que Oliveira et al. (2016), este procedimento faz uma analogia entre as categorias do Ecoindicador 99 (Tabela 11, apresentada posteriormente) com as dimensões econômica, social e ambiental utilizadas pelo modelo 5SEnSU. Em relação às categorias propostas no Ecoindicador 99, neste procedimento, a categoria saúde humana foi associada ao critério social, a categoria qualidade do ecossistema foi associada ao critério ambiental e a categoria reservas foi associada ao critério econômico.

Adicionalmente ao adotado por Oliveira et al. (2016), este procedimento utilizou estes percentuais aplicados à escala de julgamento Saaty (2001), que estabelece pesos entre 1 e 9. A escala Saaty (2001) considera peso 1 quando ambos os elementos são de igual importância, peso 3 quando existe moderada importância de um elemento sobre o outro, peso 5 quando existe forte importância de um elemento sobre o outro, peso 7 quando existe importância muito forte de um elemento sobre o outro e peso 9 quando existe extrema importância de um elemento sobre o outro.

Considerando-se o conceito de sustentabilidade forte, onde os sistemas humanos estão contidos no sistema natural e o capital econômico e social não podem crescer além das limitações intrínsecas, optou-se por adotar o peso 9 para todos os indicadores por entender que existe extrema importância de um elemento sobre o outro. Para não atribuir peso 9 para todos os critérios igualitário, hierárquico e

individualista, respectivamente, para os setores social, ambiental e econômico, procurou-se adotar o procedimento de multiplicar os percentuais da Tabela 11 pelo peso 9 e, assim, estabelecer diferentes pesos para cada relação critério x setor. A seguir encontram-se os cálculos:

- Peso do critério igualitário para o setor social = $9 \times 30\% = 2,7$; para o setor ambiental = $9 \times 50\%$; para o setor econômico = $9 \times 20\%$;

- Peso do critério hierárquico para o setor social = $9 \times 40\% = 3,6$; para o setor ambiental = $9 \times 40\% = 3,6$; para o setor econômico = $9 \times 20\% = 1,8$;

- Peso do critério individualista para o setor social = $9 \times 55\% = 4,9$; para o setor ambiental = $9 \times 25\% = 2,3$; para o setor econômico = $9 \times 20\% = 1,8$.

Os resultados estão na Tabela 9.

Tabela 9: Pesos considerados no ASUPRO conforme critério e setor

Critério	Perspectiva cultural do analista	Setor Social	Setor Ambiental	Setor Econômico
		Peso para o desvio desejado	Peso para o desvio desejado	Peso para o desvio desejado
Igualitário	As reservas ambientais não podem ser controladas, mas os desejos podem.	2,7	4,5	1,8
Hierárquico	Desejos e necessidades não podem ser controlados, mas as reservas ambientais podem.	3,6	3,6	1,8
Individualista	A exaustão do combustível fóssil não é percebida como um problema atual, mas a diminuição dos recursos minerais o é.	4,9	2,3	1,8

Outro aspecto importante do ASUPRO é a aplicação da ferramenta *goal programming* para o estabelecimento de um indicador composto. Para cada indicador são estabelecidas diferentes metas a serem alcançadas. Para alguns indicadores,

pode-se desejar maximizar e outros minimizar seus resultados. Segundo Singh et al. (2012), indicadores de sustentabilidade e indicadores compostos estão sendo cada vez mais reconhecidos como uma poderosa ferramenta para a formulação de políticas, fornecendo informações sobre o desempenho dos países, conceituando fenômenos e simplificando informações complexas.

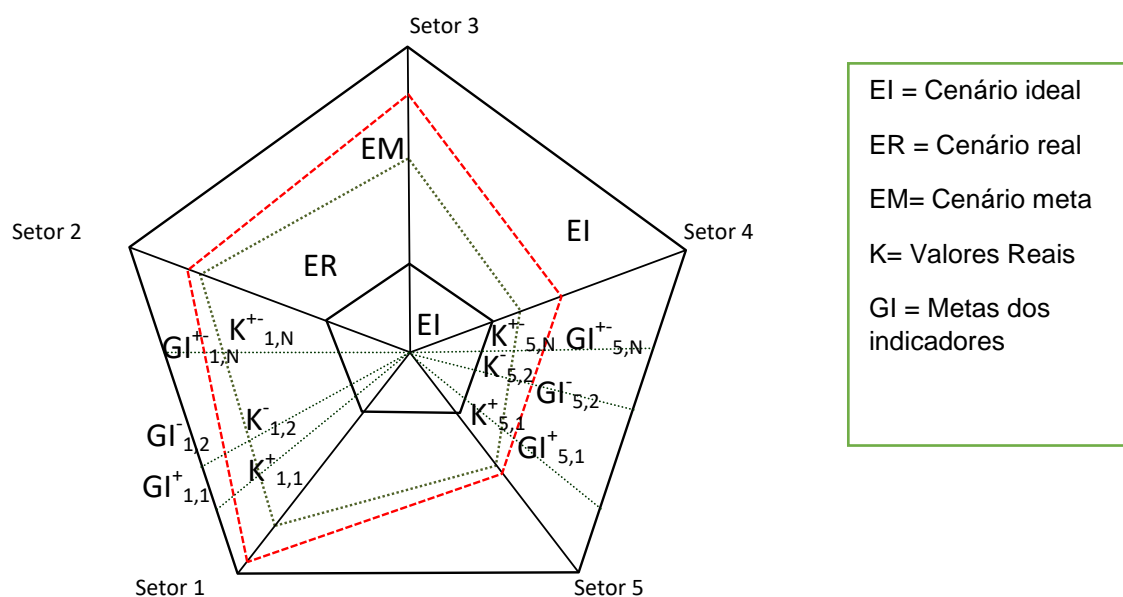
Para Singh et al. (2012), o desenvolvimento de indicadores compostos envolve a seleção de várias técnicas em diferentes etapas do processo de desenvolvimento, o qual pode resultar em várias questões de incerteza. Como forma de estruturar corretamente a sequência do procedimento e considerando ambas afirmações feitas por Singh et al. (2012), adotou-se inicialmente a programação meta para obtenção do indicador composto denominado indicador de sustentabilidade global (WSI), proposto e utilizado por Moreno Garcia (2017). Posteriormente, adotou-se Monte Carlo para avaliar a incerteza relativa aos pesos estabelecidos na Tabela 12 e a sua influência sobre o WSI.

Moreno García (2017) apresentou os conceitos e a teoria da aplicação da programação por metas no modelo 5SEnSU, utilizando sistemas de produção de arroz no Brasil como estudo de caso. O trabalho é considerado como pioneiro do grupo de pesquisa em Produção e Meio Ambiente da Universidade Paulista e usado como referência para este presente trabalho.

No modelo 5SEnSU, a sustentabilidade é um conceito multidimensional baseado em cinco setores ou dimensões associadas às três dimensões clássicas do desenvolvimento sustentável: Ambiental (Setores #1 e #2), Econômico (Setor #3), Social (Setores #4 e #5).

Conforme Moreno Garcia (2017), a representação gráfica (Figura 14) do modelo 5SEnSU como o modelo clássico de desenvolvimento sustentável baseia-se no equilíbrio que deve existir entre as dimensões do modelo expressado pelos indicadores selecionados para medir seu desempenho. Nesta representação, vários cenários podem ser identificados de acordo com o desempenho de cada um dos cinco setores: um cenário ideal (EI), que corresponde a um equilíbrio perfeito entre os cinco setores do modelo, um cenário meta (EM), que representa as aspirações, objetivos, ou metas dos indicadores (GI) de cada setor, e de um cenário real (ER), onde os valores reais de cada indicador (K) estão localizados e são obtidos a partir das medidas das variáveis selecionadas.

Figura 14: Representação da filosofia da programação por metas aplicado ao modelo 5 SEnSU



Fonte: Moreno Garcia (2017)

A álgebra de cálculo do 5SEnSU baseia-se no uso da programação meta (do inglês *goal programming*, GP) como uma ferramenta de análise multicritério para obter um indicador geral de sustentabilidade do sistema (chamado de WSI), considerando a metodologia formulada por Diaz-Balteiro et al. (2017). Para expressar os resultados de acordo com a proximidade entre os valores relativos dos indicadores e seus objetivos, foram feitas modificações para adaptá-lo ao 5SEnSU. A seguir, é apresentado o desenvolvimento matemático da inclusão da programação por metas no modelo 5SEnSU, cuja descrição completa, incluindo comentários, pode ser observada em Moreno García (2017).

Considere, por exemplo, um problema de decisão em que cada indicador de k_i possui uma meta G_i . Ao avaliar a situação de cada cenário, as variáveis indesejadas são diferentes, dependendo do tipo de indicador. Para indicadores acima da meta, a variável indesejada é o desvio negativo (N_{ijk}^+), tendo uma situação melhor; cenários que atingem o nível de aspiração definido como meta têm um valor maior da variável de desvio positivo (P_{ijk}^+). Para indicadores abaixo da meta, a variável indesejada é a variável de desvio positivo (P_{ijk}^-) apresentando cenários de situação melhor que atingem o nível de aspiração definido como objetivo ou um valor maior da variável de desvio negativo N_{ijk}^- .

Para os indicadores positivos (+) do tipo “maior melhor”:

$$N_{ijk}^+ = \begin{cases} G_{jk}^+ - K_{ijk}, & K_{ijk} < G_{jk}^+ \\ 0, & K_{ijk} \geq G_{jk}^+ \end{cases} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, NI\} \quad (1)$$

$$P_{ijk}^+ = \begin{cases} K_{ijk} - G_{jk}^+, & K_{ijk} > G_{jk}^+ \\ 0, & K_{ijk} \leq G_{jk}^+ \end{cases} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, NI\} \quad (2)$$

Para os indicadores positivos (-) do tipo “menor melhor”:

$$P_{ijk}^- = \begin{cases} K_{ijk} - G_{jk}^-, & K_{ijk} > G_{jk}^- \\ 0, & K_{ijk} \leq G_{jk}^- \end{cases} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, NI\} \quad (3)$$

$$N_{ijk}^- = \begin{cases} G_{jk}^- - K_{ijk}, & K_{ijk} < G_{jk}^- \\ 0, & K_{ijk} \geq G_{jk}^- \end{cases} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, NI\} \quad (4)$$

$$N_{ijk}, P_{ijk} \geq 0 \text{ e } N_{ijk} \cdot P_{ijk} = 0,$$

Onde:

NE : quantidade de cenários (sistemas de transporte)

NS : quantidade de setores (1...5)

NI : quantidade de indicadores por setor

i : cenário (1... NE)

j : setores (1...5)

k : indicadores (1... NI)

K_{ijk} : valor do k -ésimo indicador no j -ésimo setor do i -ésimo cenário

N_{ijk}^+ ; N_{ijk}^- : variável de desvio negativa do indicador positivo e negativo, respectivamente

P_{ijk}^+ ; P_{ijk}^- : variável de desvio positiva do indicador positivo e negativo, respectivamente

G_{jk}^+ ; G_{jk}^- : valor da meta para o indicador positivo ou negativo, respectivamente

Indicador Ponderado de Sustentabilidade Meta do indicador (ISM_{ijk}^+ e ISM_{ijk}^-), considerando as equações 1, 2, 3 e 4.

$$ISM_{ijk}^+ = \sum_{ijk} \frac{N_{ijk}^+}{W_{jk}^+ \cdot G_{jk}^+} + \sum_{ijk} \frac{P_{ijk}^+}{W_{jk}^- \cdot G_{jk}^+} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, NI\} \quad (5)$$

$$ISM_{ijk}^- = \sum_{ijk} \frac{N_{ijk}^-}{W_{jk}^- \cdot G_{jk}^-} + \sum_{ijk} \frac{P_{ijk}^-}{W_{jk}^+ \cdot G_{jk}^-} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, NI\} \quad (6)$$

onde: W_{jk}^+ e W_{jk}^- são valores ponderados ou “peso” para o indicador. É recomendado que para indicadores positivos $W_{jk}^+ < W_{jk}^-$ e para indicadores negativos $W_{jk}^+ > W_{jk}^-$, onde $0 < W_{jk}^+, W_{jk}^- \leq 100$.

O Indicador de sustentabilidade por setores do sistema ($ISMS_{ij}$), considerando as equações 5 e 6, se calcula como a somatória da diferença dos índices de sustentabilidade dos indicadores positivos e os índices de sustentabilidade dos indicadores negativos.

$$ISMS_{ij} = \sum_i \sum_j \sum_k (ISM_{ijk}^+ - ISM_{ijk}^-) \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\} \quad (7)$$

O indicador de sustentabilidade de cada cenário para cada setor é $ISMES_{ij}$, considerando a equação 7.

$$ISMES_{ij} = WS_j \sum_i \sum_j ISMS_{ij} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, NS\} \quad (8)$$

onde WS_j é o valor ponderado ou peso relativo que tem cada setor do sistema tal que $0 < WS_j \leq 1$ e $\sum_j WS_j = 1 \forall 0 < WS_j \leq 1$

O indicador de sustentabilidade global do sistema avaliado WSI_i , considerando (8), mostra o desempenho dos sistemas ao considerar a relação entre o valor dos indicadores, sua natureza, objetivos e importância relativa do sistema.

$$WSI_i = \sum_j^5 ISMES_{ij} \forall i \in \{1, 2, \dots, NE\} \quad (9)$$

Para avaliar o desempenho de vários sistemas, bastaria um ordenamento ascendente dos valores de WSI_i , resultando como melhores cenários os que ocupam as primeiras posições. O indicador de sustentabilidade-alvo para cada cenário (WSI_i) define um ranking de sustentabilidade que permite estabelecer prioridades de trabalho para reduzir as lacunas entre os diferentes sistemas.

Toda a modelagem matemática de inclusão da programação por metas dentro do modelo 5SEnSU foi inserida em uma planilha do Microsoft Excel®, utilizando linguagem de programação Visual Basic, para facilitar cálculos e simulações e será mostrada em um cartão de memória no apêndice E. Este trabalho foi previamente desenvolvido por Moreno García (2017). A planilha em Excel permite que diferentes estudos sobre sustentabilidade possam ser realizados, independentemente do tipo e da quantidade de sistema de produção que estão sendo comparados, mas desde que sempre baseados nos princípios do modelo 5SEnSU.

Segundo Dalmácio et al. (2008), o *goal programming* procura minimizar a soma dos desvios, contudo, como muitas vezes, trabalha-se com variáveis que não podem ser somadas (horas, quantidade de funcionários, valores monetários), o modelo transforma os desvios (números absolutos) em desvios percentuais em relação à meta desejada. Desta maneira, o modelo estaria tratando todos os desvios percentuais da mesma forma, o que, geralmente, não é desejável ao tomador de decisões. O *goal programming*, por isso, exige que o gestor atribua pesos (punições) aos desvios percentuais (privilegiando algumas metas em relação às outras), gerando, então, uma função objetivo final que visa minimizar a soma ponderada dos percentuais dos desvios.

Segundo Moreno Garcia (2017), para cada indicador são estabelecidos pesos, denominados W_{jk}^+ e W_{jk}^- , e têm a função de penalizá-lo, ou seja, pondera-se o desvio que está em discrepância como o objetivo da meta. Por exemplo, se o objetivo é minimizá-lo, aquele desvio maior acima da meta recebe menor peso, enquanto que o menor desvio recebe maior peso. Estes pesos são expressos em valores numéricos.

Diversos estudos utilizaram funções de ponderação aplicadas a problemas de planejamento de água (CAN, HOUCK, 1984), planejamento financeiro (KVANLI, BUCKLEY, 1986) e agricultura (MINGUEZ et al., 1988). Para identificar os possíveis intervalos dos pesos atribuídos aos desvios, foi realizada uma revisão da literatura, como visto na Tabela 10, onde aparecem o título do artigo, o intervalo dos pesos e seus respectivos autores.

Tabela 10: Pesos atribuídos aos desvios dos indicadores em relação às suas metas

Título do artigo	Intervalos dos pesos	Autores
Real-time reservoir operations by Goal Programming	2,4,6, 129, 300 e 400	Can e Houck (1984)
Financial Planning Using Goal Programming	1 a 10	Kvanli e Buckley (1986)
The double role of the weight factor in the goal programming model	0 a 1	Kelly et al. (2018)
Some programming models to derive priority weights from additive interval fuzzy preference relation	0 a 1	Wang et al. (2012)

Pode-se perceber que não há uma regra definida em relação aos intervalos que podem oscilar os pesos atribuídos a cada desvio de cada indicador. Desta forma, o procedimento permite ao decisor escolher os valores dos pesos atribuídos a cada desvio absoluto positivo e negativo, resultantes da diferença do valor do indicador e sua respectiva meta, sendo necessário o uso de determinado critério para escolha dos mesmos. Vale ressaltar que o decisor pode atribuir pesos de valores baixos e iguais para os desvios positivos e negativos para indicadores de baixa importância dentro do sistema estudado ou que dificilmente possam ser modificados por meio de ações efetivas. Ou seja, o gestor deve, de maneira interativa, estabelecer um conjunto de pesos para analisar a solução e, então, redefinir os pesos novamente. Pode ser necessário repetir este processo muitas vezes até que o usuário do procedimento proposto esteja satisfeito com a solução encontrada.

A análise de incerteza dos pesos no estágio 3 “checar” procura avaliar como a oscilação dos mesmos interfere no resultado final do WSI do sistema. Como exemplo, considere que este intervalo esteja com valores de pesos entre 1 e 5.

Uma vez definido o intervalo, deve-se adotar o seguinte critério em relação aos pesos:

- a) Se a intenção é minimizar o valor do indicador, deve-se atribuir pesos maiores para o desvio negativo referente àquele indicador e preferencialmente o valor 1 para o desvio positivo.

No caso de minimização de indicadores, o valor do peso atribuído ao desvio negativo deve sempre ser superior ao valor do peso atribuído ao desvio positivo.

- b) Se a intenção é maximizar o valor do indicador, deve-se atribuir pesos maiores para o desvio positivo referente àquele indicador e preferencialmente o valor 1 para o desvio negativo.

No caso de maximização de indicadores, o valor do peso atribuído ao desvio positivo deve sempre ser superior ao valor do peso atribuído ao desvio negativo.

Definidos os valores dos pesos, deve-se recalculiar os índices ponderados de cada sistema para cada setor (ISMES) e também o somatório referente ao sistema como um todo, aqui denominado como WSI. O sistema considerado mais sustentável é aquele que apresentar o menor resultado numérico para o WSI, o que indica menor distância até a meta estabelecida.

Considerando que os valores atribuídos aos pesos interferem diretamente no resultado final do WSI, sugere-se que se utilize a simulação de MONTE CARLO, que permite uma simulação dos pesos atribuídos para cada desvio positivo e negativo dentro do intervalo máximo e mínimo. A simulação permite gerar diversas repetições, sendo cada uma um valor aleatório dos pesos para cada desvio positivo e negativo de cada indicador pertencente ao sistema estudado. Ao final, a simulação MONTE CARLO apresenta os valores máximo, mínimo, média e desvio padrão de cada WSI, o que permite apontar qual dos dois sistemas é o mais sustentável.

4.4 Estágio 4 do ASUPRO – Proposta de melhorias das operações e processos de produção

No estágio 4, “agir” do ASUPRO, a primeira etapa é a identificação dos indicadores que necessitam ser melhorados, tendo como base a análise gráfica dos resultados. Nesta etapa, apenas identifica-se quais são estes indicadores e o analista pode propor ações que melhorem o desempenho de seus resultados.

A última etapa do estágio 4 é a análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade pretende medir como a diminuição ou o aumento dos indicadores em termos percentuais podem levar a um menor resultado do WSI, tendo como objetivo

a redução de seu valor. Ressalta-se que, quanto menor for o seu resultado, mais próximo está o indicador da meta estabelecida. Como regra adotada na análise de sensibilidade, somente os indicadores que se apresentam fora de suas respectivas metas são alterados, buscando diminuir o WSI do sistema avaliado. Os percentuais adotados para redução ou aumento dos indicadores ficam a critério do analista. Entretanto, para efeito de aplicação do procedimento nesta tese, adotaram-se os percentuais de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%.

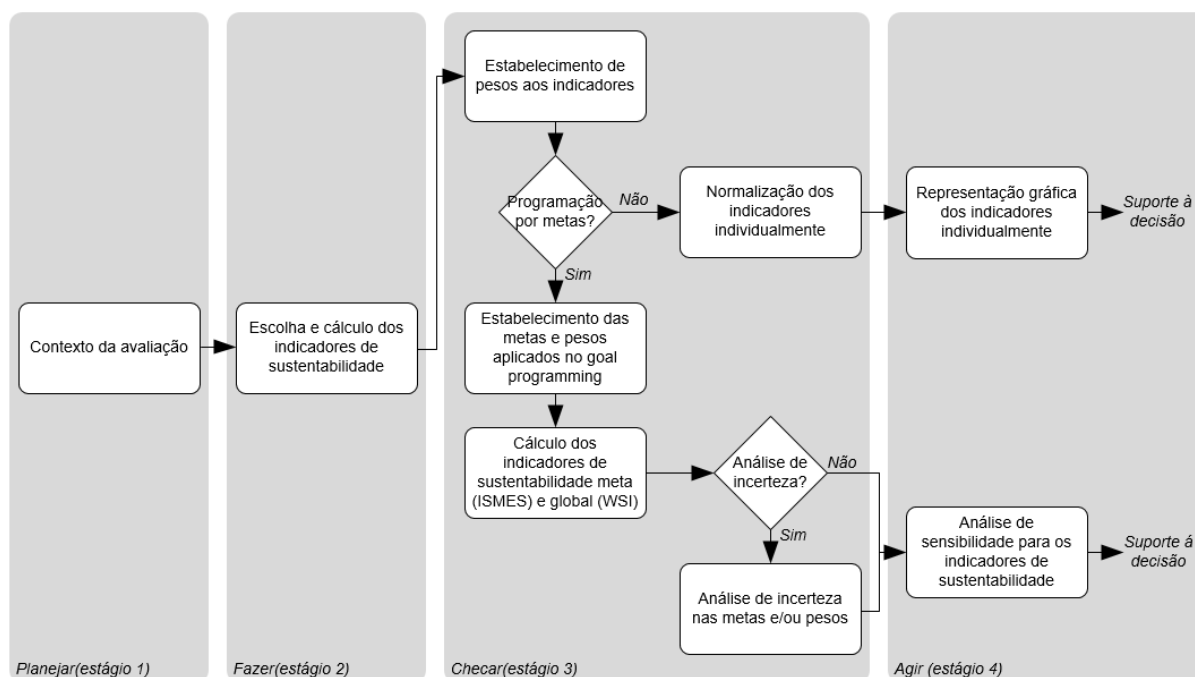
Para o indicador que se deseja minimizar, deve-se aplicar estes percentuais de forma decrescente, e para os indicadores que se deseja maximizar, deve-se aplicar estes percentuais de forma crescente. Em seguida, deve-se comparar o resultado final do WSI de cada sistema com seu valor original. Em seguida, deve-se comparar o resultado final do WSI de cada sistema com seu valor original. Desta forma, é possível identificar os indicadores mais relevantes e qual o valor percentual a ser corrigido de cada indicador, para que se obtenha sistemas mais sustentáveis.

O ASUPRO nesta etapa atinge seu objetivo de permitir que ambos os sistemas melhorem seu desempenho tendo como referência as metas estabelecidas e os resultados do WSI alcançados. As ações sugeridas podem incluir os percentuais a serem utilizados para redução ou aumento de determinados indicadores pertencentes a cada um dos sistemas estudados.

4.5 Fluxograma dos estágios do ASUPRO

Para melhor entendimento do ASUPRO foi proposto o fluxograma dos principais estágios (Figura 15).

Figura 15: Fluxograma dos estágios do ASUPRO



No estágio 1 é trabalhado o contexto da avaliação, no estágio 2 é realizado o cálculo dos indicadores de sustentabilidade e no estágio 3 são estabelecidos os pesos aos indicadores. Caso não se deseje comparar os resultados com as metas, o analista deve realizar a normalização dos indicadores e obter a apresentação gráfica para o suporte à decisão.

Em situações em que se deseje comparar os resultados com metas e atribuir pesos, deve-se prosseguir com a programação por metas, proposta no estágio 3. Caso não haja incerteza em relação aos pesos e/ou metas escolhidos, calcula-se o indicador de sustentabilidade/meta para cada setor (ISMES) e o indicador global de sustentabilidade (WSI). Neste estágio 3 é possível apontar qual dos sistemas estudados apresenta maior sustentabilidade. A análise de sensibilidade dos indicadores, no estágio 4, permite identificar ações de melhoria de cada sistema, dando suporte à decisão.

Havendo a incerteza em relação aos pesos e/ou metas, aplica-se a análise de incerteza de MONTE CARLO, recalculando-se os indicadores ISMES e WSI. Uma nova análise de sensibilidade para suporte à decisão deve ser realizada.

4.6 Instrumentos e princípios utilizados em procedimentos de avaliação de sustentabilidade

Segundo o Instituto Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (IISD, 2009), é reconhecido que diversos estudos vêm monitorando sistemas por meio da coleta de dados e da publicação de relatórios. Muitas dessas iniciativas envolvem políticas ambientais e promovem o diálogo com a sociedade em busca de bem-estar e qualidade de vida. Segundo Pintér et al. (2012), em 1996, um grupo de eminentes analistas e profissionais desenvolveram os “Princípios de Bellagio”, a fim de fornecer orientação na medição e avaliação relativa à gestão sustentável. Em abril de 2009, a Organização para a Cooperação de Desenvolvimento Econômico (OECD, 2009) e o IISD renomearam os princípios para Princípios de Medição e Avaliação de Sustentabilidade, passando a se chamar BellagioSTAMP.

Segundo Pintér et al. (2012), os autores do BellagioSTAMP tiveram três públicos em mente que poderiam se beneficiar mais da aplicação dos princípios em seu monitoramento de avaliação. Primeiro, os grupos envolvidos no desenvolvimento de sistemas de métricas alternativas. Segundo os grupos que buscam uma avaliação integrada e, por último, aqueles que praticam a avaliação centrada no projeto ou em políticas de desenvolvimento sustentável. A Tabela 11 mostra cada um dos princípios e suas respectivas definições. Segundo Pintér et al. (2012), os princípios de Bellagio ainda não foram aplicados no âmbito corporativo para avaliar o desempenho das empresas individualmente em relação à sustentabilidade. Na opinião dos autores, uma das razões para a não aplicação dos princípios deve-se ao fato de que as empresas mantêm o foco em assuntos gerenciais estabelecidos pelo sistema de mercado

Tabela 11: Princípios de avaliação de sustentabilidade

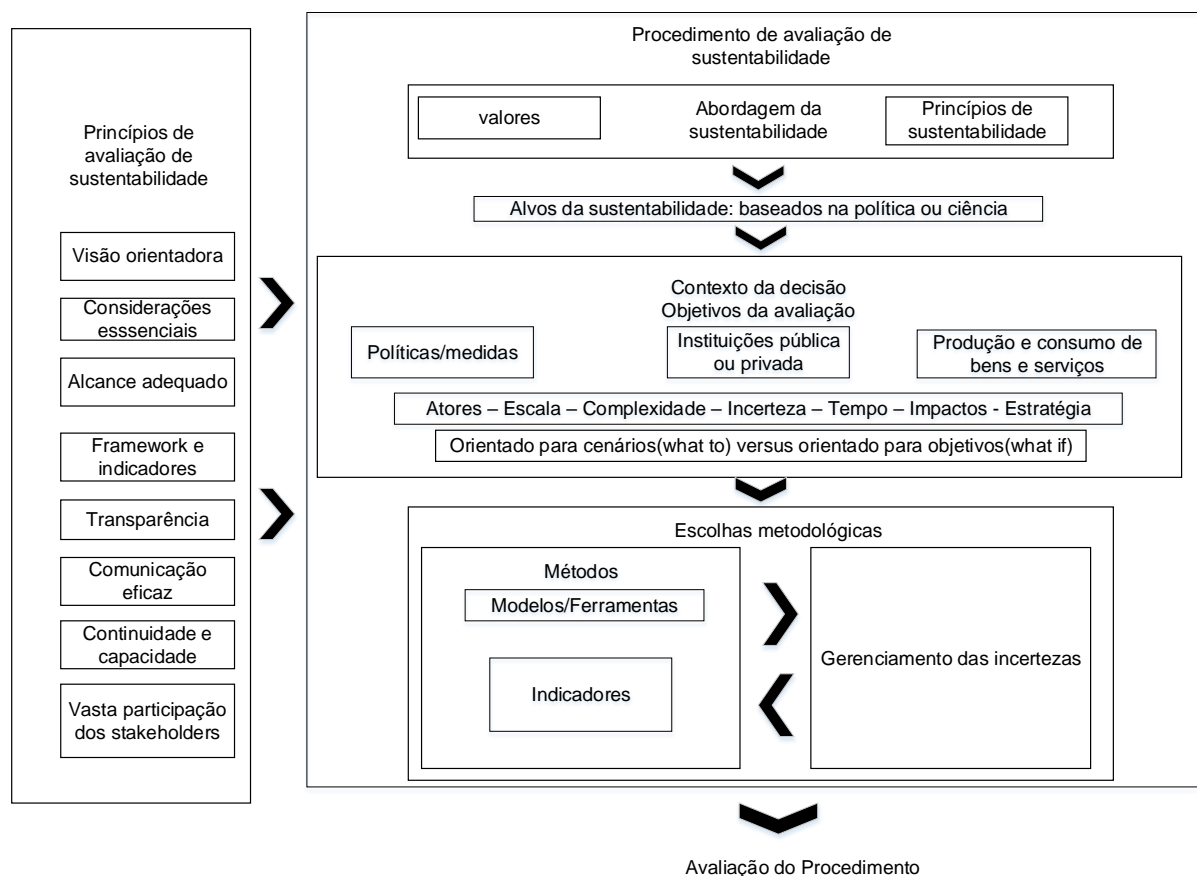
Princípio	Definição
1 - Visão orientadora	A avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável deverá ser guiada pelo objetivo de proporcionar bem-estar dentro da capacidade da biosfera para sustentá-la para as futuras gerações.
2 - Considerações Essenciais	<ul style="list-style-type: none"> - O sistema social, econômico e ambiental subjacente como um todo e as interações entre seus componentes, incluindo questões relacionadas à governança; - Dinâmicas e interações entre tendências atuais e condutores de mudança; - Riscos, incertezas e atividades que podem ter impacto além das fronteiras; - Implicações para a tomada de decisões, incluindo trade-offs e sinergias.
3 - Alcance adequado	<ul style="list-style-type: none"> - Um horizonte de tempo adequado para capturar tanto a curto como a longo prazo efeitos das atuais decisões políticas e atividades humanas; - Um âmbito geográfico adequado.
4 - Quadros de controle e indicadores	<ul style="list-style-type: none"> - Uma estrutura conceitual que identifica os domínios dentro do qual indicadores centrais para avaliar o progresso devem ser identificados; - Métodos de medição padronizados, sempre que possível, no interesse da comparabilidade; - Comparação dos valores dos indicadores com as metas, quando possível.
5 - Transparência	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir que dados, indicadores e resultados da avaliação sejam acessíveis ao público; - Explicar as escolhas, suposições e incertezas que determinam os resultados da avaliação; - Divulgar fontes e métodos de dados; - Divulgar todas as fontes de financiamento e potenciais conflitos de interesse.
6 - Comunicação eficaz	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de linguagem clara e direta; - Apresentação de informações de maneira justa e objetiva que ajude a ganhar confiança; - Uso de ferramentas e gráficos visuais inovadores para ajudar na interpretação; - Disponibilização dos dados com detalhes confiáveis.
7 - Vasta participação	<ul style="list-style-type: none"> - Encontrar maneiras adequadas para refletir as opiniões do público, enquanto prover liderança ativa; - Envolver-se desde o início com os usuários da avaliação, para que suas necessidades sejam atendidas.
8 - Continuidade e capacidade	<ul style="list-style-type: none"> - Revisão contínua dos dados; - Capacidade de resposta à mudança; - Investimento para desenvolver e manter a capacidade adequada; - Aprendizado e melhoria contínuos.

Fonte: Pinter et al. (2012)

Segundo Pintér et al. (2012), os princípios de Bellagio ainda não foram aplicados no âmbito corporativo para avaliar o desempenho das empresas individualmente em relação à sustentabilidade. Na opinião dos autores, uma das razões para a não aplicação dos princípios deve-se ao fato de que as empresas mantêm o foco em assuntos gerenciais estabelecidos pelo sistema de mercado.

Segundo Sala et al. (2015), a avaliação de sustentabilidade é uma das mais complexas metodologias porque não só implica em aspectos multidisciplinares (ambiental, econômico e social), mas também em aspectos culturais baseados em valores impostos pela sociedade. Ainda segundo os autores, a avaliação de sustentabilidade é normalmente realizada para apoiar a tomada de decisão, bem como a implementação e o controle de políticas ambientais. Para Sala et al. (2015), os principais desafios para a avaliação de sustentabilidade estão relacionados com a necessidade de especificar um limite entre o que contribui para um desenvolvimento sustentável e o que não. A fim de oferecer diretrizes na avaliação de robustez de procedimentos de avaliação de sustentabilidade, os autores propuseram uma representação esquemática, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16: Representação esquemática de um framework conceitual para avaliação da sustentabilidade



Fonte: Sala et al. (2015)

Na representação esquemática, Sala et al. (2015) utilizaram os mesmos princípios, denominados com BellagioSTAMP, e avançaram na checagem de procedimentos que avaliam a sustentabilidade de sistemas.

Na avaliação do procedimento, os autores iniciam com uma abordagem da sustentabilidade levando-se em conta os valores e princípios não só do analista como também dos stakeholders. Os alvos da sustentabilidade podem ser baseados em políticas ambientais ou ciência. Relativamente ao contexto da decisão, pode-se optar em avaliar políticas ambientais e suas medidas, instituições públicas ou privadas e produção/consumo de bens e serviços. As interpretações podem enfatizar aspectos ecológicos, econômicos, termodinâmicos, políticas públicas e teoria do planejamento visando o equilíbrio destes aspectos. No contexto das decisões, os procedimentos de avaliação podem ter uma abordagem baseada em limiares pelos quais são orientados por metas e denominadas “What to”. Alternativamente, é sugerida a abordagem

orientada para os cenários e são denominadas “What if”. Para fazer a avaliação, Sala et al. (2015) descreveram que o núcleo principal do procedimento são as escolhas metodológicas. Estas escolhas envolvem diversos métodos que, por sua vez, utilizam modelos matemáticos e indicadores para medir os parâmetros fixados pelo analista. O gerenciamento das incertezas dos modelos e métodos devem ser considerados.

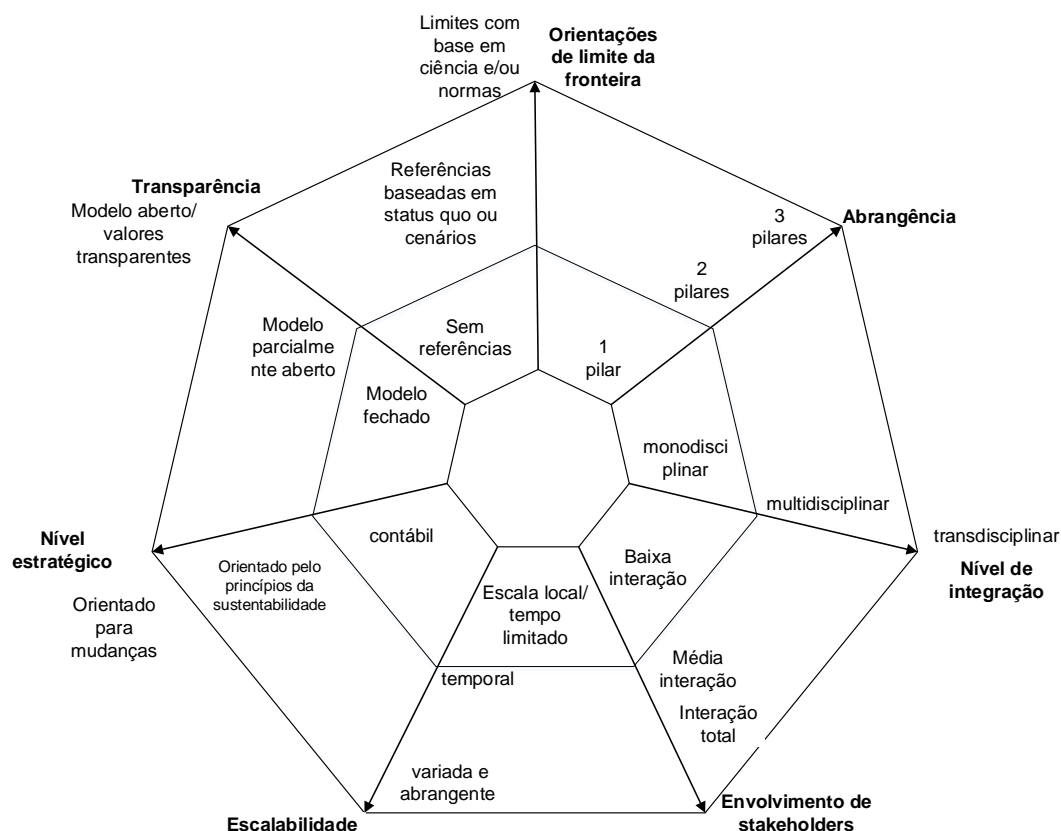
Sala et al. (2015) reuniram uma série de artigos relacionados à avaliação de sustentabilidade e propuseram uma lista de critérios aplicados à escolha metodológica. Estes critérios permitem avaliar a capacidade metodológica utilizada em procedimentos que visam medir o desempenho de sustentabilidade. A forma de categorizar o procedimento pode ser vista na Figura 17.

Segundo Sala et al. (2015), a seleção dos critérios pode influenciar na avaliação final e compõe três diferentes fases:

- Identificação das metodologias de avaliação mais adequadas (métodos, modelos, ferramentas e indicadores relacionados);
- Análise de sensibilidade e incerteza do quadro de avaliação;
- Definição de estratégias de monitorização para acompanhar os progressos em sustentabilidade.

A forma de avaliação da robustez utilizada em procedimentos de avaliação de sustentabilidade proposto por Sala et al. (2015) considera os sete critérios e suas respectivas características (Figura 17).

Figura 17: Critérios da metodologia utilizada em procedimentos de sustentabilidade



Fonte: Sala et al. (2015)

A primeira categorização é em relação à delimitação da orientação, verificando se a mesma é baseada em políticas, baseada em cenários ou se não possui qualquer referência; segunda categorização verifica quais pilares de sustentabilidade são considerados; a terceira avalia o conjunto específico de conhecimento ou disciplinas adotadas; a quarta categorização avalia o grau de envolvimento dos stakeholders; a quinta avalia a escala de tempo utilizada; a sexta avalia o nível estratégico dos métodos utilizados; e a sétima categorização avalia a transparência do procedimento, classificando-o como fechado, parcialmente aberto e aberto.

5. APLICAÇÃO DO ASUPRO: TRANSPORTE DE SOJA NO BRASIL COMO ESTUDO DE CASO

Após a apresentação do procedimento proposto, este item aplica o procedimento em um estudo de caso comparando dois sistemas de transporte da soja da região de Mato Grosso ao porto de Santos. O sistema ferroviário é combinado, pois inclui transporte rodoviário para o transporte da soja até o Terminal Rondonópolis e, posteriormente, o ferroviário, que transporta toda a soja ao Terminal de Granel Sólido, localizado no porto de Santos. O procedimento é aplicado de acordo com a sequência e fluxograma dos estágios das Figuras 12 e 15.

5.1 Estágio 1 – Contextualizando o estudo de caso

Segundo dados do IBGE (2014), entre os 20 principais municípios produtores de soja, 14 estão localizados no estado de Mato Grosso. Os principais produtores de soja são Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, que juntos respondem por 65% da produção nacional, sendo que Mato Grosso sozinho responde por 30%. A Tabela 12 mostra os municípios da região de Mato Grosso, sua produção em toneladas e suas distâncias ao porto de Santos e ao Terminal de Rondonópolis.

Tabela 12: Principais municípios produtores de soja em 2014 e distâncias ao porto de Santos e ao terminal Rondonópolis

Município	Produção (ton)	Santos (km)	Terminal Rondonópolis (km)
Sorriso	1.926.930	2020	614
Nova Mutum	1.156.866	1861	460
Campo Novo dos Parecis	1.125.720	2022	622
Sapezal	1.088.340	2130	730
Nova Ubiratã	928.020	2100	699
Diamantino	849.600	1805	405
Querência	840.000	1825	823
Primavera do Leste	753.940	1536	126
Lucas do Rio Verde	699.434	1955	555
Itiquira	630.000	1325	150
Campo Verde	595.500	1544	144
Campos de Júlio	528.673	2186	785
Brasnorte	514.440	2207	807
Santa Rita do Trivelato	513.443	1966	565

Fonte: IBGE (2014)

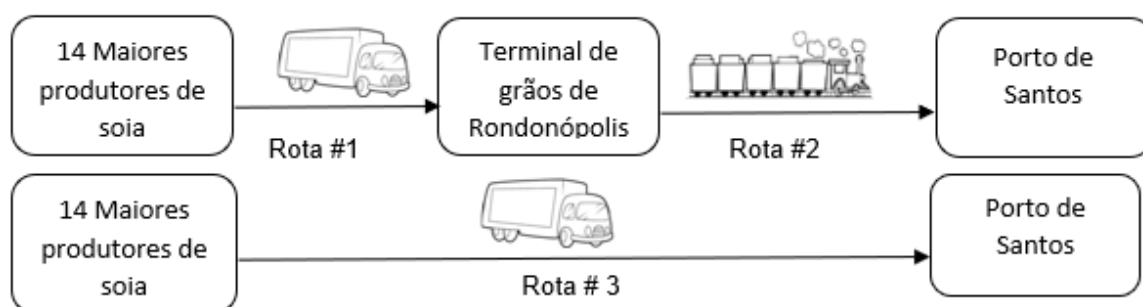
Em relação ao transporte ferroviário, a soja tem como ponto de partida o terminal intermodal da empresa América Latina Logística, localizado na cidade de Rondonópolis. Segundo dados da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), a distância da malha ferroviária da cidade de Rondonópolis até o porto de Santos é de 1.446 km.

Em ambos subsistemas, calcula-se um determinado estoque de caminhões e composições de vagões/trem utilizados para o escoamento de 12 milhões de toneladas de soja no período da safra de 2014/2015. (Apêndices A e B)

A justificativa pela escolha do produto soja deve-se ao fato de que o produto é uma das commodities mais importantes para o Brasil. Segundo o Instituto Mato-Grossense de Economia e Pecuária (IMEA, 2017), o estado de Mato Grosso encerrou o ano de 2017 com 9,4 milhões de hectares cultivados. As exportações até novembro de 2017 atingiram 17,8 milhões de toneladas. O porto de embarque da soja é o porto de Santos, sendo utilizados os sistemas de transporte rodoviário e ferroviário. A matriz de transporte do Brasil, comparado com os EUA, segundo dados do Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (IMEA, 2017), mostra que o transporte rodoviário representa 61%, o transporte ferroviário 21% e o hidroviário 18%.

Para efeito de fronteira a ser analisada, os sistemas de transporte analisados têm como origem as regiões produtoras de soja no estado de Mato Grosso e como destino a região de Santos, onde estão localizados os terminais especializados no embarque da soja. Em relação ao transporte rodoviário, a soja é carregada em 14 municípios produtores e segue de caminhão até a região de Santos, enquanto que no transporte ferroviário, primeiramente ocorre o transporte rodoviário destes municípios até o terminal de Rondonópolis, havendo o transbordo para vagões e seu transporte até a região de Santos, conforme Figura 18.

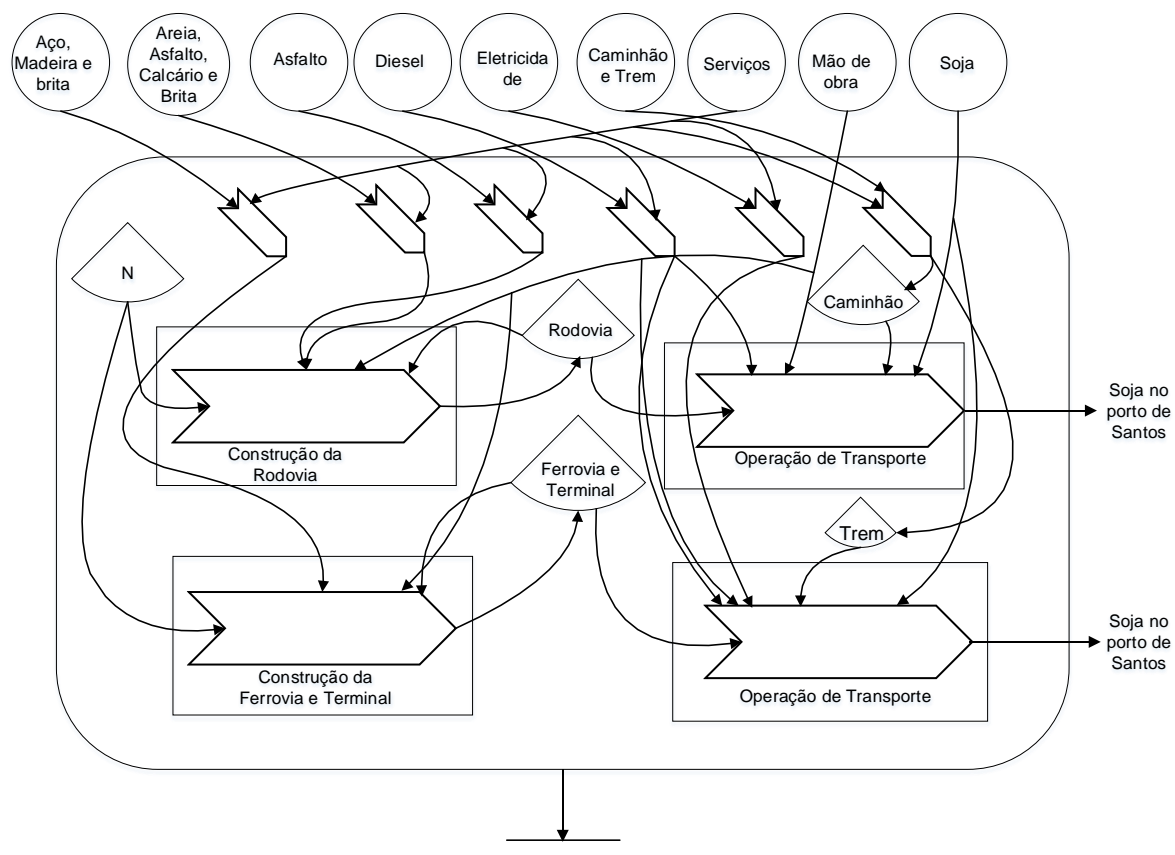
Figura 18: Representação dos trajetos e operações até a região portuária de Santos



A unidade funcional utilizada para todos os indicadores foi com base na tonelagem transportada dentro do período de tempo de exportação da soja cujos anos foram da safra 2014/2015 e também das distâncias médias, expressas em quilômetros, dos centros produtores ao Terminal de Rondonópolis, do Terminal de Rondonópolis ao porto de Santos e, finalmente, dos centros produtores em Mato Grosso ao porto de Santos.

A última etapa do Estágio 1 do Procedimento é o diagrama de energia (Figura 19). Neste diagrama, pode-se observar os materiais aço, madeira, brita, areia, asfalto e calcário utilizados na construção da rodovia, da ferrovia e do terminal localizado em Rondonópolis. Considera-se também o diesel utilizado para abastecer os caminhões e locomotivas, bem como a quantidade necessária para deslocar a soja no período de embarque no porto de Santos. A eletricidade representada no diagrama contabiliza a demanda medida em kwh utilizada no Terminal Rondonópolis para movimentação da soja utilizando-se correias transportadoras e demais equipamentos. A mão de obra contabiliza o número de condutores para locomotivas e motoristas de caminhões.

Figura 19: Diagrama de energia dos sistemas estudados



5.2 Estágio 2 – Escolha dos indicadores de sustentabilidade para o estudo de caso

No presente estudo, em função da revisão de literatura realizada sobre indicadores de sustentabilidade em transporte, os indicadores não foram escolhidos sem a participação de especialistas aplicando o método Delphi, mas sim em função dos estudos já realizados e da disponibilidade de exemplos apresentados pela revisão da literatura pesquisada (Varzaneh, 2012, 2014; Castillo et al., 2010; Rodrigues et al., 2016; Haghshenas e Vaziri, 2012; Zheng et al., 2013; Shiau e Liu, 2013), bem como da experiência em logística do autor da tese.

De acordo com o uso do modelo 5SEnSU, os indicadores escolhidos foram para o setor 1 energia e para a área de influência utilizada para a construção de rodovia e ferrovia. Para o setor 2, tendo o meio ambiente como receptor, foram escolhidos os indicadores denominados potencial de acidificação e potencial de aquecimento. Para o setor 3, tendo o setor econômico, foram escolhidos os indicadores denominados receita da empresa e lucro por empregado. Para o setor 4, tendo a sociedade como provedora e receptora de recursos do setor econômico, foram escolhidos os indicadores denominados números de empregos e salário pago aos trabalhadores. Para o setor 5, tendo a sociedade como receptora do setor econômico, foram escolhidos os indicadores denominados emissão de CO₂ e número de acidentes causados pelos modais ferroviário e rodoviário.

Recursos, incluindo o natural (luz solar, água, terra, floresta etc.) e o social (trabalho e informação) desempenham um importante papel na moderna economia e na sociedade. Entretanto, recursos naturais são sempre considerados como produtos livres disponíveis na natureza e seu valor real não tem sido avaliado, uma vez que o sistema econômico não o considera como uma contribuição da natureza. Odum (1996), objetivando contabilizar toda a energia da natureza incorporada no desenvolvimento de processos e serviços, considerando, além da contribuição da sociedade (recursos econômicos), o trabalho passado e presente da natureza para a produção de um bem ou serviço, desenvolveu a síntese em energia. Todo fluxo de massa, energia, monetário e informação que entra pelas fronteiras do sistema produtivo é contabilizado e convertido em uma unidade de medida comum, o emjoule solar (sej). Sob uma perspectiva de grande escala, esta metodologia possibilita medir a qualidade da energia em uma cadeia hierárquica de energia no espaço e no tempo.

A qualidade da energia é expressa quantitativamente pelo Valor Unitário de Emergia (UEV), que é uma relação entre toda emergia demandada em um sistema e os seus fluxos de saída. Quanto mais emergia é previamente demandada para uma maior quantidade de produto, maior será o UEV do produto e sua qualidade e, assim, mais alta será sua posição na hierarquia de energia (ODUM, 1996).

Segundo o DNIT (2017), a área de influência na construção de rodovias em relação ao meio físico é dividida, para fins de aprofundamento de estudos, em Direta e Indireta, de acordo com as interferências que ocorrem. A primeira, Área de Influência Direta (AID), corresponde à área afetada diretamente pelas obras, sendo definida como uma faixa entre 1,5 a 2 km de afastamento do eixo em construção de rodovias. Envolve as áreas de movimentação de máquinas, desvios, caminhos de serviço, retirada de solo, área de onde serão obtidos solo, rochas e areia, assim como os locais de acampamento das empreiteiras. De acordo com o órgão, a área de influência direta na construção de ferrovias está restrita ao espaço físico delimitado pela faixa de construção de domínio com 20 metros de cada lado da ferrovia.

PAG, ou Potencial de Aquecimento Global, estima a contribuição relativa de um determinado gás de efeito estufa para o aquecimento global em relação à mesma quantidade de um gás de referência (CO₂) cujo PAG é definido em kg de CO₂-eq. O dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) é obtido através da multiplicação dos kg emitidos dos gases em referência por seu potencial de aquecimento global. Este índice é utilizado para comparar as emissões de vários gases, baseado no Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de tempo determinado (Equação 10). Neste trabalho, para efeito do CO₂eq, são considerados o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). O potencial de aquecimento de acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) para um período de 100 anos é de 1 para o CO₂, 75 para CH₄ e 298 para o N₂O.

Esse procedimento pode ser expresso matematicamente como:

$$\text{Potencial de aquecimento global (kgCO}_2\text{-eq)} = \sum \text{PAG}_i \times m_i \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

PAG = potencial de aquecimento para o CO₂, CH₄ e N₂O

m_i = kg de CO₂, CH₄ e N₂O

Utilizando o programa brasileiro Greenhouse Gas Protocol, ou GHG Protocol, elaborado pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV EAESP, através do site www.ghgprotocolbrasil.com.br, é possível obter as quantidades em kg de CO₂, CH₄ e N₂O tanto para o transporte por caminhões como por locomotivas. O software considera as características físico-químicas do diesel brasileiro e das eficiências dos motores brasileiros utilizados em locomotivas e caminhões.

Os principais poluentes primários emitidos da queima de combustíveis fósseis são os materiais particulados (MPs), o dióxido de enxofre (SO₂), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o monóxido de carbono (CO). Através do relatório de emissões veiculares no estado de São Paulo, elaborado pela CETESB, em 2012, pode-se observar que para caminhões pesados os principais poluentes são o SO₂ e NO_x, responsáveis pela formação da “chuva ácida”. O potencial de acidificação (PA) de um processo pode ser estimado através do cálculo do produto de uma quantidade de gases emitidos por quilograma de material produzido e o PA dado em SO₂-equivalente por kg de gás (Equação 11). Esse procedimento pode ser expresso matematicamente como:

$$\text{Potencial de acidificação (kgSO}_2\text{-equivalente)} = \sum PA_i \times m_i \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

PA = potencial de acidificação para o SO₂ e NO_x

m_i = kg de SO₂ e NO_x/km

Para a estimativa do potencial de acidificação, serão considerados os seguintes coeficientes publicados em LCA (1997): SO₂ = 1; NO_x = 0,88.

As emissões de kg de SO₂/km foram obtidas pela empresa Ecologus Engenharia Consultiva, enquanto que as emissões de kg de NO_x/km foram obtidas pelo Environment European Agency (EEA). De acordo com o Estudo de Modelagem da Dispersão de Poluentes Atmosféricos para Análise dos impactos atmosféricos do Distrito Industrial de São João da Barra e o Corredor Logístico elaborado pela Empresa Ecologus Engenharia Consultiva, a quantidade de dióxido de enxofre (SO₂) liberada para a atmosfera com a queima do diesel em motores de combustão é de 1,13 E - 03 kg de SO₂/km; para o óxido nitroso (NO_x), o Environment European Agency fornece um valor de 12,8 E-03 kg de NO_x/km.

O setor econômico é geralmente representado pela produção de um bem ou serviço. Neste estudo, os sistemas avaliados são o sistema de transporte rodoviário e ferroviário, assim, como forma de avaliar os resultados destes prestadores de serviços, foram escolhidos indicadores: receita do transportador e lucro ou retorno por empregado.

A receita do transportador é importante, pois permite avaliar o ganho das empresas de transporte rodoviário e ferroviário no cenário econômico (Equação 12).

$$R_t = ((\sum_{i=1,2} (F_t / D_{iv})) \times Q_v) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

R_t = receita do transportador (R\$/ton.km)

F_t = frete do modal (R\$/ton)

D_{iv} = distância de ida e volta para cada rota (km)

Q_v = quantidade de caminhões e composições ferroviárias

$I = 1,2$, onde 1 é o sistema rodoferroviário e 2 o sistema rodoviário

A receita do transportador, ou empresa de transporte, objeto de pesquisa deste indicador, é calculada em função do valor monetário em reais (R\$) por tonelada transportada, dividida pela distância de ida e volta e dividida para quantidade de caminhões ou composições ferroviárias

Estudos sobre rentabilidade de empresas sugeriram a utilização de novas métricas para mensuração de desempenho, às vezes considerando os múltiplos atributos dos ativos (COLAUTO, 2005). Segundo o autor, a finalidade é proporcionar às empresas instrumentos para avaliar a rentabilidade das organizações que sejam condizentes com o novo ambiente competitivo mundial, em que os ativos intangíveis cresçam de importância e sejam representados pelo capital humano. Estes ativos podem ser constituídos como resultado do esforço de pesquisa da empresa, de natureza contínua e pela organização excelente.

Bryan (2007) propôs uma métrica de avaliação como possibilidade de mensurar o desempenho do capital humano da empresa. O autor sugeriu o cálculo da medida intitulada “Lucro por empregado” como a relação entre lucro líquido da empresa e o número de empregados. Desta forma, o lucro por empregado é medido pelo quociente entre o lucro líquido e o número de empregados. Este indicador mostra o grau de eficiência da empresa em relação à quantidade de funcionários (Equação 13).

$$L_{emp} = L_{liq} / (CAP_v \times N_{emp}) \quad \text{Equação 13}$$

$$L_{liq} = R_{ec} - I_{mp}$$

Onde:

L_{emp} = lucro por empregado (R\$/ton.km)

L_{liq} = lucro líquido após pagar todos impostos (R\$)

N_{emp} = número de empregados utilizados (número de empregados)

R_{ec} = receita da empresa (R\$)

I_{mp} = total de impostos (R\$)

CAP_v = capacidade de carga do modal (ton.km)

O lucro líquido é obtido após pagar todos os impostos. Segundo o relatório de carga tributária no Brasil, realizado pela Receita Federal do Brasil (RFD, 2017) para o ano de 2014, observa-se que o imposto cobrado pela renda chega a 18,02%, enquanto que para a folha de salários chega a 25,8%. Somados, estes impostos chegam a 43,2%.

O número de empregados é obtido por meio da quantidade de motoristas necessários para transportar a soja e pelo número de funcionários que atuam nas empresas concessionárias do transporte ferroviário. Ambas as quantidades de empregados são alocadas para o período de embarque da safra de soja, que dura sete meses.

Para o setor social como doador, foi escolhido como indicador o número de empregos e como receptor do setor social foi escolhido o indicador salário pago aos trabalhadores.

Com a retomada da valorização do ser humano, a sociedade faz a empresa redefinir paulatinamente a sua função social, não podendo mais considerar apenas a satisfação de seus acionistas, mas de toda a coletividade, contribuindo, desta forma, para a sua utilidade social, à justiça social e ao bem comum. O indicador número de empregos (equação 14) torna-se importante para mostrar a capacidade de absorção da mão de obra. O emprego tem o propósito de gerar resultados que possibilitem a satisfação não só de necessidades relativas à sobrevivência, como alimentação, vestuário, abrigo e manutenção da vida, mas também de necessidades sociais criadas pelo homem.

$$NU_{emp} = (E_{modal} / (CAP_v \times D_{iv})) \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

NU_{emp} = número de empregos por tonelada quilometro (empregos/ton.km);

E_{modal} = número de empregados por tipo de modal por rota;

CAP_v = capacidade de carga do modal(ton);

D_{iv} = distância de ida e volta para cada rota(km)

O salário é o valor dado pelo empregador para o trabalhador que cumprir a sua jornada laboral (Equações 15 e 16). Essa remuneração varia de acordo com o que foi definido no contrato de trabalho e, geralmente, é representada pelo salário-base, além das comissões, vale-transporte, gratificações e outros benefícios. Considera-se o valor máximo de R\$ 2.981,00/mês para o motorista de caminhão de uma empresa de grande porte, segundo o site nacional de empregos (SINE, 2017), e R\$ 3.000,00/mês como salário médio dos funcionários da empresa ferroviária MRS, segundo dados da empresa.

Para o transporte rodoviário:

$$Sar_{empreg_{perc}} = (Nr_f \times Sal_{rod_f} \times Aj_p) / (CAP_{caminhão} \times D_{iv}) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$Sar_{empreg_{perc}}$ = salário por empregado na rota percorrida

$CAP_{caminhão}$ = capacidade de carga do caminhão (ton)

D_{iv} = distância de ida e volta(km)

Aj_p = ajuste do salário para o período de 7 meses referente ao embarque da soja

Sal_{rod_f} = salário do funcionário no transporte rodoviário (R\$)

Nr_f = número de funcionários no transporte rodoviário

Para o transporte ferroviário:

Onde:

$$Sar_{empreg_{perc}} = (N_f \times Sal_{ferrov_f} \times Aj_p) / (CAP_{trem} \times D_{iv}) \quad \text{Equação 16}$$

CAP_{trem} = capacidade de carga das composições ferroviárias (toneladas)

Sal_{ferrov_f} = salário do funcionário no transporte ferroviário(R\$)

D_{iv} = distância de ida e volta(km)

A principal via de exposição ao monóxido de carbono é a respiratória e provoca intoxicações agudas que podem ser fatais devido à afinidade do CO com a hemoglobina contida nos glóbulos vermelhos do sangue. A toxicidade no homem se dá quando o CO entra em competição com o O₂ pela hemoglobina, reduzindo a liberação de O₂, diminuindo a quantidade de O₂ disponível nos tecidos, levando à morte por asfixia. Para o cálculo do monóxido de carbono, tanto para o transporte rodoviário como para o ferroviário (Equações 17 e 18), foram consideradas a emissão em kg de CO por quilômetro, bem como a capacidade de carga dos modais.

Para o transporte rodoviário:

$$CO_{\text{transp rodov}} = (CO_{r_{\text{km}}} / CAP_{\text{caminhão}}) \times Q_{\text{caminhões}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$CO_{r_{\text{km}}}$ = emissão em kg de CO por quilometro pelo transporte rodoviário (kg de CO/ton.km)

$CAP_{\text{caminhão}}$ = capacidade de carga do caminhão(ton)

$Q_{\text{caminhões}}$ = quantidade de caminhões em cada rota (número)

$CO_{\text{transp rodov}}$ = emissão de CO para o transporte rodoviário (kg de CO/ton.km)

Para o transporte ferroviário:

Onde:

$$CO_{\text{transp ferrov}} = (CO_{f_{\text{km}}} / CAP_{\text{trem}}) \times Q_{\text{ferrov}} \quad \text{Equação 18}$$

$CO_{\text{transp ferrov}}$ = emissão de CO para o transporte ferroviário (kg de CO/ton.km)

$CO_{f_{\text{km}}}$ = emissão em kg de CO por tonelada transportada (kg de CO/ton)

CAP_{trem} = capacidade de carga das composições ferroviárias (toneladas)

Q_{ferrov} = quantidade de composições ferroviárias (número de composições)

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2017), acidentes de trânsito são uma das principais causas de óbito no Brasil. Somente nas rodovias federais policiadas, no período entre 2007 e 2017, o país registrou 1.652.403 acidentes e 83.481 mortes. Em 2015, ocorreram 94 acidentes com caminhões, ocasionando o óbito na rota Mato Grosso ao porto de Santos. Segundo ANTT (2017), em 2015, ocorreram 136 acidentes com trens, levando a óbito. Dados do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil mostraram que o número de caminhões em 2015 envolvidos em acidentes atingiu o número de 24.547 veículos, enquanto que o

número de locomotivas atingiu o número de 966 para a rota Mato Grosso ao porto de Santos. Calculando o percentual de acidentes por caminhão, resultado da divisão do número de acidentes com caminhões pelo número de caminhões circulando em 2015, chega-se a 0,4% de acidentes/caminhão. Da mesma forma, dividindo-se o número de acidentes com locomotivas pela quantidade de locomotivas em circulação no ano de 2015, obtém-se o percentual de 14% de acidentes/trem. Estes percentuais são usados para o cálculo do número de acidentes (Equações 19 e 20).

Para o transporte rodoviário:

$$\text{Acidentes}_{rodov} = (\text{Perc}_{acid\ rodov} \times Q_{caminh\tilde{o}es}) / \text{CAP}_{caminh\tilde{o}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$\text{Perc}_{acid\ rodov}$ = percentual de acidentes por caminhão (%)

$Q_{caminh\tilde{o}es}$ = quantidade de caminhões em cada rota (número de caminhões)

$\text{CAP}_{caminh\tilde{o}}$ = capacidade de carga do caminhão(ton.km);

Para o transporte ferroviário:

$$\text{Acidentes}_{ferrov} = (\text{Perc}_{acid\ ferrov} \times Q_{locomotivas}) / \text{CAP}_{trem} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$\text{Perc}_{acid\ ferrov}$ = percentual de acidentes por locomotivas (%)

$Q_{locomotivas}$ = quantidade de locomotivas em cada rota (número de locomotivas)

CAP_{trem} = capacidade de carga das composições ferroviárias (ton.km)

A etapa seguinte do Estágio 2 do procedimento é cálculo dos indicadores. O primeiro indicador é a emergia.

O primeiro passo para o cálculo da emergia consiste na elaboração de um diagrama do sistema estudado, conforme Figura 19, já mostrada, e que servirá de base para as etapas seguintes. Na primeira etapa, o diagrama proposto deve conter todas as entradas de fluxos de energia (J), massa (kg ou g) e monetários (R\$) do sistema, utilizando, para isto, símbolos desenvolvidos por Odum (1996).

A segunda etapa do cálculo da emergia é a elaboração de uma tabela que contenha todos os valores calculados dos fluxos de entrada do sistema. Cada fluxo de energia que entra pela fronteira do sistema é representado por uma linha. No estudo de caso do sistema rodoviário, são considerados os materiais utilizados na construção do caminhão e das rodovias. A tabela também é composta por sete colunas. A primeira coluna é a referência numérica do fluxo, a segunda, a referência

nominal, a terceira consta a quantidade de material, a quarta, a unidade de medida, a quinta, o valor da unidade de emergia, a sexta, o valor resultante da multiplicação da quantidade de material pelo valor da unidade de emergia, e a sétima coluna, a porcentagem do fluxo de emergia em relação ao total. No estudo de caso do sistema ferroviário, aplica-se uma tabela similar, sendo considerados os materiais utilizados na construção da locomotiva, vagões e estrada de ferro. Para isso, realiza-se o cálculo de todos os itens e suas respectivas quantidades relativos à infraestrutura da locomotiva/vagões, da ferrovia, do terminal rodoferroviário e das operações.

A Tabela 13 apresenta a tabela de emergia do transporte rodoviário de soja de MT ao porto de Santos, conforme o Apêndice A.

Tabela 13: Avaliação em emergia do transporte rodoviário de soja dos municípios produtores até o porto de Santos. Memorial de cálculo é apresentado no apêndice A.

Nota	Item	Quantidade	Unid/ano	UEV (sej/Unid.)	Emergia (sej/ano)	Emergia (%)
Infraestrutura: Caminhão						
1	Aço	1,64E+10	g	7,81E+09	1,28E+20	2,3
2	Alumínio	1,41E+09	g	2,13E+10	3,01E+19	0,5
3	Borracha	1,39E+09	g	7,22E+09	1,00E+19	0,2
4	Plástico	1,88E+09	g	5,51E+09	1,03E+19	0,2
5	Vidro	7,06E+08	g	1,32E+10	9,32E+18	0,2
6	Cobre	3,41E+08	g	9,80E+10	3,34E+19	0,6
7	Zinco	1,22E+08	g	7,20E+10	8,77E+18	0,2
8	Serviços	0,00	USD	4,24E+12	0,00	0,0
Infraestrutura: Rodovia						
9	Asfalto	3.93E+10	g	2,55E+10	1,00E+21	17,9
10	Brita	9,73E+10	g	1,68E+09	1,63E+20	2,9
11	Calcário	1,03E+11	g	9,59E+09	9,88E+20	17,7
12	Areia	1,15E+11	g	1,68E+09	1,93E+20	3,5
13	Solo	1,36E+11	g	1,68E+09	2,28E+20	4,1
14	Serviços	0,00	USD	4,24E+12	0,00	0,0
Operação						
15	Diesel	1,47E+16	J	1,81E+05	2,67E+21	47,76
16	Mão de obra	9,12E+12	J	1,24E+07	1,13E+20	2,0
17	Serviços	0,00	USD	4,24E+12	0,00	0,0
Total =					5,59E+21	100,0

Os percentuais finais de representatividade sobre a emergia total demandada pelo sistema apontam que o diesel é o recurso mais utilizado, com aproximadamente

47,76%, seguido por asfalto 17,9%, calcário com 17,7%, solo com 4,1%, areia com 3,5%, brita com 2,9%, aço com 2,3% e mão de obra com 2,0 %; os outros recursos juntos totalizam menos de 2%. Estes números podem ser úteis em uma potencial gestão de recursos, onde deve-se ter esta ordem de prioridade de ações para maximizar a redução da demanda total de energia; por exemplo, primeiramente, dever-se-ia reduzir o consumo de diesel utilizado na fase de operação do transporte de soja via rodovia.

Com procedimento semelhante, a Tabela 14, conforme Apêndice B apresenta a tabela em energia do transporte de soja do terminal em Rondonópolis até o Porto de Santos. Os resultados mostram que a representatividade sobre o total de energia demandado pelo sistema de transporte ferroviário possui a seguinte hierarquia: ferro com 57,3%, brita com 29,6%, aço com 4,8%, madeira com 2,9%, diesel com 1,9%, asfalto com 1,4%, eletricidade com 1,2% e demais itens todos abaixo de 1%. Assim, para o sistema rodoviário, há uma grande participação do “diesel” no cálculo da energia, enquanto que para o sistema ferroviário, o item “ferro” da infraestrutura tem grande influência no cálculo da energia.

Alguns analistas em energia argumentam que o item ‘serviços’ não deveria ser considerado nas avaliações devido a todas as incertezas e subjetividades oriundas do valor de mercado dos recursos, que englobam basicamente a disposição a pagar pelo bem ou serviço. De qualquer forma, este presente trabalho considera a abordagem sugerida por Brown e Ulgiati (2010), que busca evitar o uso incorreto de uma UEV para um item que pode ser contabilizado como sua unidade física (energia e material) e como seu valor monetário – ou usando o valor completo do item já contemplando serviços; este último foi o considerado neste trabalho, por isso, o item serviço tem energia igual a zero nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 14: Avaliação em energia do transporte ferroviário de soja de Rondonópolis, em Mato Grosso, até o porto de Santos. Memorial de cálculo é apresentado no Apêndice B.

Nota	Item	Quantidade	Unid./ano	UEV (sej/Unid.)	Energia (sej/ano)	Energia (%)
Infraestrutura:						
Locomotiva e vagões						
1	Aço	1,36E+09	g	7,81E+09	1,06E+19	4,8
2	Ferro	7,17E+07	g	5,78E+09	4,14E+17	0,2
3	Serviços	0,00	USD	4,24E+12	0,0	0,0
Infraestrutura: Ferrovia						
4	Brita	3,90E+10	g	1,68E+09	6,55E+19	29,6
5	Ferro	2,19E+10	g	5,78E+09	1,27E+20	57,3
6	Madeira	7,23E+09	g	8,80E+08	6,36E+18	2,9
7	Solo	3,12E+07	g	1,68E+09	5,24E+16	<1
8	Serviços	0,0	USD	4,24E+12	0,0	0,0
Infraestrutura:						
Terminal ferroviário						
9	Aço	4,40E+06	g	7,81E+09	3,44E+16	<1
10	Concreto	6,68E+06	g	2,42E+09	1,62E+16	<1
11	Fibrocimento	1,78E+06	g	2,07E+09	3,68E+15	<1
12	Asfalto	5,66E+07	g	2,55E+10	3,09E+18	<1
13	Borracha	3,61E+06	g	7,22E+09	2,61E+16	<1
14	Alumínio	7,10E+04	g	2,13E+10	1,51E+15	<1
15	Serviços	0,0	USD	4,24E+12	0,0	0,0
Operação						
16	Diesel	2,34E+13	J	1,85E+05	4,24E+18	1,9
17	Mão de obra	1,09E+11	J	1,24E+07	1,35E+18	<1
18	Elettricidade	1,74E+13	J	1,45E+05	2,56E+18	1,2
19	Serviços	0,0	USD	4,24E+12	0,0	0,0
Total =					2,21E+20	100,0

De acordo com as Tabelas 16 e 17, mostradas mais adiante, o transporte ferroviário demanda anualmente menor quantidade de energia para transportar 12 milhões de toneladas de soja em sete meses comparado ao sistema rodoviário (2,21 E+20 sej/ano contra 5,59 E+21 sej/ano). Porém, este número não indica a real energia do sistema estudado com base em uma unidade funcional, uma vez que os percursos realizados (distâncias) e o peso da carga transportada (toneladas) ainda não foram considerados.

Isso é importante porque as comparações devem ser realizadas considerando a mesma unidade funcional para todos os indicadores. Isso é importante porque as

comparações devem ser realizadas considerando a mesma unidade funcional para todos os indicadores. De qualquer forma, esta etapa de cálculo em sej/ano é necessária, pois, enquanto alguns recursos dependem da quantidade de soja transportada como número de caminhões, trens e vagões, outros itens não dependem da quantidade de soja transportada, como rodovias e trilhos.

Assim, após obter a emergia total em sej/ano para os dois sistemas, estes valores agora precisam ser convertidos nas unidades de sej/ton.km para permitir a comparação entre ambos. O Apêndice D apresenta estes cálculos detalhados, o que resulta nos seguintes indicadores: $4,80 \text{ E}+5$ sej/ton.km para o sistema rodoviário e $3,70 \text{ E}+6$ sej/ton.km para o sistema ferroviário. Acrescentando-se, ainda, a média dos trajetos de caminhão dos polos produtores ao Terminal de Rondonópolis, chega-se ao valor de $4,81 \text{ E}+6$ sej/ton.km para sistema ferroviário¹.

Estes indicadores mostram que, enquanto a rota ferroviária demanda $48,1 \text{ E}+5$ sej para transportar 1 tonelada de soja por 1 quilômetro, a rota rodoviária demanda $4,80 \text{ E}+5$ sej para realizar o mesmo trabalho, um valor aproximadamente 10 vezes inferior. Isso indica a melhor eficiência global em emergia para a rota rodoviária em relação à ferroviária.

Para efeito de comparação, Federici et al. (2003) aplicaram quatro diferentes métodos científicos (incluindo a contabilidade ambiental em emergia) para avaliar o desempenho de sistemas de transporte rodoviário e ferroviário de passageiros na Itália. Focando nos resultados em emergia, o sistema rodoviário obteve uma demanda de $2,37 \text{ E}+11$ sej/ton.km, enquanto que o ferroviário $4,17 \text{ E}+11$ sej/ton.km, indicando melhor eficiência global em emergia para o sistema rodoviário; neste caso, o rodoviário superou o ferroviário em aproximadamente 1,7 vezes.

Em 2008, os mesmos autores (FEDERICI et al., 2008) realizaram estudo similar na Itália para avaliar os aspectos energético-ambientais do transporte de passageiros entre as cidades de Milão e Napoli via rodoviário e ferroviário. Uma abordagem multimétrica foi considerada pelos autores, mas focando nos resultados obtidos pela contabilidade ambiental em emergia. Os números indicam melhor eficiência global

¹ Eficiência global do sistema ferroviário = $3,70\text{E}+6 + (3,57\text{E}+21\text{sej/ano}) / [(2,70 \text{ E}+08 \text{ km/ano}).(12.153.906 \text{ ton})] = 4,81\text{E}+6 \text{ sej/ton.km}$

para o sistema de transporte rodoviário ($1,1E+11$ sej/ton.km) em relação ao ferroviário ($14,3E+11$ sej/ton.km) em aproximadamente 13 vezes.

O segundo indicador é a área de influência. Para o sistema rodoviário, tem-se área equivalente de 4.000.000 de m²/km para 1 km da rota, que compreende à distância dos centros produtores da soja até o Terminal de Rondonópolis (rota #1). Considera-se 2 km para cada lado do eixo da pista, conforme sugerido pelo DNIT. Assim, em uma distância média de 534 km (rota # 1) tem-se uma área de influência total de 2.136.000.000 de m²/km. De acordo com a CNT (2017), a frota de caminhões em relação ao total de veículos circulantes nas estradas representou 6%. Alocando a metragem para este percentual, chega-se a 128.160.000 m²/km. Dividindo-se este valor pelo total de toneladas transportadas em 7 meses, que é 12.153.906, chega-se ao valor de 10,54 m²/ton.km

Para a rota que compreende a distância do Terminal Rondonópolis até o porto de Santos (rota #2), em 1 km, tem-se a área quadrada equivalente de 40.000 m²/km. Considera-se 20 metros para cada lado do eixo da pista, conforme sugerido pelo DNIT. Considerando a distância de 1446 km, chega-se a 57.840.000 m²/km. Para se alocar a taxa de ocupação da ferrovia, calcula-se o quociente entre o percurso percorrido durante o ano de 2015 pelo percurso percorrido durante a safra no mesmo ano. De acordo com a CNT (2017), o percurso percorrido pela concessionária MRS foi de 45.792 km no ano de 2015. Considerando que para o período da safra de 7 meses são percorridos 16.701,5 km chega-se a um percentual de ocupação da ferrovia de 36,47%. Alocando este percentual para a metragem chega-se a uma ocupação de 20.822.400 m²/km. Dividindo este valor pelo total de toneladas transportadas em 7 meses, que é 12.153.906, chega-se a 1,71 m²/tn.km. Somando a rota # 1 mais a rota # 2, chega-se ao total de 12,25 m²/ton.km para o sistema ferroviário.

Para o sistema rodoviário, que considera a rota a distância dos centros produtores ao porto de Santos (rota # 3) em 1 km, tem-se 4.000.000 m²/km. Em uma distância média de 1891 km, tem-se 7.564.000.000 m²/km. Alocando os 6%, chega-se a 453.840.000 m²/km. Dividindo-se este valor por 12.153.906 de toneladas transportadas em sete meses, chega-se a 37,34 m²/ton.km para o sistema rodoviário.

O terceiro indicador é o Potencial de Aquecimento (Equação 21).

$$\text{Potencial de aquecimento global (kgCO}_2\text{-eq)} = \sum PAg_i \times m_i \quad \text{Equação 21}$$

Onde: PAG = potencial de aquecimento para o CO₂, CH₄ e N₂O

mi = kg de CO₂, CH₄ e N₂O

Utilizando o programa brasileiro Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) com o caminhão carregado de 48 ton de soja e percorrendo a distância média de 1068km de ida e volta na rota # 1 (municípios produtores ao terminal Rondonópolis), é possível obter as seguintes quantidade de gases emitidos pela combustão do diesel: 3.671 kgCO₂; 0,2 kgCH₄; e 0,2 kgN₂O. Multiplicando pelos fatores de aquecimento global, tem-se: $GWP_{rota \#1} = (3.671 \times 1) + (75 \times 0,2) + (298 \times 0,2) = 3.735,60 \text{ kgCO}_{2eq}$. Dividindo-se este valor por 1068km e por 48 ton chega-se ao valor de 0,07 kgCO_{2eq}/ton.km.. Finalmente, multiplica-se pela quantidade de 5258 caminhões, chegando-se ao valor de 383,83 kgCO_{2eq}/ton.km.

Utilizando o programa brasileiro GHG Protocol para a rota # 2 com capacidade de 7200 ton e trecho ida e volta de 2892 km (ferroviário do terminal de Rondonópolis ao porto de Santos), é possível obter os seguintes valores em kg de CO₂, CH₄ e N₂O: CO₂ = 251.222 kg; CH₄ = 17 kg; N₂O = 2 kg.

Total CO₂equiv = $(251,22 \times 1) + (75 \times 17) + (298 \times 2) = 2.122,22 \text{ kgCO}_{2eq}$.

Dividindo-se este resultado pela tonelagem e distância, e depois multiplicando pelo número de composições, chega-se ao resultado de 0,015 kg de CO_{2eq}/ton.km. O total do sistema ferroviário é de 383,84 kgCO_{2eq}/ton.km.

Em relação à rota # 3 (municípios produtores ao porto de Santos), é considerado o caminhão com capacidade de 48 ton e a quilometragem média de ida e volta de 3.782 km, os seguintes valores em kg de CO₂, CH₄ e N₂O: CO₂ = 13.885 kg; CH₄ = 0,7 kg; N₂O = 0,7 kg.

Total CO₂equiv = $(13.885 \times 1) + (75 \times 0,7) + (298 \times 0,7) = 14.146,10 \text{ kg de CO}_{2eq}$.

Dividindo-se este resultado pela tonelagem e distância, e depois multiplicando pelo número de caminhões na rota # 3, que é de 15.882 caminhões, chega-se ao resultado de 1.222,91 kg de CO_{2eq}/ton.km para o sistema rodoviário.

O quarto indicador é o potencial de acidificação (Equação 22)

Potencial de acidificação (kgSO₂-equivalente) = $\sum PA_i \times m_i$ Equação 22

Onde: PA = potencial de acidificação para o SO₂ e NO_x

mi = kg de SO₂ e NO_x/km

Para a rota # 1, tem-se 48 ton e trecho médio de ida e volta de 1.068 km. Com base nestes dados, tem-se $2,20 \text{ E-}08 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$. Este valor deve ser multiplicado pela quantidade de caminhões referentes ao período de sete meses, que é de 5.258 (Apêndice C). O resultado é de $1,16 \text{ E-}04 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$. Para a rota # 2, tem-se 7.200 toneladas e trecho de ida e volta de 2892 km, chegando-se a $5,43\text{E-}11 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$. Multiplicando-se este resultado pela quantidade de 146 composições, chega-se ao valor de $7,92\text{E-}9 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$. O total para o sistema ferroviário é de $1,16 \text{ E-}04 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$.

Em relação ao kg de NOx/km para rota # 1, divide-se $12,8\text{E-}03$ por 48 e por 1.068, sendo depois multiplicado por 5.258, que dá $1,31\text{E-}03$. Para a rota # 2, divide-se $12,8\text{E-}03$ por 7.200 e por 2.892 que resulta em $6,15\text{E-}10$. Multiplicando este valor por 146 composições, tem-se $8,97\text{E-}08$ (rota #2). Somando $1,31\text{E-}03$ mais $8,97\text{E-}08$, chega-se a $1,33\text{E-}03 \text{ kg NOx/ton.km}$ para o sistema ferroviário.

Em relação ao sistema rodoviário que adota a rota # 3 com caminhão de capacidade de 48 ton e distância média de ida e volta de 3.782, os valores totais de SO₂ e NOx são, respectivamente, $6,22 \text{ E-}09 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$ e $7,04 \text{ E-}08 \text{ kg de NOx/ton.km}$. Multiplicando-se estes resultados pela quantidade de caminhões de 15.882, chega-se respectivamente aos valores de $9,89\text{E-}05 \text{ kg de SO}_2/\text{ton.km}$ e $1,12\text{E-}03 \text{ kg de NOx/ton.km}$.

O potencial de acidificação (PA) pode ser estimado através do produto da quantidade de gases emitidos pelo fator de acidificação de cada gás.

Para o sistema ferroviário, tem-se:

$$PA = (1,16\text{E-}04 \times 1) + (1,33\text{E-}03 \times 0,88) = 1,27 \text{ E-}03 \text{ kgSO}_{2\text{eq}}/\text{ton.km}.$$

Para o sistema rodoviário, tem-se: $PA = (9,89\text{E-}05 \times 1) + (1,12 \text{ E-}03 \times 0,88) = 1,08 \text{ E-}03 \text{ kgSO}_{2\text{eq}}/\text{ton.km}$.

Em relação a trabalhos semelhantes a este referente a indicadores ligados às emissões, Uherek et al. (2010) realizaram uma avaliação das emissões do transporte terrestre, dos seus impactos na composição atmosférica e na qualidade do ar, em saúde humana e mudanças climáticas e sobre opções de mitigação. Segundo os autores, um impacto climático de curto a médio prazo vem das emissões de gases não-CO₂ de curta duração. Estes incluem óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), partículas (PM), carbono preto (BC) e emissões fugitivas de hidrocarbonetos do combustível. Reduzir a intensidade líquida

de carbono (por conteúdo energético) dos combustíveis é uma maneira para atenuar as mudanças climáticas do setor de transportes.

Sim (2017) criou um modelo de redução de emissão de carbono levando em consideração a quantidade total de carga por tonelada/quilômetro e a quantidade de kg de CO₂ emitida em relação ao tipo ou tamanho de caminhão. O total de emissões de cada tipo de caminhão é calculado pelo produto da quantidade total de carga em ton.km pela quantidade de kg de CO₂ emitida em relação a cada tipo de caminhão.

O quinto indicador é a receita do transportador (Equação 23).

$$R_t = ((\sum_{i=1,2} (F_t / D_{iv})) \times Q_v) \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

R_t = receita do transportador (R\$/ton.km)

F_t = frete do modal (R\$/ton)

D_{iv} = distância de ida e volta para cada rota(km)

Q_v = quantidade de caminhões e composições ferroviárias

$I = 1,2$, onde 1 é o sistema rodoferroviário e 2 o sistema rodoviário

Para calcular a receita do transportador em R\$/ton.km, é necessário inicialmente saber qual é o valor do frete rodoviário e ferroviário correspondente às distâncias percorridas.

Estas informações estão fornecidas na Tabela 15.

Tabela 15: Valor do frete em função das distâncias médias percorridas

Modal	Distância percorrida (km)	Valor do frete (R\$/ton)
Rodoviário (Rota 1)	1068	114
Rodoviário (Rota 3)	3782	295
Ferrovário (Rota 2)	2892	160

Fonte: Esalq Log e Imea (2017)

Segundo o ESALQ-LOG (2017), através do site <http://esalqlog.esalq.usp.br/>, o valor do frete rodoviário de Sorriso ao terminal de Rondonópolis é de R\$ 114,00/ton. Para o caso da rota # 1, tem-se R\$ 114,00/ton divididos pela distância média de 1.068 km (ida e volta), obtendo-se o valor de R\$ 0,11/ton.km, e depois multiplica-se pela

quantidade de caminhões da rota, que é de 5.258, obtendo-se o valor de R\$ 578,38/ton.km.

Para a rota # 2, que considera o trajeto de Rondonópolis até o porto de Santos, o frete ferroviário, segundo IMEA (2017), é de R\$ 160,00/ton dividido por 2892 km (ida e volta), obtendo-se o valor de R\$0,05/ton.km relativo a uma composição. Como o número de composições é de 146, o resultado final é de R\$ 7,30/ton.km, chegando-se um valor total para o sistema rodoferroviário de R\$ 585,68/ton.km.

Somando a rota # 1 mais a rota # 2, chega-se ao valor de R\$ 585,68/ton.km para o sistema ferroviário.

Segundo a ESALQ-LOG (2017), o valor do frete rodoviário de Mato Grosso ao porto de Santos é de R\$ 295,00/ton. Para a rota # 3, adota-se o frete de R\$ 295,00/ton e divide-se pela distância média de 3782 km (ida e volta), chegando-se ao valor de R\$0,08/ton.km, que depois é multiplicado por 15.882 caminhões, obtendo-se o valor final de R\$ 1.270,56/ton.km para o sistema rodoviário.

O sexto indicador é o lucro por empregado (Equação 24).

$$L_{emp} = L_{liq} / (CAP_v \times N_{emp}) \quad \text{Equação 24}$$

$$L_{liq} = R_{ec} - I_{mp}$$

$$L_{emp} = \text{lucro por empregado (R\$/ton.km)}$$

$$L_{liq} = \text{lucro líquido após pagar todos impostos}$$

$$N_{emp} = \text{número de empregados utilizados}$$

$$R_{ec} = \text{receita da empresa (R\%)}$$

$$I_{mp} = \text{total de impostos (R\%)}$$

$$CAP_v = \text{capacidade de carga do modal (ton.km)}$$

Para o caso da rota # 1, tem-se o frete de R\$ 114,00/ton que, multiplicado pela quantidade de 12.153.906 ton, chega-se a R\$ 1.385.545.284,00. Deste valor, subtrai-se 43,2% de impostos, chegando-se a R\$ 786.989.721,31, que é o lucro líquido. Em seguida, este valor é dividido pelo número de empregados, que é de 5258, chegando-se a R\$ 149.674,72/empregado. Em seguida, divide-se pela tonelagem de 48 ton pela distância média de ida de 534 km, chegando-se a um lucro por empregado de R\$ 5,83/ton.km.

Para a rota # 2, com o valor do frete de R\$ 160,00/ton, chega-se ao valor de R\$ 1.944.624.960,00. Subtraindo-se impostos e despesas, chega-se a R\$ 1.104.546.977,28, que é o lucro líquido. Em seguida, este valor é dividido pelo número de empregados no transporte ferroviário da empresa MRS, que é de 6.000, chegando-se a R\$ 184.091,16/empregado. Alocando para o período de 7/12, chega-se a R\$ 107.386,51/empregado. Finalmente, divide-se este valor pela capacidade de transporte ferroviário, que é de 7.200 ton, e pela distância de ida, que é 1446 km. O resultado é R\$ 0,01/ton.km. Para o sistema ferroviário, chega-se ao resultado final de R\$ 5,84 por empregado/ton.km.

Para o sistema de transporte rodoviário diretamente dos municípios produtores ao porto de Santos (rota # 3), multiplica-se o frete de R\$ 295,00 pela tonelagem mensal transportada, chegando-se a R\$ 3.585.402,27. Sobre este valor, subtrai-se 43,2% de impostos e despesas, chegando-se a R\$ 2.036.508,36. Em seguida, divide-se este valor pelo número total de empregados, que é de 15.882, chegando-se a R\$ 128.227,45/empregado. Finalmente, divide-se este valor pela capacidade de 48 ton do caminhão e pela distância média de ida, que é de 1.891, chegando-se a R\$ 1,41 por empregado/ton.km para o sistema rodoviário.

O sétimo indicador é o número de empregados (Equação 25).

$$NU_{emp} = (E_{modal} / (CAP_v \times D_{iv})) \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

NU_{emp} = número de empregos por tonelada quilômetro (empregos/ton.km)

E_{modal} = número de empregados por tipo de modal por rota

CAP_v = capacidade de carga do modal (ton)

D_{iv} = distância de ida e volta para cada rota (km)

Para o sistema rodoviário da rota # 1, são considerados o número de 5.258 empregos, conforme cálculo no apêndice C para o transporte da soja da região produtora até o terminal de Rondonópolis. Dividindo-se esta quantidade de empregados pela capacidade do caminhão de 48 ton e pela distância média de ida e volta de 1.068 km, chega-se a 0,10 empregados/ton.km. Para a rota # 2, de Rondonópolis ao porto de Santos, considera-se a quantidade de 3.480 funcionários alocados no período de sete meses, conforme dados obtidos pelo site da empresa

MRS. Este valor é dividido pela capacidade da composição de 7.200 ton e pela distância de ida e volta de 2.892 km. O resultado obtido é de 0,0002 empregados/ton.km. Portanto, para o sistema ferroviário o total é 0,11 empregados/ton.km.

Para o sistema rodoviário (rota # 3) adota-se a quantidade de 15.882 empregos referentes a mesma quantidade de caminhões necessários para transportar a mesma quantidade de soja durante o período de sete meses da safra diretamente da região produtora de soja até o porto de Santos. Este valor é dividido pela capacidade de 48 ton e pela distância média de ida e volta de 3.782 km. O resultado obtido é de 0,09 empregado/ton.km para o sistema rodoviário.

O oitavo indicador é salário pago aos trabalhadores (Equações 26 e 27).

Para o transporte rodoviário:

$$\text{Sar empreg}_{perc} = (\text{Nr}_f \times \text{Sal rod}_f \times \text{Aj}_p) / (\text{CAP}_{\text{caminhão}} \times \text{D}_{iv}) \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

Sar empreg_{perc} = salário por empregado na rota percorrida

$\text{CAP}_{\text{caminhão}}$ = capacidade de carga do caminhão (ton);

D_{iv} = distância de ida e volta (km)

Aj_p = ajuste do salário para o período de sete meses referente ao embarque da soja

Sal rod_f = salário do funcionário no transporte rodoviário

Nr_f = número de funcionários no transporte rodoviário

Para o transporte ferroviário:

$$\text{Sar empreg}_{perc} = (\text{N}_f \times \text{Sal ferrov}_f \times \text{Aj}_p) / (\text{CAP}_{\text{trem}} \times \text{D}_{iv}) \quad \text{Equação 27}$$

CAP_{trem} = capacidade de carga das composições ferroviárias

Sal ferrov_f = salário do funcionário no transporte ferroviário

D_{iv} = distância de ida e volta (km)

Para a rota # 1, inicialmente multiplica-se o número de motoristas, de 5.258 conforme cálculo no apêndice C, pelo valor do salário, chegando-se a R\$ 15.674.098,00. Para o período de sete meses, chega-se ao valor de R\$ 109.718.686,00. Em seguida, divide-se este valor pela capacidade do caminhão de

48 ton e pela distância média percorrida de ida e volta de 1.068 km, chegando-se a R\$ 2.140,26/ton.km

Para a rota # 2, é considerado a quantidade de 3.480 empregos diretos alocados ao período de sete meses que atuam na empresa com um salário médio de R\$ 3.000,00/mês, gerando um montante de R\$ 18.000.000,00/mês. Para o período de sete meses, chega-se a 126.000.000,00. Este valor é dividido por 7.200 ton. por viagem e por 2.892 km, que é a distância de ida e volta. O resultado é de R\$ 6,05/ton.km. Somando o valor da rota # 1 mais a rota # 2, obtém-se o valor de R\$ 2.146,05/ton.km para o sistema ferroviário.

Para a rota # 3, multiplica-se a quantidade de motoristas, que é 15.882, pelo salário médio de R\$ 2.981,00/mês e chega-se ao valor de R\$ 45.914.862,00/mês. Para o período de sete meses de safra, chega-se ao valor de R\$ 321.404.034,00. Este valor é dividido por 48 toneladas, que é a capacidade do caminhão, e depois por 3.782 km, que é a distância média de ida e volta. O resultado obtido é de R\$ 1.825,58/ton.km para o sistema rodoviário. Os resultados foram organizados conforme Tabela 16, onde os 10 (dez) indicadores pertencentes aos cinco setores estão relacionados.

O nono indicador é a emissão de CO (Equações 28 e 29)

Para o transporte rodoviário:

$$CO_{\text{transp rodov}} = (CO_{r_{\text{km}}} / CAP_{\text{caminhão}}) \times Q_{\text{caminhões}} \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

$CO_{r_{\text{km}}}$ = emissão em kg de CO por quilometro pelo transporte rodoviário

$CAP_{\text{caminhão}}$ = capacidade de carga do caminhão(ton)

$Q_{\text{caminhões}}$ = quantidade de caminhões em cada rota

$CO_{\text{transp rodov}}$ = emissão de CO para o transporte rodoviário (kg de CO/ton.km)

Para o transporte ferroviário:

Onde:

$$CO_{\text{transp ferrov}} = (CO_{f_{\text{km}}} / CAP_{\text{trem}}) \times Q_{\text{ferrov}} \quad \text{Equação 29}$$

$CO_{\text{transp ferrov}}$ = emissão de CO para o transporte ferroviário (kg de CO/ton.km)

$CO_{f_{\text{km}}}$ = emissão em kg de CO por tonelada transportada

CAP_{trem} = capacidade de carga das composições ferroviárias

Q_{ferrov} = quantidade de composições ferroviárias

Para a rota # 1, tem-se 48 ton. por caminhão. Com base nestes dados, tem-se 4,69 E-05 kg de CO/ton.km. Para um total de 5.258 caminhões, tem-se o valor de 2,47E-01kg de CO/ton.km. Em relação ao transporte ferroviário para a rota # 2, segundo a Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2017), o fator de emissão das locomotivas é de 18 kg de CO/tonelada. Considerando a carga total transportada, sendo de 7.200 ton, chega-se ao valor de 2,5E-03 kg/ton.km. Considerando 146 composições, o valor total é de 0,36 kg de CO/ton.km. Ao valor total somando à rota # 1 mais a rota # 2 tem-se 6,10E-01 kg de CO/ton.km para o sistema ferroviário.

Para a rota # 3, tem-se 4,69 E-05 kg de CO/ton.km por caminhão. Considerando um total de 15.882 caminhões, chega-se ao valor de 7,45E-01 kg de CO/ton.km para o sistema rodoviário.

O décimo indicador é o número de acidentes (Equações 30 e 31).

Para o transporte rodoviário:

$$\text{Acidentes}_{\text{rodov}} = (\text{Perc}_{\text{acid rodov}} \times Q_{\text{caminhões}}) / \text{CAP}_{\text{caminhão}} \quad \text{Equação 30}$$

$\text{Perc}_{\text{acid rodov}}$ = percentual de acidentes por caminhão

$Q_{\text{caminhões}}$ = quantidade de caminhões em cada rota

$\text{CAP}_{\text{caminhão}}$ = capacidade de carga do caminhão (ton.km)

Para o transporte ferroviário:

$$\text{Acidentes}_{\text{ferrov}} = (\text{Perc}_{\text{acid ferrov}} \times Q_{\text{locomotivas}}) / \text{CAP}_{\text{trem}} \quad \text{Equação 31}$$

$\text{Perc}_{\text{acid ferrov}}$ = percentual de acidentes por locomotivas

$Q_{\text{locomotivas}}$ = quantidade de locomotivas em cada rota

CAP_{trem} = capacidade de carga das composições ferroviárias (ton.km)

Para a rota #1, inicialmente multiplica-se o número de caminhões de 5.258, conforme cálculo no apêndice C, pelo percentual de acidentes/caminhão (0,4%) na rodovia para a rota # 1 (em função da quilometragem percorrida), chegando-se a 19,98. Em seguida, divide-se este valor pela capacidade do caminhão de 48 ton para cada quilômetro de estrada, chegando-se a 0,42 acidentes/ton.km.

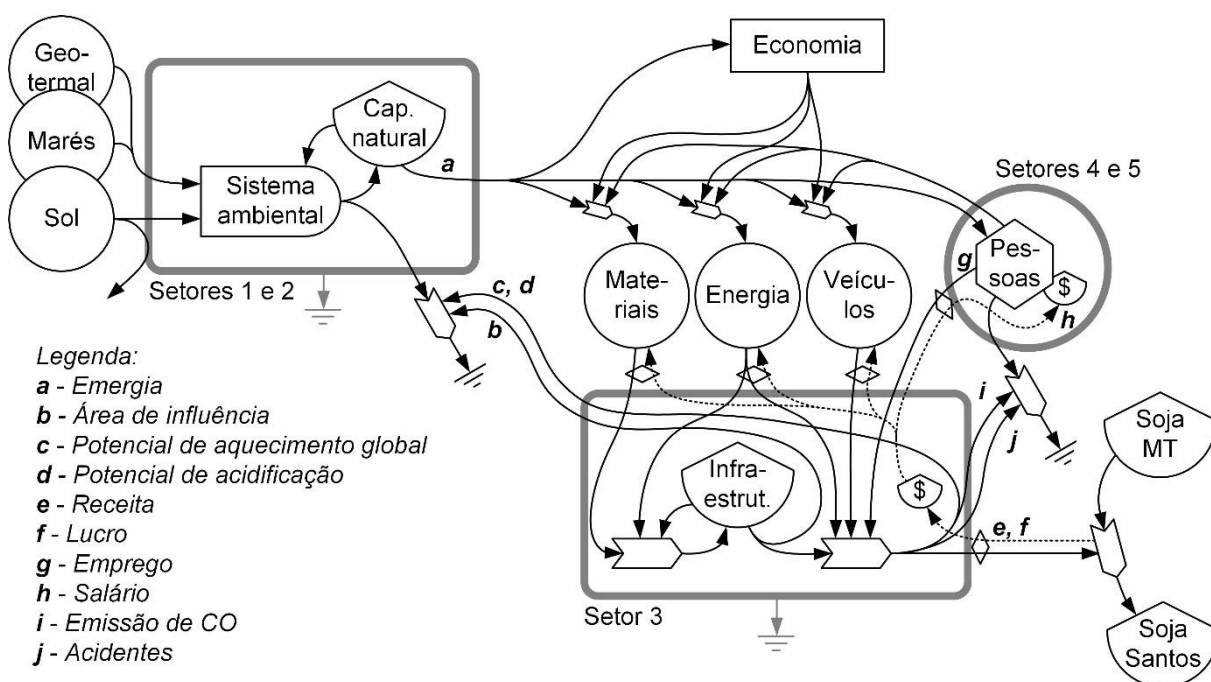
Para a rota # 2, multiplica-se o número de composições, que é de 146, pelo percentual de acidentes na ferrovia (em função da quilometragem percorrida), chegando-se a 20,44 acidentes. Em seguida, divide-se este valor pela capacidade da composição de 7.200 ton para cada quilômetro de ferrovia, chegando-se a 0,003

acidentes/ton.km. Somando o número de acidentes da rota # 1 mais a rota # 2, chega-se a 0,42 acidentes/ton.km.

Para a rota # 3, multiplica-se a quantidade de caminhões, que é 15.882, pelo percentual de acidentes na rota # 3 (em função da quilometragem percorrida), chegando-se a 60,35 acidentes. Em seguida, divide-se este valor pela capacidade do caminhão de 48 ton para quilômetro de estrada, chegando-se a 1,26 acidentes/ton.km.

Para melhor visualizar os indicadores escolhidos pelo modelo de sustentabilidade dos cinco setores (5SEnSU), foi elaborado o diagrama de energia integrando os sistemas com o 5SEnSU, conforme Figura 20.

Figura 20: Integração dos sistemas de transporte com o modelo 5SEnSU



O diagrama de energia deve ser elaborado com base no modelo de sustentabilidade 5SEnSU e permite identificar as entradas e saídas relativas às áreas ambiental, econômica e social. Pode-se notar o sistema ambiental como produtor de capital natural, sendo direcionado para economia e sociedade, que, por sua vez, transformam esses recursos em materiais, energia e veículos utilizados na infraestrutura de transporte. A receita oriunda do transporte da soja gera uma reserva monetária que retorna para as fontes de materiais, de energia, de veículos e de pessoas empregadas, que fornecem recursos para infraestrutura de transporte como

um todo. Pode-se, também, no diagrama de energia observar os indicadores utilizados que serão melhor detalhados no estágio 2 do procedimento.

Para área ambiental (setor 1), os indicadores área de influência e energia medindo as saídas de recursos são representados. É importante frisar que a energia está presente em todos os processos de transformação ocorridos na área econômica e social. Para área ambiental (setor 2), pode-se observar o retorno das emissões provenientes dos veículos utilizados no transporte, sendo medido pelos indicadores potencial de aquecimento global e potencial de acidificação. Para área econômica (setor 3), pode-se observar a entrada monetária, sendo medida pelos indicadores receita e lucro por empregado e resultado da entrega da soja. Para área social como doadora (setor 4), pode-se observar a entrada de mão de obra medida pelo indicador número de empregos e a saída como monetária medida pelo indicador salário. Para área social como receptora (setor 5), pode-se observar o retorno medido através dos indicadores emissão de CO e acidentes.

5.3 Estágio 3 – Quantificando a sustentabilidade

Os resultados dos indicadores foram organizados conforme Tabela 16, onde os 10 (dez) indicadores pertencentes aos 5 setores estão relacionados.

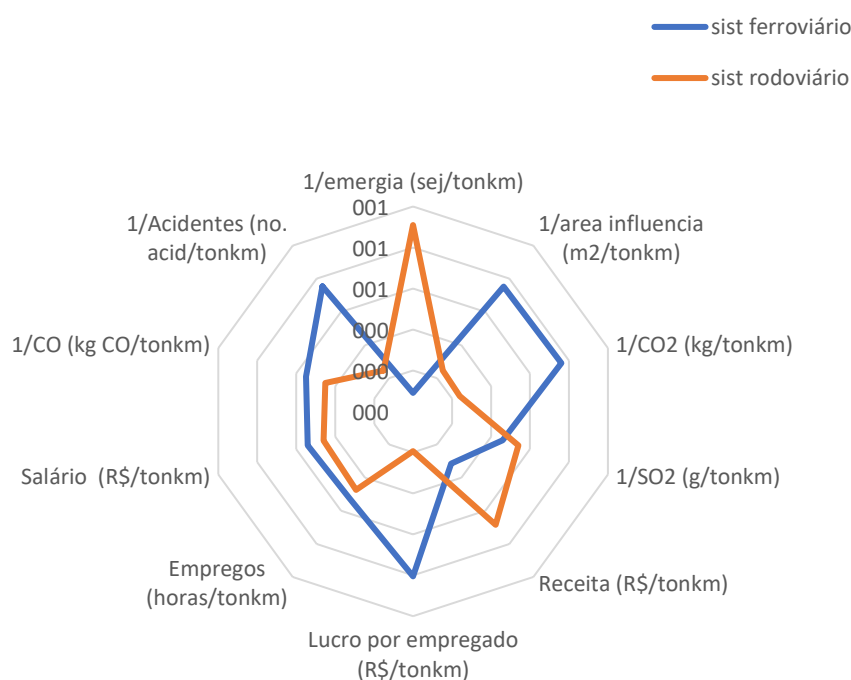
Tabela 16: Resumo dos indicadores por sistema de transporte

Indicador	Setor	Unidade/ton.km	Sistema ferroviário	Sistema rodoviário
Energia	S1	Sej	48,1E+05	4,80E+05
Área de influência	S1	m2	12,25	37,34
Potencial aquecimento	S2	kgCO _{2eq}	383,84	1.222,91
Potencial de acidificação	S2	kgSO _{2eq}	1,27E-03	1,08E-03
Receita transportador	S3	R\$	585,68	1.270,56
Lucro por empregado	S3	R\$	5,84	1,41
Número de empregos	S4	Empregos	0,10	0,09
Salário pago aos trabalhadores	S4	R\$	2.146,05	1.825,58
Emissão de CO	S5	kgCO	6,10E-01	7,45E-01
Número de acidentes	S5	acidentes	0,42	1,26

No presente estudo, todos os indicadores são considerados com a mesma importância para o conceito de sustentabilidade, ou seja, os pesos não foram aqui considerados e nem metas apenas para os resultados dos indicadores. Neste caso, os resultados dos indicadores de cada sistema são normalizados e colocados em forma de gráfico radar para dar suporte à decisão. Para avaliar a sustentabilidade de cada sistema, observa-se a área apresentada no gráfico, indicando melhor desempenho geral aquela que apresentar maior área. Neste caso, o sistema ferroviário apresentou a maior área, sendo o sistema de maior sustentabilidade.

Segundo Ulgiati et al. (2011), como os indicadores possuem dimensões e escalas diferentes, faz-se necessária a normalização dos resultados. Antes da normalização, os indicadores que se desejam minimizar foram invertidos para que na representação gráfica tenha-se a compreensão de que a maior área represente o melhor desempenho geral. Observando a Figura 21, pode-se verificar que o sistema ferroviário possui melhor desempenho para os indicadores área de influência, potencial de aquecimento, lucro por empregado, número de empregos, salário pagos aos trabalhadores, emissão de CO e acidentes, enquanto que o rodoviário é melhor para os indicadores energia, potencial de acidificação e receita do transportador.

Figura 21: Gráfico comparativo dos 10 indicadores do modelo 5SEnSU para os sistemas ferroviário e rodoviário



A decisão pode parar aqui, mas se o analista quiser usar o goal programming para comparar os sistemas rodoviário e ferroviário atribuindo metas e pesos aos desvios, deve-se prosseguir com o procedimento conforme fluxograma da Figura 15. Para isso, deve-se iniciar escolhendo critérios para atribuição de pesos aos desvios dos indicadores. Os pesos dos desvios desejados dos indicadores dos setores social, econômico e ambiental são apresentados na Tabela 12. Quanto maior o peso aplicado às variáveis de desvio positivo ou negativa de cada indicador, menor é o valor do ISMES, resultando em um menor WSI, representando, assim, melhor sustentabilidade. Isto pode ser verificado através das equações 5 e 6 deste estudo. O cenário mais crítico seria adotar o menor peso possível para os desvios indesejados, desta forma, optou-se por atribuir pesos no valor 1 para estes desvios, a fim de estabelecer um comparativo com os pesos da Tabela 12. Desvio desejado significa que o resultado do indicador se aproxima numericamente do valor da meta. Desvio indesejado significa que o resultado do indicador se distancia numericamente do valor da meta.

O analista deve escolher algum critério citado na Tabela 12 que pode ser igualitário, hierárquico ou individualista. Em seguida, ele deve realizar o cálculo utilizando os pesos relacionados.

Estes valores de pesos devem ser utilizados para calcular os indicadores de sustentabilidade meta por setor (ISMES) e o indicador de sustentabilidade global (WSI) de cada sistema.

Para cada indicador, pode-se associar uma meta, que pode ser a condição ótima ou considerada adequada de acordo com padrões internacionais ou regulamentais. Estas metas também podem ser fixadas através de opiniões de especialistas, fontes bibliográficas ou estatísticas de outras fontes.

Entre as técnicas multicritério, recomenda-se usar a programação por objetivos ou “goal programming”, que permite tratar problemas de decisão gerencial com metas múltiplas de acordo com a importância atribuída a cada uma delas. A principal etapa é a formulação da função objetivo a ser otimizada, sujeita a uma ou mais restrições e a utilização de variáveis de desvios negativos e positivos (Equações 5 e 6).

Sendo assim, a próxima etapa do Estágio 3 do procedimento é o estabelecimento das metas adotadas no goal programming. A Tabela 17 apresentará os setores, indicadores, objetivos e respectivas metas. Deve-se determinar para cada indicador a intenção de maximizar ou minimizar, dependendo do tipo de indicador e sua relação com o setor. Umarusman (2013) cita que o objetivo geral da programação meta é minimizar o desvio entre a realização dos objetivos e seus níveis de aspiração, ou seja, o valor real comparado à meta. O processo de minimização pode ser realizado com diferentes métodos (ROMERO, 2004), mas, para definição das metas, as duas principais abordagens são (i) adotar valores obtidos em literatura com características semelhantes ao sistema em estudo, ou (ii) pode-se estabelecer valores conforme as características dos sistemas analisados; neste último, o método Delphi poderia ser aplicado.

Por se tratar de um estudo de caso envolvendo diversos indicadores relacionados aos transportes rodoviário e ferroviário com características específicas, não foi possível, até o momento, estabelecer metas a partir de dados de literatura e nem aplicar o método Delphi. Desta forma, foram escolhidas como metas os menores e/ou maiores resultados de cada indicador conforme o desejo de minimizar os impactos causados ao meio ambiente. Em relação à sociedade os indicadores tanto podem apresentar aspectos positivos ou negativos, como, por exemplo, o desejo de

aumentar o número de empregos ou de reduzir o número de acidentes causados pelos modais rodoviário e ferroviário. Já em relação ao setor econômico, buscou-se maximizar os resultados para o setor produtivo, sendo que os valores são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Definição das metas dos indicadores para cada setor do modelo 5SEnSU aplicado aos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário de soja no Brasil

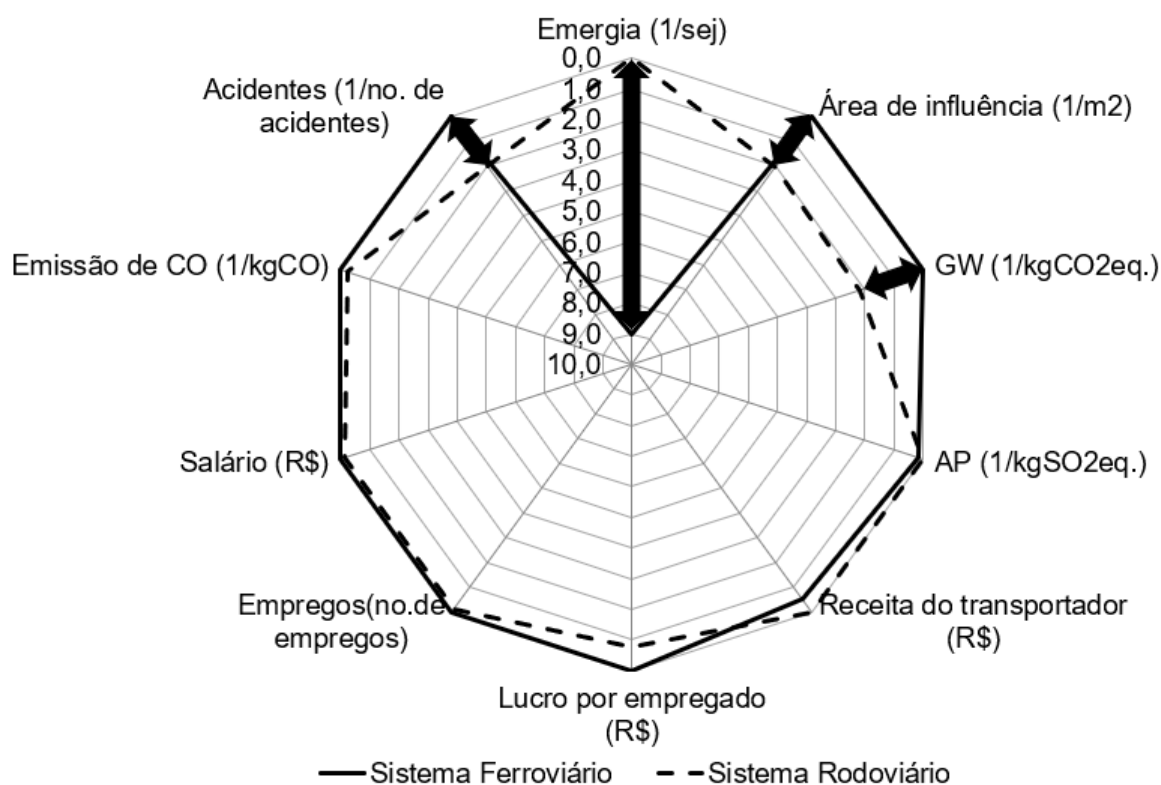
Setor do modelo 5SEnSU	Indicador	Objetivo	Meta (G)
#1. Ambiente como doador	K11 – Emergia	Minimizar	4,80 E+5 sej
	K12 – Área de influência	Minimizar	12,25 m ²
#2. Ambiente como receptor	K21 – Potencial de aquecimento global	Minimizar	383,84 kgCO _{2eq.}
	K22 – Potencial de acidificação	Minimizar	1,08 E-03 kgSO _{2eq.}
#3. Produção	K31 – Receita do transportador	Maximizar	1.270,56 R\$
	K32 – Lucro por empregado	Maximizar	5,84 R\$
#4. Sociedade como doadora e receptora	K41 – Número de empregos	Maximizar	0,10 unidade
	K42 – Salário pago aos funcionários	Maximizar	2.146,05 R\$
#5. Sociedade como receptora	K51 – Emissão de CO	Minimizar	6,10 E-01 kgCO
	K52 – Acidentes de trânsito	Minimizar	0,42 unidade

Adicionando os dados das Tabelas 1 no modelo de programação meta no Excel®, pode-se calcular os indicadores ponderados de sustentabilidade meta do indicador (ISM_{ijk}^+ e ISM_{ijk}^-), o indicador de sustentabilidade por setores do sistema ($ISMS_{ij}$), o indicador de sustentabilidade de cada sistema para cada setor $ISMES_{ij}$ e, finalmente, o WSI_i , que permite avaliar o desempenho entre os sistemas de transporte de soja avaliados neste trabalho. De acordo com a Tabela 18, pode-se observar que o sistema ferroviário apresentou valores de ISMES inferiores para os setores 2, 3, 4 e 5, concluindo-se que, após a aplicação de pesos e baseados nestes resultados, o sistema ferroviário seria o mais sustentável. Valores mais baixos indicam menor desvio em relação à meta, portanto, maior grau de sustentabilidade. Entretanto, ao incluir o setor 1 juntamente com os setores 2, 3, 4 e 5, o sistema ferroviário deixa de ser o mais sustentável devido ao seu valor de WSI ser superior ao sistema rodoviário. Neste caso, 9,74 maior que 7,46. O Apêndice E apresenta uma visão do programa em Excel® utilizado para realizar os cálculos, assim como todos os indicadores obtidos.

Tabela 18: Indicador de sustentabilidade (por setores ISMES e global WSI) no critério igualitário

Sistema de transporte	ISMES para cada setor do modelo 5SEnSU					Indicador de sustentabilidade global (WSI)
	#1	#2	#3	#4	#5	
Ferroviário	9,02	0,18	0,54	0,00	0,00	9,74
Rodoviário	2,05	2,18	0,76	0,25	2,22	7,46

Figura 22: Avaliação do desempenho de sustentabilidade dos sistemas rodoviário e ferroviário



A Figura 22 mostra os indicadores após ser considerado os pesos nos desvios. É possível comparar individualmente cada indicador pertencente a cada sistema. A escala do gráfico mostra o valor do desvio oscilando entre zero e dez. Quanto mais próximo de zero for o desvio, mais extrema será a localização do ponto correspondente ao indicador no gráfico radar e melhor será o seu desempenho. Chama a atenção o indicador emergia do sistema ferroviário cujo resultado foi de 9,02, elevando o valor do ISMES do setor # 1, sendo responsável pelo alto valor do WSI, calculado em 9,74. Os valores de ISMES para todos os indicadores pertencentes aos dois sistemas são mostrados no Apêndice E.

Conforme o fluxograma da Figura 15, caso o analista deseje verificar a incerteza relativa aos valores dos pesos, pode-se aplicar o método MONTE CARLO. Para demonstrar esta etapa do estágio 3, prosseguiu-se com o procedimento.

5.3.1 Análise de incerteza

A análise de incerteza pode considerar a variável que o analista desejar. Neste estudo de caso específico, optou-se por avaliar as incertezas nos pesos atribuídos a cada indicador, mas poder-se-ia avaliar as incertezas em indicadores e metas, se existirem.

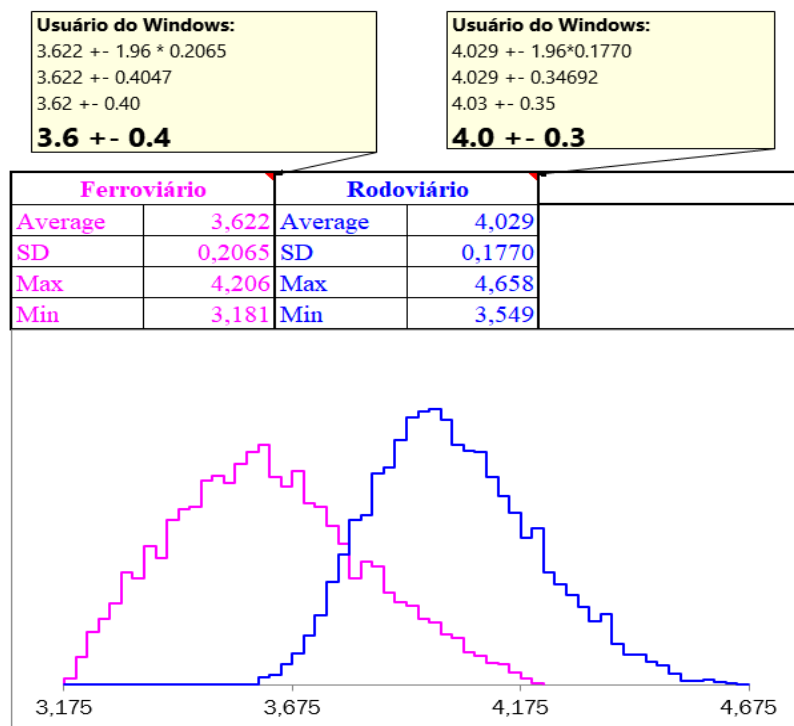
Assim, para verificar se os pesos atribuídos aos desvios indesejados para cada indicador podem modificar o resultado final do WSI, foi aplicada a análise de incerteza por meio do método de MONTE CARLO. Para tanto, foram mantidos pesos fixos de 4,5 para os desvios negativos da emergência e da área de influência, 4,5 para os desvios negativos do potencial de aquecimento global e do potencial de acidificação, 1,8 para os desvios positivos da receita e do lucro por empregado, 2,7 para os desvios positivos do número de empregos e do salário pago aos trabalhadores e 2,7 para o desvio negativo da emissão de CO e 2,7 para o desvio negativo do número de acidentes. Para os desvios indesejados, ou seja, aqueles que se distanciam das metas, foram estabelecidos os pesos da Tabela 19.

Tabela 19: Intervalos de variação dos pesos simulados no MONTE CARLO para visão igualitária

Indicador	Desvio indesejado	Intervalo de peso	Desvio desejado	Peso fixo
Emergência	Positivo	2,5 a 3,5	Negativo	4,5
Área de influência	Não simulado	2,5 a 3,5	Não simulado	4,5
Potencial de aquecimento	Positivo	2,5 a 3,5	Negativo	4,5
Potencial de acidificação	Positivo	2,5 a 3,5	Negativo	4,5
Receita	Negativo	1	Positivo	1,8
Lucro	Negativo	1	Positivo	1,8
Emprego	Negativo	1 a 1,7	Positivo	2,7
Salário	Negativo	1 a 1,7	Positivo	2,7
Emissão de CO	Positivo	1 a 1,7	Negativo	2,7
Acidentes	Positivo	1 a 1,7	Negativo	2,7

Para o sistema ferroviário, o WSI médio foi de $3,6 \pm 0,4$, e para o sistema rodoviário, o WSI médio foi de $4,0 \pm 0,3$, ambos com nível de confiança de 95%, conforme Figura 22.

Figura 23: análise de incerteza do WSI para os sistemas ferroviário e rodoviário em relação aos intervalos de pesos



Analisando as curvas da Figura 23, os resultados encontrados confirmam a influência dos valores dos pesos sobre o resultado do WSI, nos quais, dependendo valores dos pesos, pode-se ter WSI muito próximos, dificultando o suporte à decisão. Percebe-se que no ponto de intersecção das curvas seria obtido o mesmo WSI para ambos os sistemas.

Para melhor analisar o resultado da Figura 23, pode-se observar o gráfico das Figuras 24 e 25, cujos pontos estão plotados para os diversos pontos do WSI do sistema ferroviário e suas respectivas variações de pesos para o sistema ferroviário. O número de simulações apresentadas nos gráficos foi de 100, mostrando a dispersão dos diferentes WSI. Percebe-se uma maior dispersão dos pontos do WSI.

Figura 24: Gráfico com os diversos pontos do WSI e suas variações de pesos para o sistema ferroviário

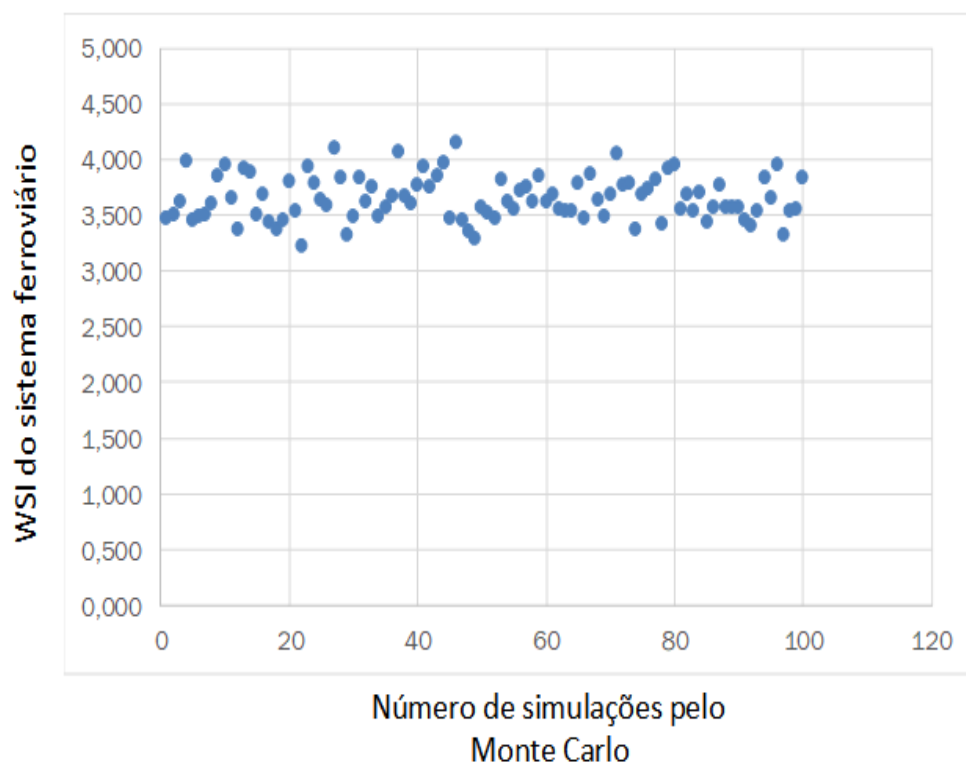
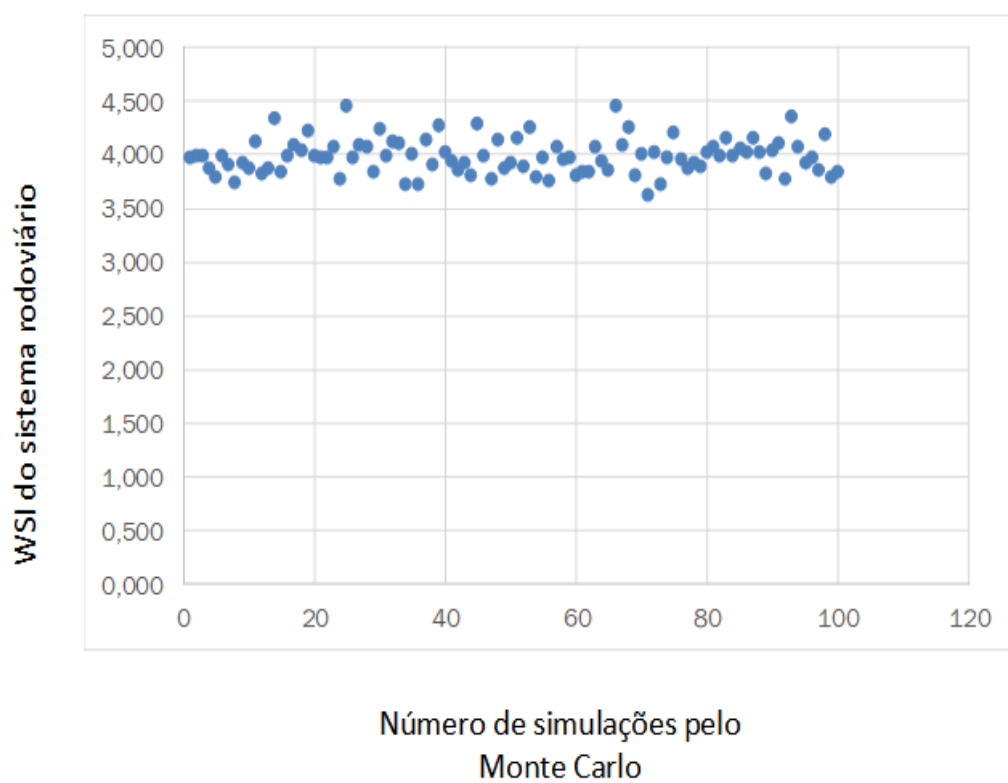


Figura 25: Gráfico com os diversos pontos do WSI e suas variações para o sistema rodoviário



Comparando o resultado do WSI de $3,6 \pm 0,4$ para o sistema ferroviário com o de $4,0 \pm 0,3$ para o sistema rodoviário, tornaria a interpretação dos resultados semelhante ao da Figura 15, na qual o sistema ferroviário configura como o mais sustentável. Pode-se verificar que a oscilação de pesos dos desvios indesejados altera de forma significativa os resultados do WSI global. Adotando-se o peso de 1 para todos os desvios indesejados, obteve-se o WSI de 9,74 para o sistema ferroviário e 7,46 para o sistema rodoviário. No entanto, adotando os pesos da Tabela 19, o melhor cenário seria de um WSI de 3,2 para o sistema ferroviário e 3,7 para o rodoviário. Sendo assim, justifica-se novamente a importância de reuniões participativas para selecionar os pesos, tendo em vista os objetivos desejados para os sistemas estudados.

5.4 Estágio 4 - Proposta de melhorias das operações e processos de produção: estudo do transporte da soja

5.4.1 Análise de sensibilidade do WSI para o sistema ferroviário

Para realizar a análise de sensibilidade, são alterados os indicadores do sistema ferroviário, cujos valores se encontram acima ou abaixo das metas estabelecidas, sendo eles: energia, potencial de acidificação e receita (Tabela 20).

Tabela 20: Resumo dos indicadores por sistema e suas respectivas metas

Indicador	Setor	Unidade/ton.km	Sistema ferroviário	Sistema rodoviário	Meta
Energia	S1	sej	48,1E+05	4,80E+05	4,80E+05
Área de influência	S1	m2	12,25	37,34	12,25
Potencial aquecimento	S2	kgCO _{2eq}	383,84	1.222,91	383,84
Potencial de acidificação	S2	kgSO _{2eq}	1,27E-03	1,08E-03	1,08E-03
Receita transportador	S3	R\$	585,68	1.270,56	1.270,56
Lucro por empregado	S3	R\$	5,84	1,41	5,84
Número de empregos	S4	Empregos	0,10	0,09	0,10
Salário pago aos trabalhadores	S4	R\$	2.146,05	1.825,58	2.146,05
Emissão de CO	S5	kgCO	6,10E-01	7,45E-01	6,10E-01
Número de acidentes	S5	acidentes	0,42	1,26	0,42

A análise de sensibilidade foi realizada com percentuais variando de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%, sendo que para alguns indicadores houve a redução de seu valor e para outros houve o aumento dele, dependendo da intenção de maximizar ou minimizar seus resultados. Comparou-se o valor original do WSI com o novo WSI. No caso do sistema ferroviário, a energia foi reduzida do valor de 4,81 E+6sej (Tabela 21), o potencial de acidificação foi reduzido do valor de 1,27E-03kgSO_{2eq} (Tabela 22) e para receita foi realizado um aumento do valor de R\$ 585,68 (Tabela 23).

Tabela 21: Impacto de variação do valor da energia do sistema ferroviário sobre o WSI global

% redução da energia	WSI global	Diferença
Valor original	9,74	0
5%	9,23	0,51
10%	8,73	1,01
15%	8,23	1,51
20%	7,73	2,01
25%	7,23	2,51
30%	6,73	3,01

Tabela 22: Impacto de variação do valor do Potencial de Acidificação (PA) do sistema ferroviário sobre o WSI global

% redução do potencial de acidificação	WSI global	Diferença
Valor original	9,74	0
5%	9,68	0,06
10%	9,62	0,12
15%	9,56	0,18
20%	9,56	0,18
25%	9,56	0,18
30%	9,56	0,18

Tabela 23: Impacto de variação do valor da receita do sistema ferroviário sobre o WSI global

% aumento da receita	WSI global	Diferença
Valor original	9,74	0
5%	9,71	0,03
10%	9,69	0,05
15%	9,67	0,07
20%	9,64	0,10
25%	9,62	0,12
30%	9,60	0,14

5.4.2 Análise de sensibilidade do WSI para o sistema rodoviário

Em relação ao sistema rodoviário, repetiu-se o mesmo procedimento de variação dos percentuais para os indicadores potencial de aquecimento no valor de 1222,91 kg CO₂eq (Tabela 24), lucro por empregado no valor de R\$ 1,41 (Tabela 25), número de empregos no valor de 0,09 empregados (Tabela 26), salário no valor de R\$ 1825,58 (Tabela 27), emissão de CO no valor de 7,45 E-01 kg (Tabela 28) e número de acidentes no valor de 1,26 (Tabela 29).

Tabela 24: Impacto da variação do valor do potencial de aquecimento do sistema rodoviário sobre o WSI global

% redução do potencial de aquecimento	WSI global	Diferença
Valor original	7,46	0
5%	7,30	0,16
10%	7,14	0,32
15%	6,99	0,47
20%	6,83	0,63
25%	6,67	0,79
30%	6,51	0,95

Tabela 25: Impacto de variação do valor do lucro por empregado do sistema rodoviário sobre o WSI global

% aumento do lucro por empregado	WSI global	Diferença
Valor original	7,46	0
5%	7,45	0,01
10%	7,44	0,02
15%	7,43	0,03
20%	7,42	0,04
25%	7,40	0,06
30%	7,39	0,07

Tabela 26: Impacto de variação do valor do número de empregos do sistema rodoviário sobre o WSI global

% aumento do número de empregos	WSI global	Diferença
Valor original	7,46	0
5%	7,42	0,04
10%	7,37	0,09
15%	7,36	0,10
20%	7,36	0,10
25%	7,36	0,10
30%	7,36	0,10

Tabela 27: Impacto de variação do valor do salário pago no sistema rodoviário sobre o WSI global

% aumento das horas de trabalho	WSI global	Diferença
Valor original	7,46	0
5%	7,42	0,04
10%	7,38	0,08
15%	7,34	0,12
20%	7,31	0,15
25%	7,31	0,15
30%	7,31	0,15

Tabela 28: Impacto de variação da emissão de CO no sistema rodoviário sobre o WSI global

% redução do CO	WSI global	Diferença
Valor original	7,46	0
5%	7,40	0,06
10%	7,34	0,12
15%	7,28	0,18
20%	7,24	0,22
25%	7,24	0,22
30%	7,24	0,22

Tabela 29: Impacto de variação do número de acidentes no sistema rodoviário sobre o WSI global

% aumento de salário	WSI global	Diferença
Valor original	7,46	0
5%	7,31	0,15
10%	7,16	0,30
15%	7,01	0,45
20%	6,86	0,60
25%	6,71	0,75
30%	6,56	0,90

5.4.3 Propostas de ações para melhoria da sustentabilidade dos sistemas de transporte de soja baseadas na análise gráfica

O gráfico radar apresentado no estágio 3 do procedimento permite ao analista identificar quais indicadores merecem um tratamento, seja buscando sua redução ou seu aumento. Em relação ao sistema ferroviário, percebe-se que o indicador energia e o potencial de aquecimento devem ser reduzidos se comparados com o sistema rodoviário, enquanto que o indicador receita precisa ser aumentado.

Já em relação ao sistema rodoviário, os indicadores lucro por empregado, número de empregos e salário devem ser aumentados, enquanto que os indicadores

potencial de aquecimento, emissão de CO e número de acidentes devem ser reduzidos quando comparados com o sistema ferroviário.

5.4.3.1 Propostas de Ações para o sistema de transporte ferroviário com base na análise de sensibilidade

Nesta etapa final do procedimento, são sugeridas ações em relação a cada sistema separadamente, ou seja, para o ferroviário e depois para o rodoviário. Para o ferroviário, após a análise de sensibilidade, verifica-se que os indicadores a serem alterados por ordem de importância são energia, potencial de acidificação e, por último, a receita da empresa, como visto na Tabela 30. Esta sequência foi escolhida em função da diminuição do valor do WSI em relação ao seu original.

Pode-se observar que, reduzindo a energia em 30%, o resultado do WSI diminui em 3,01, sendo que seu valor original é 9,74. Este resultado é um indicativo numérico de que o sistema, ao reduzir o valor do WSI, apresenta indicadores com valores mais próximos das metas estabelecidas. Seguindo o mesmo raciocínio, propõe-se que o potencial de acidificação reduza em 15% e que a receita da empresa aumente em 30%.

Tabela 30: Ações propostas para melhoria da sustentabilidade global do transporte ferroviário

Ordem de importância das ações	Indicador a ser alterado	% oscilado	Ação para melhoria	Diminuição do WSI em relação ao original
1	Energia	30	Redução	3,01
2	Potencial de acidificação	15	Redução	0,18
3	Receita da empresa	30	Aumento	0,14

5.4.3.2 Propostas de ações para o sistema de transporte rodoviário com base na análise de sensibilidade

Para o sistema rodoviário, os indicadores deveriam ser alterados conforme a ordem de importância das ações da Tabela 31. A sequência de indicadores deveria ser potencial de aquecimento, seguido de CO, salário, emprego e lucro/empregado. Para o potencial de aquecimento, é sugerido uma redução de 30%, para o CO, uma redução de 20%, para os salários pagos, um aumento de 20%, para o número de

empregos, um aumento de 15%, para o lucro/empregado, um aumento de 30% e, para horas de trabalho, um aumento de 30%.

Tabela 31: Ações propostas para melhoria da sustentabilidade global do transporte rodoviário

Ordem de importância das ações	Indicador a ser alterado	% oscilado	Ação para melhoria	Diminuição do WSI em relação ao valor original
1	Potencial de aquecimento	30	Redução	0,95
2	Acidentes	30	Redução	0,90
3	Emissão de CO	20	Redução	0,22
4	Salário	20	Aumento	0,15
5	Número empregos	15	Aumento	0,10
6	Lucro por empregado	30	Aumento	0,07

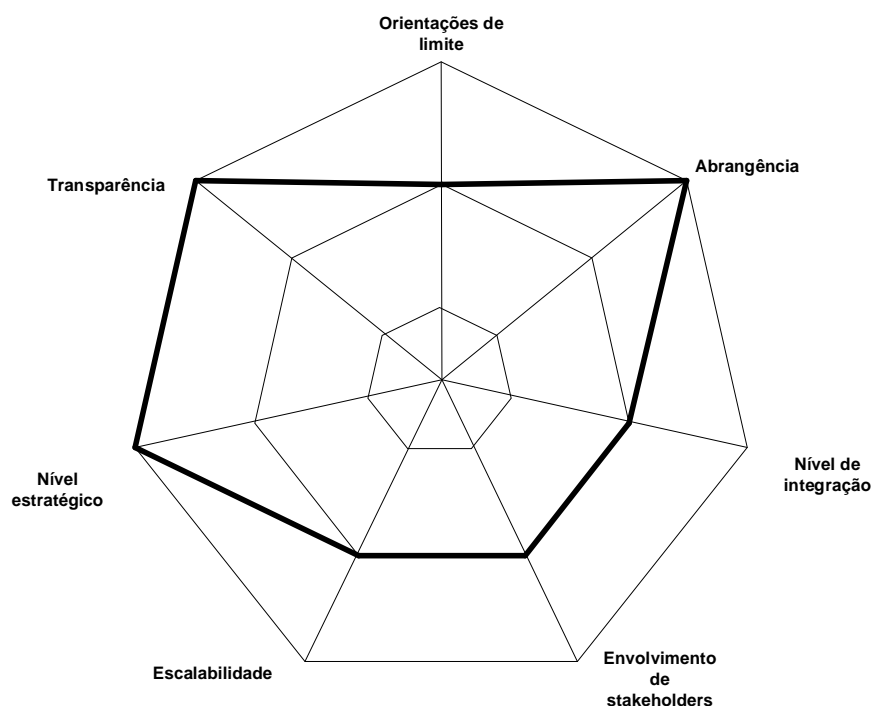
6. DISCUSSÕES

6.1 Discussão sobre o ASUPRO

Segundo Sala et al. (2015), avaliação de sustentabilidade é uma das metodologias mais complexas porque não só implica aspectos multidisciplinares (ambiental, econômico e social), mas também elementos culturais e baseados em valores. Segundo os autores, a avaliação de sustentabilidade está se tornando cada vez mais uma prática comum em produtos, políticas e instituições. Portanto, os principais desafios para procedimentos de avaliação de sustentabilidade estão relacionados com a necessidade de identificar os limites entre o que contribui para o desenvolvimento sustentável e o que não, destacando, assim, o grau de robustez de cada procedimento.

Para avaliar a robustez do ASUPRO, foi realizado um estudo comparativo dos sete critérios da metodologia utilizada em procedimento de avaliação de sustentabilidade (Figura 17), proposto por Sala et al. (2015), resultando na avaliação apresentada na Figura 26. Os critérios utilizados são orientações do limite do estudo, abrangência, nível de integração, envolvimento dos stakeholders, escalabilidade, nível estratégico e transparência. Para atingir o grau máximo de robustez, Sala et al. (2015) consideram que: 1) as orientações do limite do estudo devem estar fundamentadas com base em ciência e/ou normas; 2) a abrangência deve considerar os três pilares da sustentabilidade; 3) o nível de integração deve ser multidisciplinar; 4) o envolvimento dos stakeholders deve ser total; 5) a escalabilidade deve ser variada e abrangente; 6) o nível estratégico deve ser orientado para mudanças; e 7) a transparência propõe um modelo aberto com valores transparentes.

Figura 26: Avaliação de robustez do procedimento proposto

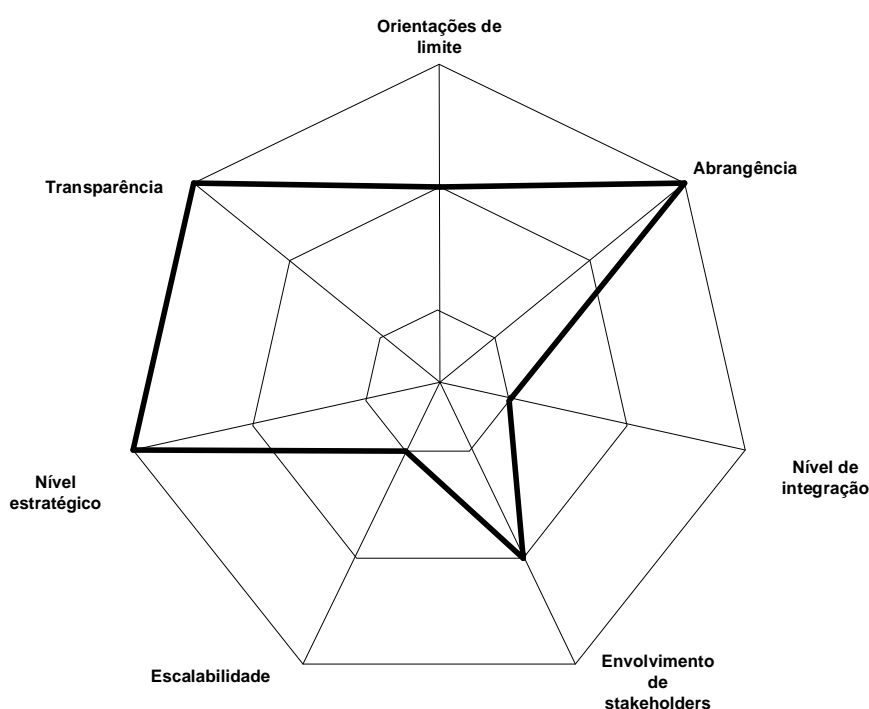


Em relação às orientações de limite da fronteira, o ASUPRO utiliza referências baseadas em status quo ou cenários, o que permite não só um comparativo de sistemas, suas operações e seus processos de produção como também da interação dos recursos utilizados entre os cinco setores de sustentabilidade (5SEnSU). A abrangência do ASUPRO leva em consideração os três pilares da sustentabilidade (ambiental, social e econômico), embora o procedimento seja considerado de sustentabilidade intermediária. No que concerne ao nível de integração do ASUPRO, pode-se dizer que o mesmo é considerado multidisciplinar, pois permite a combinação de diferentes métodos e ferramentas, tanto para escolha dos indicadores como para definição das metas e seus objetivos, visando melhorar a sustentabilidade. No critério relativo ao envolvimento dos stakeholders, o procedimento permite uma média interação, podendo-se utilizar o método Delphi em busca do consenso na escolha e importância dos indicadores. A escalabilidade do ASUPRO é temporal, podendo-se empregar uma análise de dados por tempo limitado como também uma série histórica de dados baseada em períodos maiores. O nível estratégico do ASUPRO é orientado para mudanças, conforme o estágio 4, onde o analista pode propor ações de melhoria, tendo como mecanismo a análise de sensibilidade. Em relação à transparência, o ASUPRO adota um modelo aberto no qual o analista pode optar em avaliar os

resultados com ou sem o uso da ferramenta goal programming, identificando quais indicadores necessitam ser melhorados.

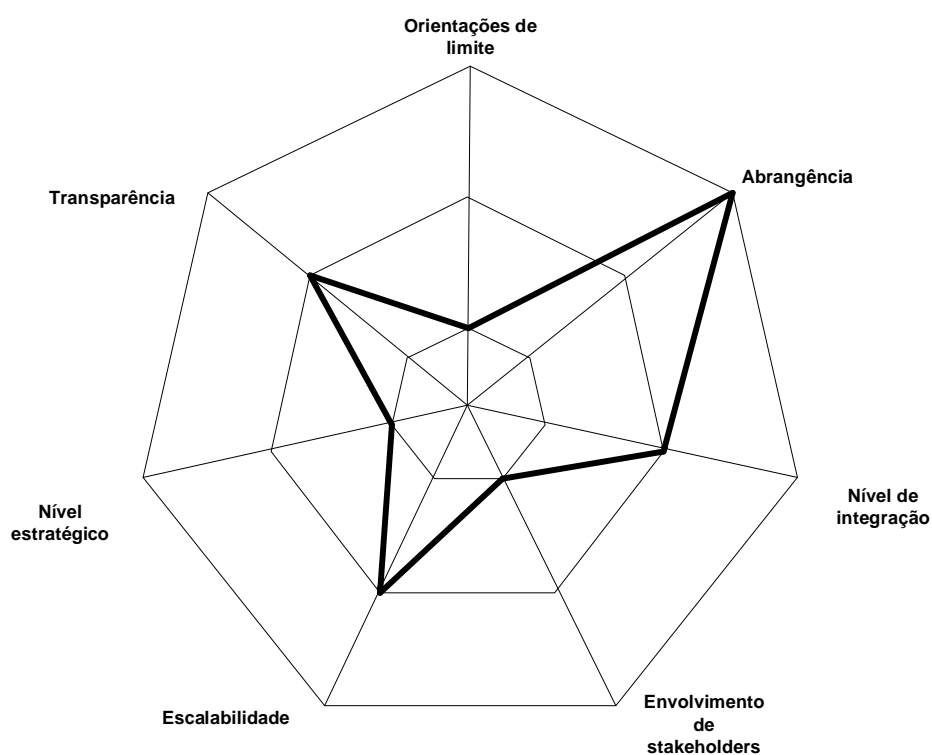
Sala et al. (2015) avaliaram a robustez de outros modelos de sustentabilidade utilizando o mesmo framework da Figura 17. A avaliação de impacto ambiental teve como pontos fracos a escala local com base em tempo limitado e sua falta de interdisciplinaridade (Figura 27). O índice de desenvolvimento humano teve como pontos fracos a falta de referência às orientações de limite da fronteira, um nível estratégico meramente contábil e uma baixa interação dos stakeholders (Figura 28). A pegada ecológica teve como pontos fracos um modelo fechado em relação à transparência, somente a abordagem de 1 pilar de sustentabilidade e baixa interação dos stakeholders (Figura 29). A avaliação do ciclo de vida teve como pontos fracos o baixo envolvimento dos stakeholders, uma abrangência de 1 pilar de sustentabilidade e um nível estratégico meramente contábil (Figura 30).

Figura 27: Avaliação de robustez (AIA) Avaliação de impacto ambiental



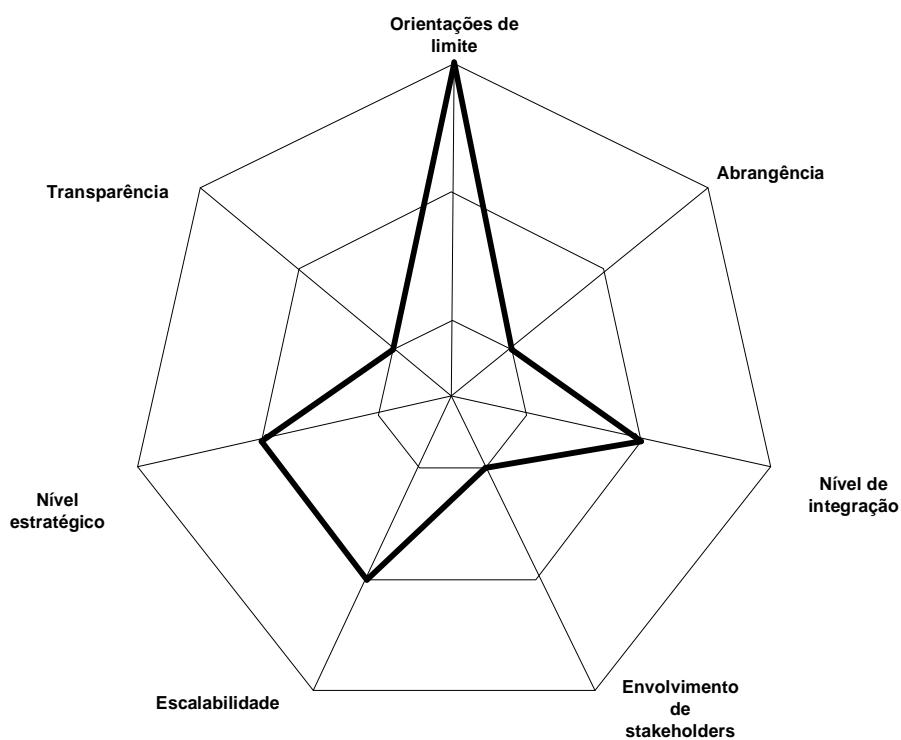
Fonte: Sala et al. (2015)

Figura 28: Avaliação de robustez (IDH) Índice de desenvolvimento humano



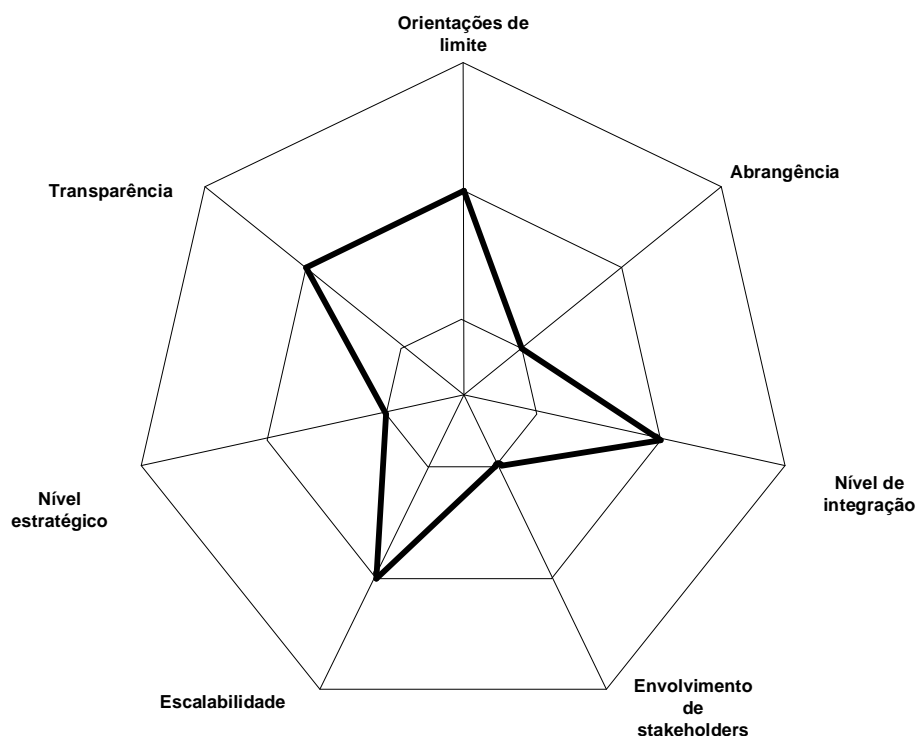
Fonte: Sala et al. (2015)

Figura 29: Avaliação de Robustez (PE) Pegada ecológica



Fonte: Sala et al. (2015)

Figura 30: Avaliação de Robustez (ACV) Avaliação do ciclo de vida



Fonte: Sala et al. (2015)

Percebe-se, portanto, que o ASUPRO traz contribuições semelhantes quando comparado a outros modelos de avaliação de sustentabilidade, especialmente na transparência (modelos IDH e ACV), no nível estratégico (modelo AIA), na escalabilidade (modelos IDH, PE e ACV), no envolvimento dos stakeholders (modelo AIA), no nível de integração (modelos IDH, PE e ACV) e na abrangência (modelos AIA e IDH).

Ainda como forma de comparar o ASUPRO com outros trabalhos da comunidade científica, foi apresentada a Tabela 32, que realizou um estudo comparativo dos procedimentos de avaliação de sistemas de produção. Pode-se observar que diversos procedimentos utilizam indicadores dos setores ambiental, econômico e social. Popovic et al. (2017) utilizaram uma análise unidirecional de cadeias de suprimento para identificar se a influência dos participantes pode afetar na escolha dos indicadores utilizados para avaliar o desempenho da sustentabilidade. Para estudo, somente indicadores sociais foram utilizados para concluir o resultado. Chen et al. (2017) utilizaram a contabilidade em energia para avaliar a sustentabilidade da província de Yunna, China, com base em indicadores ambientais. He et al. (2017) avaliaram quatro aspectos da gestão sustentável da terra,

nomeadamente o progresso econômico, a estabilidade social, a melhoria do sistema ecológico e seu equilíbrio. Para tanto, utilizaram indicadores ambientais, sociais e econômicos. Toumi et al. (2017) avaliaram a sustentabilidade de 11 países da América Latina com base em indicadores dos setores ambiental, social e econômico e concluíram uma falta de coordenação entre a escolha dos indicadores.

Percebe-se, portanto, que o ASUPRO dá um passo adiante em relação aos estudos apresentados, no sentido de não só apontar o sistema de produção mais sustentável como também de permitir ao analista identificar os indicadores que podem melhorar o desempenho da sustentabilidade.

Outra vantagem da aplicação do ASUPRO em relação aos apresentados na Tabela 32 está na facilidade da interpretação dos resultados por meio de um indicador quantitativo de sustentabilidade global, denominado WSI, obtido através do uso do goal programming, que facilita ao analista a tomada de decisão com base no atingimento das metas estabelecidas.

Tabela 32: Estudo comparativo dos procedimentos de avaliação de sustentabilidade de sistemas de produção

Artigo/ autores	Utiliza Indicadores de Sustentabilidad e social	Utiliza Indicadores de Sustentabilidad e econômica	Utiliza Indicadores de Sustentabilidad e ambiental	Proposta do procedimento	Utiliza a técnica do goal programm g e análise de sensibilidade
Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains/ Popovic et al. (2018)	X			Utilização de uma análise unidirecional (ANOVA) de cadeias de suprimento para decidir se os escalões afetam a relevância dos indicadores	Não
Emergy based sustainability evaluation for Yunnan Province, China/ Chen et al. (2017)			X	Utilização da contabilidade em emergia para avaliar a sustentabilidade da província de Yunna no ano de 2014	Não
Evaluation of sustainable land management in urban area: A case study of Shanghai, China/ He et al. (2017)	X	X	X	Avaliar quatro aspectos da gestão sustentável da terra, nomeadamente o progresso econômico, a estabilidade social, a melhoria e o equilíbrio ecológico.	Não
Assessment of Latin American sustainability / Toumi et al. (2017)	X	X	X	Avaliar a sustentabilidade em 11 países da América Latina com base nas áreas ambiental, social e econômica.	Não
ASUPRO	X	X	X	Avaliar a sustentabilidad e de operações e processos de produção com base em análise multicritério. Propor melhoria dos indicadores.	Sim

Considerando os critérios propostos por Sala et al. (2015), verificou-se que o ASUPRO deve melhorar as orientações dos limites da fronteira, o nível de integração, o envolvimento dos stakeholders e a escalabilidade. Em relação ao comparativo com outros estudos da comunidade científica, observou-se que o ASUPRO dá um passo adiante ao utilizar a técnica do *goal programming* juntamente com a análise de sensibilidade para propor melhorias à sustentabilidade do sistema.

6.2 Discussão sobre a aplicação do procedimento no estudo de caso

O ASUPRO aplicado aos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário apresentou três abordagens diferentes com três resultados diferentes.

A primeira abordagem de avaliação da sustentabilidade de operações e processos de produção, referente ao transporte, mostrou o transporte ferroviário como o mais sustentável em função de um maior número de indicadores, atendendo os anseios do conceito de sustentabilidade, ou seja, minimização das emissões de gases nocivos ao ambiente e ao ser humano, minimização da utilização dos recursos físicos renováveis e não renováveis do meio ambiente, maximização dos resultados econômicos da empresa, maximização da geração de empregos e da remuneração atribuída aos trabalhadores.

Em relação ao sistema de transporte ferroviário, os indicadores que atenderam essas características foram: área de influência, potencial de aquecimento, lucro por empregado, número de empregos, salário pago ao trabalhador, emissão de CO e número de acidentes. Já em relação ao sistema rodoviário, o mesmo mostrou-se mais sustentável para os indicadores energia, potencial de acidificação e receita do transportador.

A segunda abordagem de avaliação da sustentabilidade, que adota metas e pesos estabelecidos pelo analista para cada indicador, utiliza a ferramenta *goal programming*, pois permite comparar cada indicador com sua respectiva meta. Nesta abordagem, o sistema de transporte mais sustentável passou a ser o sistema rodoviário em função de o resultado apresentado para o WSI ser menor do que o do sistema ferroviário, ou seja, um valor de 7,46 para o sistema rodoviário contra um valor de 9,74 para o sistema ferroviário. Este resultado mostra que o sistema rodoviário, embora tenha alguns valores dos indicadores distantes das metas em seu somatório, o valor prevalece inferior, principalmente em função do indicador energia, que possui

um valor dez vezes inferior à energia do sistema ferroviário. Esta afirmação é feita com base na análise do Índice Global de Sustentabilidade (WSI), que apresentou um valor inferior em relação ao sistema ferroviário.

A terceira abordagem, adotando-se metas e pesos variados através do método MONTE CARLO, apontou diferentes valores para o WSI de ambos os sistemas.

Portanto, em função dos resultados encontrados, pode-se afirmar que, dependendo da escolha do analista referente à abordagem, metas, pesos, indicadores, análise de incerteza e sensibilidade, a avaliação da sustentabilidade de operações e processos de produção pode apresentar diferentes suportes à decisão.

7 CONCLUSÕES

7.1 Sobre o ASUPRO

O ASUPRO, diferentemente do que se encontra na literatura, possui um modelo de sustentabilidade conceitual que o suporta, assim como estágios claramente apresentados e cientificamente suportados. A utilização da técnica do goal programming diferencia este procedimento de outros pesquisados na literatura e que não adotam esta ferramenta.

Comparando-se com os critérios da metodologia utilizada em procedimentos de avaliação de sustentabilidade através da literatura científica, conclui-se que o ASUPRO atingiu três critérios de robustez em seu grau máximo, como transparência, abrangência e nível estratégico. Em relação ao critério transparência, o ASUPRO utiliza um modelo aberto e de fácil aplicação em função dos 4 estágios adotados, como planejamento, execução, checagem e ações de melhoria. O critério abrangência, relativo à sustentabilidade, presume os três pilares: ambiental, social e econômico, representados pelos cinco setores do modelo 5SEnSU. O critério nível estratégico é orientado para mudanças, pois permite no estágio 4 propor ações de melhoria para cada sistema ou operações de produção estudadas.

Entretanto, quatro critérios do ASUPRO não atingiram seu grau máximo de robustez, sendo eles: orientações de limite da fronteira, nível de integração, envolvimento de stakeholders e escalabilidade. Em relação ao critério orientações de limite da fronteira, o procedimento é aplicado na comparação de cenários, com base em indicadores, não considerando normas ambientais. Relativo ao critério nível de integração, o procedimento considera somente a multidisciplinaridade relativa a indicadores pertencentes às dimensões ambiental, social e econômica. Concernente ao critério envolvimento de stakeholders, o procedimento é considerado de média interação, pois não considera a opinião de todos os envolvidos nos cenários estudados. Por último, no tocante ao critério escalabilidade, o ASUPRO adota uma unidade funcional dentro de um período de tempo determinado, não adotando escalas variadas e abrangentes.

7.2 Sobre o estudo de caso

A aplicação do ASUPRO para o estudo de caso pode ser separado claramente em três partes, tendo sido apresentado três diferentes resultados.

A primeira parte, através da análise do gráfico radar, onde ocorre a normalização dos dados, pode-se verificar que o sistema ferroviário apresentou o melhor desempenho para os indicadores área de influência, potencial de aquecimento, lucro por empregado, número de empregos, salário pagos aos trabalhadores, emissão de CO e acidentes, enquanto que o rodoviário apresentou melhor desempenho para os indicadores energia, potencial de acidificação e receita do transportador. Baseado na quantidade de indicadores que apresentaram melhor desempenho e na maior área do gráfico radar, pode-se afirmar que o sistema ferroviário é o mais sustentável.

A segunda parte foi através da aplicação do goal programming, na qual pesos e metas foram mantidos fixos. Nesta avaliação, o sistema de transporte rodoviário foi o mais sustentável por apresentar um resultado do WSI, de 7,46, inferior ao WSI, de 9,74 do sistema ferroviário. A análise do ISMES de cada setor permite ao analista uma avaliação mais detalhada, sendo possível trabalhar de forma específica os indicadores que mais influenciam cada um dos cinco setores. Pode-se observar que dos cinco ISMES calculados para o sistema ferroviário, apenas o do setor # 1, que representa o setor ambiental como doador, apresentou maior valor para o indicador energia (9,02) comparativamente com o ISMES do indicador área de influência do sistema rodoviário (2,05). Este resultado foi superior principalmente pela elevada diferença do indicador energia do sistema ferroviário em relação à meta estabelecida.

A terceira parte, alterando-se os pesos e aplicando-se a análise de incerteza ao goal programming, o sistema ferroviário apresentou um WSI de $3,6 \pm 0,4$, enquanto que o sistema rodoviário apresentou um WSI de $4 \pm 0,3$.

Comparando-se os resultados do segundo e terceiro estágio do ASUPRO, nota-se que os diferentes pesos atribuídos aos desvios dos indicadores em relação às suas respectivas metas alteram os resultados do WSI. Pode-se, portanto, concluir que a influência dos pesos e metas aplicados ao procedimento podem interferir

significativamente nos resultados, merecendo um destaque especial para sua escolha.

A análise de sensibilidade do ASUPRO permitiu identificar a influência da variação dos indicadores sobre os resultados do WSI de ambos os sistemas estudados, alterando positivamente a sustentabilidade das operações e dos processos de sustentabilidade. Para o sistema ferroviário, conclui-se que reduzindo em 30% o resultado da energia obteve-se uma redução de 3,01, indo o WSI de 9,74 para 6,73. Ainda para o sistema ferroviário, conclui-se que reduzindo o potencial de acidificação em 15%, obteve-se uma redução de 0,18 do WSI, indo de 9,74 para 9,56. Ambas as ações melhoraram a sustentabilidade do sistema. Para o sistema rodoviário, conclui-se que, reduzindo em 30%, ambos os resultados do potencial de aquecimento e número de acidentes, obteve-se uma redução de 0,95 e 0,90 do WSI, respectivamente. No primeiro caso referente ao potencial de aquecimento, o WSI foi de 7,46 para 6,51, enquanto que, no segundo caso, referente ao número de acidentes, o WSI foi de 7,46 para 6,56.

Conclui-se, portanto, que se aplicando a análise de incerteza referente ao terceiro estágio do ASUPRO, o sistema ferroviário passa a ser o mais sustentável em função de seu menor valor do WSI. Desta forma, os gestores devem apoiar o sistema ferroviário e buscar esforços para reduzir principalmente os indicadores energia e potencial de acidificação, como apontado na análise de sensibilidade.

8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar trabalhos semelhantes através do ASUPRO com a utilização de metas publicadas por órgãos oficiais e pesos atribuídos aos desvios dos indicadores por meio de processo participativo, com especialistas dos setores ambiental, social e econômico. Metas e pesos podem ser melhor identificados com o uso de relatórios oficiais de planejamento governamental, assim como obtidos a partir de reuniões participativas.

Avaliar a possibilidade de melhorar os aspectos/critérios em que o ASUPRO ainda não atingiu sua máxima robustez, mas, especificamente, os critérios nível de integração, envolvimento de stakeholders, escalabilidade e orientações de limite da fronteira.

9 REFERÊNCIAS

AMARAL, L.P.; MARTINS, N. GOUVEIA, J. A review of emergy theory, its application and latest developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, pp. 882–888, 2016.

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em:< www.antt.gov.br>. Acesso em 28 set. 2018.

BANA COSTA, C.; VANSNICK, J. C.; MACBETH. An Interactive Path Towards the Construction of Cardinal Value Functions. *International Transactions in Operational Research*, v. 1, p. 489-500, 1994.

BARTZAS, G; KOMNITSAS, K. Life cycle analysis of pistachio production in Greece. *Science of the Total Environment*, v. 595, p.13–24, 2017.

BASTIONONI, S; COSCIEME, L.; PULSELLI, F.M. The input-state-output model and related indicators to investigate the relationships among environment, society and economy. *Ecological Modeling*, v. 325, p. 84-88, 2016.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: a review and refinement of the emergy baseline. *Ecological Modelling*, v. 221, n. 20, p. 2501-2508, 2010.

BRYAN, L. L. The new metrics of corporate performance: profit per employee, 2007. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/strategy-and-corporate-finance/our-insights/the-new-metrics-of-corporate-performance-profit-per-employee>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

BOSSEL, H. Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, a Report to the Balaton Group, Public Health. International Institute for Sustainable Development, Winnipeg, 1999.

BONISOLI, L.; GÓMEZ E. G.; MUNOZ, L. P. Deconstructing criteria and assessment tools to build agri-sustainability indicators and support farmers's decision-making process. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 1080-1094, 2018.

CABALLERO, R.; GÓMEZ, T.; RUIZ, F. Goal Programming: Realistic Targets for the near future. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, v. 16, p. 79-110, 2009.

CAN, E. K.; HOUCK, M. H. Real-time reservoir operations by goal programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 110, n. 3, p. 297-309, 1984.

CHANG, C. T. Multi-Choice Goal Programming. *The International Journal of Management Science*, v. 35, p. 389- 396, 2007.

CHANG, Ching-Ter. Revised multi-choice goal programming. *Applied mathematical modelling*, v. 32, n. 12, p. 2587-2595, 2008.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. *Management models and industrial applications of linear programming*. New York: Wiley, 1961.

CHEN W.; ZHONG, S.; GENG, Y.; CHEN, Y.; CUI, X.; WU, Q.; PAN, H.; WU, R.; SUN, L.; TIAN, X. Emergy based sustainability evaluation for yunnan province, china. *Journal of cleaner production*, p. 9886, 2017.

CHOI, J., HWANG, M.; KIM, G.; SEONG, J.; AHN, J. Supporting the measurement of the United Nations' sustainable development goal 11 through the use of national urban information systems and open geospatial technologies: a case study of south Korea. *Open Geospatial Data, Softw*, 2016.

CNT. Confederação Nacional de Transportes. Disponível em: <www.cnt.org.br>. Acesso em 26 out. 2017.

COLAUTO, Romualdo Douglas; BEUREN, Ilse Maria; MEDINA, Enrique Afonso Muñoz La Tridimensionalidad del Lenguaje Contable en la Mensuración de Activos con Énfasis en la Evaluación del Capital Intelectual. *Revista Produção Online*, v. 5, n. 3, p 1-15, setembro de 2005.

COSCIEME, L.; PULSELLI, F.M., JORGENSE, S.E.; BASTIANONI, S., Thermodynamics based categorization of ecosystems in a socio-ecological context. *Ecol.Modell.*258, 1–8, 2013.

DALMÁCIO, F. Z.; SANT'ANNA, D. P.; RANGEL, L. L.; NOSSA, V. A utilização da Goal Programming no processo de tomada de decisão. *ABCustos*, v. 3, n. 2, 2008.

DOBRANSKYTE-NISKOTA, A.; PERUJO, A.; PREGL, M. Indicators to assess sustainability of transport activities, JRC European Commission, 2017.

DALY, H. E. Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*.v.2, p. 1–6,1990.

DALY, H.E.Elements of environmental macroeconomics.In:Costanza, R. (Ed.),*Ecological Economics:the Science and Management of Sustainability*.Columbia University Press, New York, 1991.

DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. *European Journal of Operational Research*, v. 258, n. 2, p. 607-616, 2017.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. Acesso em 15 agos. 2017.

EEA—European Environment Agency. Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting. EEA, Copenhagen, p. 20, 2017.

ESALQ-LOG. Grupo de estudo de logística. Disponível em: <<https://esalqlog.esalq.sup.br>>. Acesso em 23 set. 2017.

ESI, Environmental Sustainability Index, 2005.Benchmarking National Environmental Stewardship. Appendix A, Methodology. Available at http://www.yale.edu/esi/a_methodology.pdf. Accessed on 6th November 2018.

FRANKL, P; RUBIK, F. Life Cycle Assessment in Industry and Business: Adoption of Patterns, Applications and Implications. Berlin: Springer-Verlag, p.280, 2000.

FEDERICI, M.; ULGIATI, S.; BASOSI, R. A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems. *Energy*, v. 33, n. 5, p. 760-775, 2008.

FEDERICI, M.; ULGIATI, S.; VERDESCA, D.; BASOSI, R. Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems: The case of Siena, Italy. *Ecological Indicators*, v. 3, n. 3, p. 155-169, 2003.

GIANNETTI B.F; AGOSTINHO F; ALMEIDA, C.M.V.B., HUISING, D. A review of limitations of GDP and alternative indices to monitor human wellbeing and to manage eco-system functionality. *Journal of Cleaner Production* xxx, pp 1-15, 2015.

GIANNETTI, B.F., SEVEGNANI, F., ALMEIDA, C.M.V.B., AGOSTINHO F., GARCIA, R.R.M., Liu, G. - Five Sector Sustainability Model: a proposal for assessing sustainability of production systems. *Ecological Modelling*. Under Review

GOEDKOOOP, M; SPRIENSMA, R. The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impac assessment. Methodology Report, Second Edition, Pré-Consultans Netherlands, 2000. Available at <http://teclim.ufba.br/jfs/indicadores/holan%20ecoindicator%2099.pdf>. Acessed on 4th November 2018.

GOLDFINGER, S; WACKERNAGEL, M.; GALLI, A.; LAZARUS, E.; LIN, D. Footprint facts and fallacies: A response to Giampietro and Saltelli. "Footprints to Nowhere" *Ecological Indicators* xxxxxx–xxx, 2014.

GOLDSTEIN, B.; BIRKVED, M.; QUITZAU, M.B.; HAUSCHILD, M. Quantification of urban metabolism through coupling with the life cicle assessment framework: concept development and case study. *Environ. Res. Lett.* 8, 035024, 2013.

GORENFLO, G.; MORAN, J. W. The ABCs of PDCA. Public Health Foundation. 2010. Disponível em: <http://www.phf.org/resourcestools/Pages/The_ABCs_of_PDCA.aspx>. 2010. Acesso em 15 jul. 2018.

GRAEDEL, T.E. Streamlined Life-Cycle Assessment. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 310p.

HAGHSHENAS, H.; VAZIRI, M. Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecological Indicators*, v. 15, n. 1, p. 115-121, 2012.

HAUSCHILD, M.Z. Assessing Environmental Impacts in a Life Cycle Perspective. *Environmental Science and Technology*, v. 39, n.4, p. 81A-88A, 2005.

HEIJUNGS, R.; HUPPES, G. GUINÉE J.B. Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis. *Polymer Degradation and Stability* v. 95, pp. 422-428, 2010.

HWANG, C. L.; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making: Methods and Applications, Springer, Berlin, Heidelberg, 1981.

HE, C.; HAN, Q.; VRIES, B.D.; WANG, X; GUACHO, Z. Evaluation of Sustainable land management in urban area: A case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, v.80, p.106-113, 2017.

IBGE. Produção agrícola municipal. Culturas temporárias e permanentes, 2014. Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_\[anual\]/2014/pam2014.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_[anual]/2014/pam2014.pdf). Acesso em 12 out. 2018.

IISD. Compendium of Sustainable Development Indicator Initiatives, <http://www.iisd.org/measure/compendium/searchinitiatives.aspx>, 2009.

IMEA. Instituto Mato Grossense de Economia Agropecuária. Entendendo o Mercado da Soja. Cuiabá: IMEA, 2017. Disponível em: <http://www.imea.com.br>. Acesso em 15 jul. 2018.

ISO 14040 International Standard, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, Technical Report #SFS-EN ISO 14040, International Organisation for Standardization, 2006.

JAMALNIA, A.; SOUKHAKIAN, M. A. A hybrid fuzzy goal programming approach with different goal priorities to aggregate production planning. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, n. 4, p. 1474-1486, 2009.

JORGENSEN, S.E. Eco-exergy as an ecosystem health indicator. In: Jørgensen, S. E., Fath, B. (Eds.), *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 977–979, 2008.

KELLY, E.; LATRUFE L.; DESJEUX Y.; RYAN M.; UTHES S.; DIAZABAKANA, A.; DILLON, E; FINN, J. Sustainability indicators for improved assessment of the effects of agricultural policy across the EU: Is FADN the answer? *Ecological Indicators*, v. 89, p. 903-911, 2018.

KOEHLER, G. Tapping the Sustainable Development Goals for progressive gender equity and equality policy? *Gend. Dev.* V. 24, P. 53–68, 2016.

KUMAR, A.; SAH, B.; SINGH, A. R.; DENG, Y.; HE, X.; KUMAR, P.; BANSAL, R.C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, p. 596-609, 2017.

KUMI, E.; ARHIN, A.A., YEBOAH, T. Can post-2015 sustainable development goals survive neoliberalism? A critical examination of the sustainable development–neoliberalism nexus in developing countries. *Env. Dev Sustain*, v. 16, p. 539–554, 2014.

KVANLI, A. H.; BUCKLEY, J. J. On the use of U-shaped penalty functions for deriving a satisfactory financial plan utilizing goal programming. *Journal of Business Research*, v. 14, n. 1, p. 1-18, 1986.

LIANG, G.; WANG, M. A fuzzy multi-criteria decision-making method for facility site selection. *The International Journal of Production Research*, v. 29, n. 11, p. 2313-2330, 1991.

LINSTONE, H.A.; TUROFF, M. *The Delphi Method: Techniques and Applications*, Addison-Wesley, London, 1975.

MANCINI, M.S.; GALLI, A.; COSCIEME, L.; NICCOLUCCI, V.; LIN, D.; PULSELLI, F.M.; BASTIANONI, S.; MARCHETTINI, N. Exploring ecosystem services assessment through Ecological Footprint accounting. *Ecosystem Services*, v.30, pp 228–235, 2018.

MARUTA, R. Maximizing Knowledge Work Productivity: A Time Constrained and Activity Visualized PDCA Cycle. *Knowl. Process Manag.*, v. 19, p. 203–214, 2012.

MÍNGUEZ, M. I.; ROMERO, C.; DOMINGO, J. Determining optimum fertilizer combinations through goal programming with penalty functions: an application to sugar beet production in Spain. *Journal of the Operational Research Society*, v. 39, n. 1, p. 61-70, 1988.

MORENO GARCÍA, R. R. Procedimento para uma gestão agroambiental sustentável da cadeia produtiva de arroz – estudos de caso Brasil e Cuba. Relatório final de pesquisa. Estágio de Pós-Doutorado. Universidade Paulista (UNIP), Brasil, 2017.

ODUM, Howard T. *Environmental accounting: emergy and environmental decision making*. Wiley, 1996, 370p.

OECD. *Handbook on constructing composite indicators, methodology and user guide*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009. Disponível em: < www.oecd.org>.

OLIVEIRA M.W.; AGOSTINHO, F. ALMEIDA, C.M.V.B; GIANNETTI, B. Sustainable Milk Production: Application of the Hierarchical Analytical Process Towards a Regional Strategic Planning. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2016, v.4, p. 385-398.

ONU. United Nations Organization. Sustainable Development Knowledge Platform. 2017. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org>>. Acesso em 17 out. de 2017.

PERSSON, Å., WEITZ, N., NILSSON, M. Follow-up and Review of the Sustainable Development Goals: Alignment vs. Internalization. *Rev. Eur. Comp. Int. Environ. Law* v. 25, p. 59–68, 2016.

PÍINTER, L.; HARDI, P; MARTINUZZI, A.; HALL, J. BellagioSTAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. *Ecological Indicators*, v.17, p. 20-28, 2012.

POPOVIC, T.; PÓVOA, A. B.; KRASLAWSKI, A.; CARVALHO, A. Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains. *Journal of Cleaner Production*, p. 11822, 2018.

PRASHAR, A. Adopting PDCA (Plan-Do-Check-Act) cycle for energy optimization in energy-intensive SMEs. *Journal of Cleaner Production*, v. 145, p. 277- 293, 2017.

RAMCILOVIC S.; PULZL H. Sustainable development e A 'selling point' of the emerging EU bioeconomy policy framework? *Journal of Cleaner Production*.v.172, p. 4170-4180, 2018.

REID, J.A; BROOKSA J.L; DOLGOVA, L.; LAURICH, B.; BRITTANY, G. SULLIVAN, P. S.; WOOD, S.L.R.; BENNET, J.R.; COOKE, S.J. Post-2015 Sustainable Development Goals still neglecting their environmental roots in the Anthropocene. *Environmental Science & Policy*, v. 77, pp. 179-184, 2017.

REYERS, B.; SMITH, M. S.; ERB, K.H.; SCHOLLES, R. J.; SELOMANE, O. Essential Variables help to focus Sustainable Development Goals monitoring. *Current opinion in environmental sustainability*, vol 26-26, pp 97-105, 2017.

REYES, J.A.G; ROMERO, J.T.; GOVINDAN, K; CHERRAFI, A. RAMANATHAN, U. A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping (EVSM). *Journal of Cleaner Production*, v. 180, p.335-348, 2018.

RFD. Receita Federal do Brasil. Disponível em: <<http://www.fazenda.org.br>>, Acesso em 24 nov. 2017.

RODRIGUES, V. P.; PIGOSSO, D. C. A.; MCALOONE, T. C. Process-related key performance indicators for measuring sustainability performance of ecodesign implementation into product development. *Journal of Cleaner production*, v. 139, p. 416-428, 2016.

ROMERO, Carlos. A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research*, v. 153, n. 3, p. 675-686, 2004.

SAATY, T. L. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*, 2nd edition, Pittsburgh: RWS Publications, 2001.

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

SALA, S., CIUFFO, B. NIJKAMP, P. A systemic framework for sustainability assessment, v. 119, p.314-325, 2015.

SANGPIKUL, A. Implementing academic servisse learning and the PDCA cycle in a marketing course: Contributions to three beneficiaries. *Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism education*, v. 21, part A, p. 83-87, 2017.

SIM, J. The influence of new carbon emission abatement goals on the truck-freight transportation sector in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 153-162, 2017.

SINE. Sistema nacional de empregos, Ministério do Trabalho. Disponível em:< trabalho.gov.br/sine>. Acesso em 24 out. 2017.

SINGH, R.K., MURTY, H.R., GUPTA, S.K., DIKSHIT, A.K. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecol. Ind*, v.15 (1), p. 281–299, 2012.

SUKHDEV, P. Measuring Sustainability Glimpses of the Future. Sukhdev presentation to EAT Forum, Stockholm, 2016.

TAMIZ, M.; JONES, D. F.; EL-DARZI, E. A review of goal programming and its applications. *Annals of operations Research*, v. 58, n. 1, p. 39-53, 1995.

TAMIZ, M.; JONES, D.; ROMERO, C. Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of operational research*, v. 111, n. 3, p. 569-581, 1998.

TERAMA, E., MILLIGANI, B., JIMÉNEZ, A. R.; MACE, G.M., EKINS, P. Accounting for the environment as an economic asset: global progress and realizing the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Sustain. Sci.* 1–6., 2015.

TOUMI, Olfa; LE GALLO, Julie; REJEB, Jaleleddine Ben. Assessment of Latin American sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, p. 878-885, 2017.

TZENG, G. H.; CHEN, Y. W. The optimal location of airport fire stations: a fuzzy multi-objective programming and revised genetic algorithm approach. *Transportation Planning and Technology*, v. 23, p. 37–55, 1999.

UHEREK, E.; HALENKA, T.; BORKEN, K. J; BALKANSKI, Y.; TERJE, B.; BORREGO, C.; GAUS, M.; HOOR, P; KATARZYNA, J. R; LELIEVELD, J.; DIMITRIOS, M.; RYPDAL, K. SCHMID, S. Transport impacts on atmosphere and climate: Land Transport. *Atmospheric Environment*, v. 44, p. 4772-4816, 2010.

ULGIATI S.; ASCIONE, M.; BARGIGLI, S. CHERUBINI, F.; FRANZESE, P. P.; RAUGEI, M; VIGLIA, S; ZUCARO, A. Material, Energy and Environmental performance of technological and social systems under a Life Cycle Assessment perspective. *Ecological Modelling*, v. 22, p. 176-189, 2011.

ULGIATI, S; RAUGEI, M.; BARGIGLI, S. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. *Ecological Modelling*, v.190, p. 432–442, 2006.

UMARUSMAN, N. Min-max goal programming approach for solving multi-objective de Novo Programming Problems. *International Journal of Operations Research*, v. 10, p. 92-99, 2013.

VARZANEH, M.R. Quantifying transport sustainability: development of an index (2014). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11343/40789>>. Acesso em 14 jul. 2017

WACKERNAGEL, M.; HANSCOM, L.; LIN, D. Making the sustainable Development Goals consistent with sustainability *Frontiers in Energy Research*, 2017.

WANG, R. C.; LIANG, T. F. Project management decisions with multiple fuzzy goals. *Construction Management and Economics*, v. 22, n. 10, p. 1047-1056, 2012.

YAGHOUBI, M. A.; TAMIZ, M. A note on article A tolerance approach to the fuzzy goal programming problems with unbalanced triangular membership function. *European Journal of Operational Research*, v. 176, p. 636-640, 2007.

ZHENG, J.; GARRICK, N. W.; PALOMBO, C. A.; MCCAHILL, C.; MARSHALL, W. Guidelines on developing performance metrics for evaluating transportation sustainability. *Research in Transportation Business & Management*, v. 7, p. 4-13, 2013.

10 APÊNDICES

10.1 Apêndice A. Memorial de cálculo do sistema de transporte rodoviário (Tabela 16)

Estimativa da distância total percorrida pelo caminhão durante sua vida útil transportando soja do Mato Grosso até o Porto de Santos. Tempo de carga e descarga por viagem = $5h_{\text{carga}}/\text{viagem}$; Velocidade média do caminhão nas rodovias = 55 km/h; Horas de trabalho = 8 h/dia, 21 dias/mês, 12 meses/ano, 2.016 h/ano; Distância entre os produtores de soja ao porto de Santos, ida e volta (distância estimada no corpo do texto principal deste trabalho) = 3.782 km/viagem; Vida útil do caminhão = 15 anos, 180 meses; Conversão = $[(\text{dias/mês}) (\text{h/dia})] / [((\text{km/viagem})/(\text{km/h})) + (h_{\text{carga}}/\text{viagem})]$; Quantidade = 2,28 viagem/mês; Conversão = $(\text{viagem/mês}) (\text{km/viagem}) (\text{mês}_{\text{vida útil}})$; Quantidade = 1.552.133 km; Total de toneladas de soja = 12.153.906 ton; período de transporte = 7 meses/ano; Conversão = $(\text{ton})/(\text{meses}) = 1.736.272,28 \text{ ton/mês}$; total de toneladas transportadas por caminhão = 48 ton; Conversão = $(\text{viagem/mês}).(\text{ton/viagem}) = 109,32 \text{ ton/mês}$; Conversão para a quantidade de caminhões = $(\text{ton/mês})/(\text{ton/mês.caminhão}) = 15.882 \text{ caminhões}$.

Algumas das UEVs utilizadas abaixo estão na linha base $15,2\text{E}24 \text{ sej/ano}$ (Brown e Ulgiati, 2010), enquanto outras $15,83\text{E}24 \text{ sej/ano}$ (Odum, 2000). Desde que a diferença seja de apenas 4% entre ambas, considera-se que as mudanças estão dentro das incertezas dos números obtidos. Todas as UEVs não incluem Mão de obra e Serviços.

***** Caminhão

Nota #1 (Aço) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = $2,3\text{E}7 \text{ g/caminhão}$; Porcentagem em peso de aço = 67,5%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = $(\text{caminhões}) (\text{g/caminhão}) (\%) / (\text{ano})$; Quantidade = $1,64\text{E}10 \text{ g/ano}$; UEV do aço = $7,81\text{E}9 \text{ sej/g}$ (Brown e Ulgiati, 2004).

Nota #2 (Alumínio) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = $2,3\text{E}7 \text{ g/caminhão}$; Porcentagem em peso de alumínio = 5,8%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = $(\text{caminhões}) (\text{g/caminhão}) (\%) / (\text{ano})$; Quantidade = $1,41\text{E}9 \text{ g/ano}$; UEV do alumínio = $2,13\text{E}10 \text{ sej/g}$ (Buranakarn, 1998).

Nota #3 (Borracha) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = $2,3\text{E}7 \text{ g/caminhão}$; Porcentagem em peso de borracha = 5,7%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = $(\text{caminhões}) (\text{g/caminhão}) (\%) / (\text{ano})$; Quantidade = $1,39\text{E}9 \text{ g/ano}$; UEV da borracha = $7,22\text{E}9 \text{ sej/g}$ (Odum, 1996).

Nota #4 (Plástico) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de plástico = 7,7%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 1,88E9 g/ano; UEV do plástico = 5,51E9 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #5 (Vidro) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de vidro = 2,9%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 7,06E8 g/ano; UEV do vidro = 1,32E10 sej/g (Buranakarn, 1998; glass fiber).

Nota #6 (Cobre) -veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de cobre = 1,4%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 3,41E8 g/ano; UEV do cobre = 9,80E10 sej/g (Cohen et al., 2007).

Nota #7 (Zinco) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de zinco = 0,5%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 1,22E8 g/ano; UEV do zinco = 7,20E10 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #8 (Serviços) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Preço de mercado do caminhão = 535.541,00 R\$; Preço total dos 17020 caminhões = 9.104.732.541,00 R\$; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (R\$) / (ano); Quantidade = 1,77E8 R\$/ano ou 1,89E8 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Rodovia

Nota #9 (Asfalto) – Demanda = 910 m³/km; Densidade do asfalto = 1.600.000 g/m³; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 3,93E10 g/ano; UEV do asfalto = 2,55E10 sej/g (Brown e Buranakarn, 2003).

Nota #10 (Brita) – Demanda = 2.000 m³/km; Densidade da brita = 1.800.000 g/m³; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 9,73E10 g/ano; UEV da brita = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #11 (Calcário) – Demanda = 2.000 m³/km; Densidade do calcário = 1.900.000 g/m³; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 1,03E11 g/ano; UEV do calcário = 9,59E9 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #12 (Areia) – Demanda = 2.500 m³/km; Densidade do asfalto = 1.700.000 g/m³; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 1,15E11 g/ano; UEV da areia = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #13 (Solo) – Largura da rodovia = 14 m; Comprimento = 1.000 m; Profundidade fértil do solo = 0,2 m; Volume de solo apropriado = 2.800 m³/km; Densidade média do solo = 1.800.000 g/m³; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 1,36E11 g/ano; UEV do solo = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #14 (Serviços) – Custo de implantação da rodovia = 1.926.000,00 R\$/km (implantação e pavimentação de pista simples); Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Vida útil da rodovia = 70 anos; Conversão = (R\$/km) (km) / (ano); Quantidade = 5,20E7 R\$/ano ou 1,62E7 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Operação

Nota #15 (Diesel) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Consumo = 2,5 km/L ou 0,4 L/km; Densidade do diesel = 838,78 kg/m³; Poder calorífico superior do diesel = 45.832.000 J/kg; Distância anual percorrida = 60.360 km/ano; Conversão = (caminhões) (L/km) (kg/m³) (J/kg) (1/1000 m³/L) (km/ano); Quantidade = 1,47E16 J/ano; UEV do diesel = 1,81E5 sej/J (Brown et al., 2011).

Nota #16 (Mão de obra) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Motorista do caminhão, 1 pessoa; Velocidade média do caminhão = 55 km/h; Demanda média calórica do motorista (metabolismo) = 125 kcal/pessoa.h; Distância anual percorrida = 60.360 km/ano; Conversão = (caminhões) (pessoa) (kcal/pessoa.h) (4186 J/kcal) (km/ano) / (km/h); Quantidade = 9,12E12 J/ano; UEV da mão de obra = 1,24E7 sej/J (Brandt-Williams, 2002).

Nota #17 (Serviços) – veículos necessários = 15.882 caminhões; Custo do diesel = 3,00 R\$/L; Consumo = 2,5 km/L ou 0,4 L/km; Distância anual percorrida = 60.360 km/ano; Conversão = (caminhões) (R\$/L) (L/km) (km/ano); Quantidade = 1,15E9 R\$/ano ou 3.59E8 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

Observação: 2,28viagem / mês *3782km/viagem*7meses=60360km.

10. 2 Apêndice B. Memorial de cálculo do sistema de transporte ferroviário (Tabela 17)

Estimativa da distância total percorrida pela locomotiva durante sua vida útil transportando soja do terminal em Rondonópolis até o Porto de Santos. Tempo de carga e descarga por viagem = $5h_{\text{carga}}/\text{viagem}$; Velocidade média da locomotiva = 30 km/h; Horas de trabalho = 8 h/dia, 21 dias/mês, 12 meses/ano, 2.016 h/ano; Distância entre o terminal em Rondonópolis ao porto de Santos, ida e volta (distância estimada no corpo do texto principal deste trabalho) = 2.892 km/viagem; Vida útil da locomotiva e vagões = 20 anos, 240 meses; Conversão = $[(\text{dias/mês}) (\text{h/dia})] / [((\text{km/viagem})/(\text{km/h})) + (h_{\text{carga}}/\text{viagem})]$; Quantidade = 1,66 viagem/mês; Conversão = $(\text{viagem/mês}) (\text{km/viagem}) (\text{mês}_{\text{vida útil}})$; Quantidade = 1.152,172,80 km em sua vida útil. Total de toneladas de soja = 12.153.906 ton; período de transporte = 7 meses; Conversão = $(\text{ton})/(\text{meses}) = 1.736.272,28 \text{ ton/mês}$; total de toneladas transportada por uma composição de 80 vagões = 7200 ton; Conversão = $(\text{viagem/mês}).(\text{ton/viagem}) = 11.880 \text{ ton/mês}$; Conversão para a quantidade de número de composições (locomotiva + 80 vagões) = $(\text{ton/mês})/(\text{ton/mês.composição}) = 146 \text{ composições}$.

Algumas das UEVs utilizadas abaixo estão na linha base $15,2E24 \text{ sej/ano}$ (Brown e Ulgiati, 2010), enquanto outras $15,83E24 \text{ sej/ano}$ (Odum, 2000). Desde que a diferença é de apenas 4% entre ambas, considera-se que as mudanças estão dentro das incertezas dos números obtidos. Todas as UEVs não incluem Mão de obra e Serviços.

***** Locomotiva e vagões

Nota #1 (Aço) – veículos necessários = 146 composições; Peso do veículo = $19,7E7 \text{ g/composição}$; Porcentagem em peso de aço = 95%; Vida útil da locomotiva + vagões = 20 anos; Conversão = $(\text{composições}) (\text{g/composição}) (\%) / (\text{anos})$; Quantidade = $1,37E9 \text{ g/ano}$; UEV do aço = $7,81E9 \text{ sej/g}$ (Brown e Ulgiati, 2004).

Nota #2 (Ferro) – veículos necessários = 146 composições; Peso do veículo = $19,7E7 \text{ g/composição}$; Porcentagem em peso de aço = 5%; Vida útil da locomotiva + vagões = 20 anos; Conversão = $(\text{composições}) (\text{g/composição}) (\%) / (\text{anos})$; Quantidade = $7,19E7 \text{ g/ano}$; UEV do ferro = $5,78E9 \text{ sej/g}$ (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #3 (Serviços) – Preço da locomotiva = 7.000.000,00 R\$; Preço de cada vagão = 350.000,00 R\$/vagão; Total de vagões = 80 vagões; Preço locomotiva + vagões = 35.000.000,00 R\$; veículos necessários = 146 composições; preço total = R\$ 5.110.000.000,00; Vida útil da locomotiva + vagões = 20 anos; Conversão = $(\text{R\$}) /$

(ano); Quantidade = 255.500.000,00 R\$/ano ou 79.843.750 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Ferrovia

Nota #4 (Brita) – Demanda = 750 m³/km; Densidade da brita = 1.800.000 g/m³; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 3,90E10 g/ano; UEV brita = 1,68E9 sej/ano (Odum, 1996).

Nota #5 (Ferro) – Peso do trilho = 135,12 ton/km (2 trilhos); Demanda de clips = 24.000 clips/km, 13 kg/clip, 2 trilhos = 624 ton/km (2 trilhos); Total de ferro = 759 ton/km; Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos *** = 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (ton/km) (km) (1E6 g/ton) / (ano); Quantidade = 2,19E10 g/ano; UEV ferro = 5,78E9 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #6 (Madeira) – Demanda = 342,72 m³/km; Densidade = 730.000 g/m³; Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos *** = 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 7,23E9 g/ano; UEV = 8,80E8 sej/g (Buranakarn, 1998)

Nota #7 (Solo) – Largura da ferrovia = 3 m; Profundidade fértil do solo = 0,2 m; Volume de solo apropriado = 0,6 m³/km; Densidade média do solo = 1.800.000 g/m³; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (m³/km) (g/m³) (km) / (ano); Quantidade = 3,12E7 g/ano; UEV do solo = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #8 (Serviços) – Custo da ferrovia = 1.556.637,18 R\$/km (www.epl.gov.br); Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos *** = 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (R\$/km) (km) / (ano); Quantidade = 4,50E7 R\$/ano ou 1,41E7 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Terminal Rondonópolis

Nota #9 (Aço) – Pórtico = 12118 m², 25 kg/m² = 303 ton; Tombadores = 7 unidades, 19.500 kg/unidades = 137 ton; Total de aço = 440 ton; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (ton) (1E6 g/ton) / (ano); Quantidade = 4,4E6 g/ano; UEV do aço = 7,81E9 sej/g (Brown e Ulgiati, 2004).

Nota #10 (Blocos de concreto) – Demanda de blocos = 446 m (comprimento) * 10 m (pé direito) * 13 blocos/m² * 16,7 kg/blocos * 1000 g/kg = 9,68E8 g; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (g) / (ano); Quantidade = 6,68E6 g/ano; UEV = 2,42E9 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #11 (Fibrocimento) – Área coberta com fibrocimento = 7.136 m²; Peso específico do fibrocimento = 25 kg/m²; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (m²) (kg/m²) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 1,78E6 g/ano; UEV = 2.07E9 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #12 (Asfalto) – Área coberta com asfalto = 40.415 m²; Espessura do asfalto = 0,07 m; Densidade do asfalto = 2.000 kg/m³; Vida útil do terminal = 100 anos;

Conversão = (m²) (m) (kg/m³) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 5,66E7 g/ano; UEV = 2,55E10 sej/g (Brown e Buranakarn, 2003).

Nota #13 (Borracha) – Comprimento das correias = 438 m; Largura das correias = 1,5 m; Densidade específica da borracha = 22 kg/m²; Vida útil da correia = 4 anos; Conversão = (m) (m) (kg/m²) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 3,61E6 g/ano; UEV da borracha = 7,22E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #14 (Alumínio) – Área coberta com alumínio = 2.628 m²; Densidade específica do alumínio = 2,7 kg/m²; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (m²) (kg/m²) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 7,10E4 g/ano; UEV do alumínio = 2,13E10 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #15 (Serviços) – Custo do terminal = (230000 m²) (3043,47 R\$/m²) = 700.000.000,00 R\$; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (R\$) / (ano); Quantidade = 7,00E6 R\$/ano ou 2,06E6 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Operação

Nota #16 (Diesel) – veículos necessários = 146 composições; Consumo = 8 km/L ou 0,125 L/km; Densidade do diesel = 838,78 kg/m³; Poder calorífico superior do diesel = 45.832.000 J/kg; Distância anual percorrida = 33.547,2 km/ano; Conversão = (composições) (L/km) (kg/m³) (J/kg) (1/1000 m³/L) (km/ano); Quantidade = 2,34E13 J/ano; UEV do diesel = 1,85E5 sej/J (Brown et al., 2011).

***1,66 viagens/mês. composição* (2 * 1446) km/viagem * 7 meses/ano = 33.605,04 km/composição.ano ***

Nota #17 (Mão de obra) – Número de trabalhadores = 30 pessoas; Demanda média calórica do motorista (metabolismo) = 125 kcal/pessoa.h; Horas de trabalho anual = 2.016 h/ano; Conversão = (pessoa) (kcal/pessoa.h) (h/ano) (4186 J/kcal); Quantidade = 3,16E10 J/ano; UEV da mão-de-obra = 1,24E7 sej/J (Brandt-Williams, 2002). veículos necessários = 146 composições; Maquinista da composição, 1 pessoa; Velocidade média do composição = 30 km/h; Demanda média calórica do motorista (metabolismo) = 125kcal/pessoa.h; Distância anual percorrida = 33.605,04 km/ano; Conversão = (composições) (pessoa)(kcal/pessoa.h) (4186 J/kcal) (km/ano) / (km/h); Quantidade = 7,70E10 J/ano; UEV da mão-de-obra = 1,24E7 sej/J (Brandt-Williams, 2002). Quantidade total = 3,16E10 + 7,70E10 = 1.09E11 J/ano.

Nota #18 (Eletricidade) – Demanda média = 400 kWh/m².ano; Área dos armazéns = 12118 m²; Conversão = (kWh/m².ano) (m²) (1.000 W/kW) (3.600 s/h); Quantidade = 1,74E13 J/ano; UEV da eletricidade = 1,45E5sej/J (Giannetti et al., 2015).

Nota #19 (Serviços) – veículos necessários = 146 composições; Custo do diesel = 3,00 R\$/L; Consumo = 8km/L ou 0,125 L/km; Distância anual percorrida = 33.605.04 km/ano; Custo da eletricidade = 0,3373 R\$/kWh; Demanda média de eletricidade = 400 kWh/m².ano; Área dos armazéns = 12.118 m²; Conversão = [(composições)(R\$/L) (L/km) (km/ano)] + [(R\$/kWh) (kWh/m².ano) (m²)]; Quantidade = 3,48E6 R\$/ano ou 1,09E6 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

10.3 Apêndice C. Memorial de cálculo do sistema de transporte rodoviário para rota 1

Estimativa da distância total percorrida pelo caminhão durante sua vida útil transportando soja do Mato Grosso até o Porto de Santos. Tempo de carga e descarga por viagem = $5h_{\text{carga}}/\text{viagem}$; Velocidade média do caminhão nas rodovias = 55 km/h; Horas de trabalho = 8 h/dia, 21 dias/mês, 12 meses/ano, 2.016 h/ano; Distância entre os produtores de soja ao porto de Santos, ida e volta (distância estimada no corpo do texto principal deste trabalho) = 1.068 km/viagem; Vida útil do caminhão = 15 anos, 180 meses; Conversão = $[(\text{dias/mês}) (\text{h/dia})] / [((\text{km/viagem})/(\text{km/h})) + (h_{\text{carga}}/\text{viagem})]$; Quantidade = 6.88 viagem/mês; Conversão = $(\text{viagem/mês}) (\text{km/viagem}) (\text{mês}_{\text{vida útil}})$; Quantidade = 1.552.133 km; Total de toneladas de soja = 12.153.906 ton; período de transporte = 7 meses/ano; Conversão = $(\text{ton})/(\text{meses}) = 1.736.272,28 \text{ ton/mês}$; total de toneladas transportadas por caminhão = 48 ton; Conversão = $(\text{viagem/mês}).(\text{ton/viagem}) = 330 \text{ ton/mês}$; Conversão para a quantidade de caminhões = $(\text{ton/mês})/(\text{ton/mês.caminhão}) = 5.258 \text{ caminhões}$.

10.4 Apêndice D. Conversão da emergia de sej/ano para sej/ton.km

***** Modal rodoviário (trecho região produtora ao terminal Rondonópolis)

Cálculo do total de toneladas por caminhão por ano:

$$\begin{aligned} (6,88 \text{ viagens/caminhão.mes}) (7\text{meses/ano}) &= 48,16 \text{ viagens/caminhão.ano} \\ (48,16 \text{ viagens/caminhão.ano}). (1068\text{km/viagem}) &= 51.434 \text{ km/caminhão.ano} \\ (48,09 \text{ viagens/caminhão.ano}) (48 \text{ ton/viagem}) &= 2.311,72 \text{ ton/caminhão.ano} \end{aligned}$$

Cálculo do número total de caminhões e total de km para transportar o total de toneladas de soja por ano:

$$\begin{aligned} (12.153.906 \text{ ton/ano}) / (2.311,72 \text{ ton/caminhão.ano}) &= 5.258 \text{ caminhões} \\ (51.434 \text{ km/caminhão.ano}) (5.258) &= 2,70 \text{ E}+08 \text{ km/ano} \end{aligned}$$

Cálculo em emergia do trecho 1 para o total de toneladas de soja por quilometro:

$$\begin{aligned} (\text{sej/ ano}) / [(\text{km/ano}). (\text{ton})] \\ (3,57\text{E}+21\text{sej/ano}) / [(2,70 \text{ E}+08 \text{ km/ano}). (12.153.906 \text{ ton})] &= 1,09 \text{ E}+06 \\ \text{sej/ton.km} \end{aligned}$$

***** Modal rodoviário (trecho região produtora ao porto de Santos)

Cálculo do total de toneladas por caminhão por ano:

$$\begin{aligned} (2,28 \text{ viagens/caminhão.mes}) (7 \text{ meses/ano}) &= 15,96 \text{ viagens/caminhão.ano} \\ [15,96 \text{ viagens/caminhão.ano}] (3782 \text{ km/viagem}) &= 60.360,72 \text{ km/caminhão.ano} \\ (15,96 \text{ viagens/caminhão.ano}) (48 \text{ ton/viagem}) &= 766,08 \text{ ton/caminhão.ano} \end{aligned}$$

Cálculo do número total de caminhões e total de km para transportar o total de toneladas de soja por ano:

$$\begin{aligned} (12.153.906 \text{ ton/ano}) / (766,08 \text{ ton/caminhão.ano}) &= 15.882 \text{ caminhões} \\ (60.360,72 \text{ km/caminhão.ano}) (15.882 \text{ caminhões}) &= 9,58\text{E}+8 \text{ km/ano} \end{aligned}$$

Cálculo em energia do sistema rodoviário para o total de toneladas de soja por quilometro:

$$\begin{aligned} (\text{sej/ano}) / [(\text{km/ano}). (\text{ton})] \\ (5,59\text{E}+21 \text{ sej/ano}) / [(9,58\text{E}+8 \text{ km/ano}). (12.153.906 \text{ ton})] &= 4,80\text{E}+05 \text{ sej/ton.km} \end{aligned}$$

***** Modal ferroviário (trecho terminal Rondonópolis ao porto de Santos)

Cálculo do total de toneladas por composição por ano:

$$\begin{aligned} (1,66 \text{ viagens/composição.mes}) (7 \text{ meses/ano}) &= 11,62 \text{ viagens/composição.ano} \\ (11,62 \text{ viagens/composição.ano}) (2892 \text{ km/viagem}) &= 33.605 \text{ km/composição.ano} \end{aligned}$$

Cálculo do número total de composições e total de km para transportar o total de toneladas de soja por ano:

$$\begin{aligned} (12.153.906 \text{ ton/ano}) / (83.160 \text{ ton/composição.ano}) &= 146 \text{ composições} \\ (33.605 \text{ km/composição.ano}) (146 \text{ composições}) &= 4,89 \text{E}+06 \text{ km/ano} \end{aligned}$$

Cálculo em energia do sistema ferroviário para o total de toneladas de soja por quilometro:

$$\begin{aligned} (\text{sej/ano}) / [(\text{km/ano}). (\text{ton})] \\ (2,21 \text{E}+20) / (4,89\text{E}+06 \text{ km/ano}) (12.153.906 \text{ ton}) &= 3,72 + \text{E}6 \text{ sej/ton.km} \end{aligned}$$

10.5 Apêndice E. Planilha de Cálculo do WSI

IDENTIFICAÇÃO		INDICADORES AMBIENTAIS, Provedor (Setor 1)								
Índice	Sistemas	K11 - Energia	Nij (K11)	Pij (K11)	ISM (K11)	K12 - Área influência	Nij (K12)	Pij (K12)	ISM (K12)	ISMES SETOR 1
1	Sistema FERROVIÁRIO	4.81E+06	0,00E+00	4,33E+06	9.02083	12,25	0,00	0,00	0.00000	9.02083
2	Sistema RODOVIÁRIO	4.80E+05	0,00E+00	0,00E+00	0.00000	37,34	0,00	25,09	2.04816	2.04816
	Menor X(i)	4.80E+05				12,25				
	Maior X(i)	4.81E+06				37,34				
	Meta seleccionada	4.80E+05	4,80E+05	4,80E+05		12,25	12,25	12,25		
		0.00E+00				0,00				
		4.80E+05				12,25				
	Peso da aspiração da meta		4,5	1			4,5	1		
	Ação desejada	Minimizar				Minimizar				

		INDICADORES AMBIENTAIS, Recetor (Setor 2)								
Sistemas	K21 - Aquecimento global	Nij (K21)	Pij (K21)	ISM (K21)	K22 - Acificação	Nij (K22)	Pij (K22)	ISM (K22)	ISMES SETOR 2	
Sistema FERROVIÁRIO	383,84	0,00	0,00	0,00	1,27E-03	0,00E+00	1,90E-04	0,17593	0,1759	
Sistema RODOVIÁRIO	1222,91	0,00	839,07	2,19	1,08E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00000	2,1860	
Menor X(i)	383,84				1,08E-03					
Maior X(i)	1222,91				1,27E-03					
Meta seleccionada	383,84	383,84	383,84		1,08E-03	1,08E-03	1,08E-03			
	0,00				0,00E+00					
	383,84				1,08E-03					
Peso da aspiração da meta		4,5	1			4,5	1			
Ação desejada	Minimizar				Minimizar					

	INDICADORES ECONÓMICOS, Empresa (Setor 3)									
Sistemas	K31 - Receita	Nij (K31)	Pij (K31)	ISM (K31)	K32 - Lucro	Nij (K32)	Pij (K32)	ISM (K32)	ISMES SETOR 3	
Sistema FERROVIÁRIO	585.68	684.88	0.00	0.5390	5.84	0.00	0.00	0.00000	0.539	
Sistema RODOVIÁRIO	1270.56	0.00	0.00	0.0000	1.41	4.43	0.00	0.75856	0.759	
Menor X(i)	585.68				1.41					
Maior X(i)	1270.56				5.84					
Meta seleccionada	1270.56	1270.56	1270.56		5.84	5.84	5.84			
	0.00				0.00					
	1270.56				5.84					
Peso da aspiração da meta		1	1.8			1	1.8			
Ação desejada	Maximizar				Maximizar					

	INDICADORES SOCIAIS, Provedor (Setor 4)									
Sistemas	K41 - Empregos	Nij (K41)	Pij (K41)	ISM (K41)	K42 - salários	Nij (K42)	Pij (K42)	ISM (K42)	ISMES SETOR 4	
Sistema FERROVIÁRIO	0,10	0,00	0,00	0,00000	2146,05	0,00	0,00	0,00000	0,000	
Sistema RODOVIÁRIO	0,09	0,01	0,00	0,10000	1825,58	320,47	0,00	0,14933	0,249	
Menor X(i)	0,09				1825,58					
Maior X(i)	0,10				2146,05					
Meta selecionada	0,10	0,10	0,10		2146,05	2146,05	2146,05			
	0,00				0,00					
	0,10				2146,05					
Peso da aspiração da meta		1	2,7			1	2,7			
Ação desejada	Maximizar				Maximizar					

	INDICADORES SOCIAIS, Consumidor (Setor 5)										
Sistemas	K51 - CO	Nij (K51)	Pij (K51)	ISM (K51)	K52 - acidente	Nij (K52)	Pij (K52)	ISM (K52)	ISMES SETOR 5	WSI	
Sistema FERROVIÁRIO	6,10E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00000	0,42	0,00	0,00	0,00000	0,0000	9,74	
Sistema RODOVIÁRIO	7,45E-01	0,00E+00	1,35E-01	0,22131	1,26	0,00	0,84	2,00000	2,2213	7,46	
Menor X(i)	6,10E-01				0,42						
Maior X(i)	7,45E-01				1,26						
Meta selecionada	6,10E-01	6,10E-01	6,10E-01		0,42	0,42	0,42				
	0,00E+00				0,00						
	6,10E-01				0,42						
Peso da aspiração da meta		2,7	1			2,7	1				
Ação desejada	Mimizar				minimizar						