UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADA) DE INDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS: UM ESTUDO MULTICASOS

André Gustavo de Brito Thomaz
ADMINISTRADOR

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADA) DE INDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS: UM ESTUDO MULTICASOS

André Gustavo de Brito Thomaz

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Girotto Rebelato

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Administração.

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Thomaz, André Gustavo de Brito
T465c Construção de uma estrutura metodológica para Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) de indústrias sucroenergéticas: um estudo multicasos / André Gustavo de Brito Thomaz. – – Jaboticabal, 2017
x, 115 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017
Orientador: Marcelo Girotto Rebelato
Banca examinadora: Otávio José de Oliveira, Ethel Cristina Chiari da Silva
Bibliografia

1. Análise Hierárquica de Processos Melhorada. 2. EDIP. 3. Potencial de toxicidade humana. 4. Sucroenergia. 5. Gestão Ambiental I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 658.56:502.13

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADA) DE INDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS: UM ESTUDO MULTICASOS

AUTOR: ANDRÉ GUSTAVO DE BRITO THOMAZ
ORIENTADOR: MARCELO GIROTTO REBELATO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ADMINISTRAÇÃO, área: GESTÃO DE ORGANIZAÇÕES AGROINDUSTRIAIS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO GIROTTO REBELATO
Departamento de Economia, Administração e Educação / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. OTAVIO JOSE DE OLIVEIRA - VIDEOCONFERÊNCIA
Departamento de Engenharia de Produção / UNESP / Guaratinguetá/SP

Profa. Dra. ETHEL CRISTINA CHIARI DA SILVA
Departamento de Engenharia de Produção / UNIARA - Araraquara/SP

Jaboticabal, 06 de setembro de 2017

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

André Gustavo de Brito Thomaz, nascido em Jaboticabal/SP, é Especialista em Gestão em Marketing Digital (2015) pelo UniSeb e Bacharel em Administração pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (2014). Com experiência na área de Administração Geral, com ênfase Marketing, Gestão Financeira, Recursos Humanos e Gestão Ambiental. Exerceu o cargo de Professor de Administração na Associação Taned de Ensino Superior no 1º semestre/2016 e atualmente trabalha na empresa Sucrana Assessoria e Tecnologia SS Ltda, no cargo de Analista Financeiro. Em setembro de 2015 ingressou no Programa de Pós-graduação em Administração, nível de mestrado profissional, do Departamento de Economia e Administração da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCAV/UNESP) sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Girotto Rebelato.

“Posso todas as coisas Naquele que me fortalece. Fp 4:13”

Dedico esse trabalho à Deus, à minha família e aos meus amigos!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, sem Ele eu nada seria;

À minha família e verdadeiros amigos, por todo apoio;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Girotto Rebelato, por ter aceitado me orientar e que se colocou à disposição para me ajudar em todas as etapas deste trabalho;

À Profa. Dra. Andreia Marize Rodrigues, pelo apoio de sempre, incentivo e inspiração;

A Bruna Sousa Ferreira, parceira de mestrado, uma das melhores pessoas que já conheci;

Ao Prof. Aldo Ometto e o Prof. Leonardo Madaleno por suas contribuições e orientações na fase de qualificação que me auxiliaram para o direcionamento do desenvolvimento deste trabalho;

Por fim, agradeço a todos que, mesmo em sua mais breve passagem ou curta convivência me ofereceram sua contribuição, de qualquer natureza, para a realização deste trabalho. A vocês, o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1 Apresentação da pesquisa 18
1.2 Problema de pesquisa 18
1.3 Objetivo 20
1.3.1 Objetivo Geral 20
1.3.2 Objetivos Específicos 20
1.4 Justificativa 21
2 MÉTODOS DE PESQUISA 24
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 31
3.1 Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) 31
3.2 Indicadores de avaliação de desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana 39
3.2.1 CML 2002 41
3.2.2 Eco-indicator 99 42
3.2.3 EDIP 1997- EDIP 2003 42
3.2.4 EPS 2000 43
3.2.5 IMPACT 2002+ 43
3.2.6 LIME 44
3.2.7 LUCAS 44
3.2.8 MEEuP 45
3.2.9 ReCiPe 45
3.2.10 TRACI 46
3.2.11 USEtox 46
3.2.12 IMPACT World + ... 46
3.2.13 Análise dos métodos estudados 47
4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS 51
4.1 Resíduos e subprodutos gerados no processo de fabricação sucroenergético 62
4.1.1 Vinhaça 62
4.1.2 Óleos lubrificantes da fábrica 63
4.1.3 Melaço 63

4.1.4 Óleo fúsel 63
4.1.5 Pilhas e baterias 64
4.1.6 Lâmpadas queimadas 64
4.1.7 Sucatas ferrosas 64
4.1.8 Torta de filtro 64
4.1.9 Levedura 65
4.1.10 Flegmaça 65
4.1.11 Resíduos dos laboratórios 65
4.1.12 Efluente da lavagem dornas 66
4.1.13 Efluente da lavagem pisos equipamentos 66
4.1.14 Cinzas da queima do bagaço 66
4.1.15 Gases provenientes da queima do bagaço 67
4.1.16 Efluente tratamento dos gases combustão 67
4.1.17 Efluente gasoso das dornas de fermentação 67
5 RESULTADOS 70
5.1 Estudo multicasos - Contexto investigado 70
5.2 Cálculo dos potenciais de toxicidade humana 73
5.3 Aplicação da estrutura metodológica 78
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 89
6.1 Contribuições Gerenciais 93
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 95
7.1 Limitações do Trabalho e Trabalhos futuros 97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADA) DE INDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS: UM ESTUDO MULTICASOS

RESUMO – O objetivo desta pesquisa é apresentar um estudo multicasos sobre avaliação de desempenho ambiental baseada no potencial de toxicidade humana em três empresas (denominadas por empresa A, B e C) da indústria sucroenergética brasileira. Foi desenvolvido um índice, exclusivo para indústrias do setor sucroenergético, chamado indicador do potencial de toxicidade humana I*pth*, onde os cálculos para obtenção do índice são formados por meio da ponderação do potencial de impacto de cada resíduo e subproduto gerado na fabricação de etanol e açúcar, pela cobertura geográfica relativa que podem alcançar e pela avaliação da destinação final realizada pela indústria. Identificou-se que na literatura especializada há poucos trabalhos relacionados à avalição do desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana de indústrias do setor sucroenergético, bem como metodologias para avaliação do desempenho ambiental destas indústrias com o uso de indicadores de desempenho ambiental. O método desenvolvido pode ser aplicado para medir o impacto ambiental gerado por qualquer indústria do setor sucroenergético. Como resultados, os resíduos/subprodutos que apresentam maior potencial de toxicidade humana são: vinhaça (35,57%), torta de filtro (29,15%), cinzas da queima do bagaço (27,38%), gases provenientes da queima do bagaço (4,73%), representando 96,83% do total. A vinhaça é o subproduto com maior participação relativa na formação do índice I_{pth}, sendo para a empresa A de 89,73%, para a empresa B de 89,55% e para a empresa C de 89,24%. Apesar da grande quantidade de resíduos e subprodutos gerados, o resultado alcançado é favorável às empresas estudadas. O índice I*pth* resultou em 93,97% para a empresa A, em 93,62% para a empresa B e em 93,37% para a empresa C, demonstrando que as empresas A, B e C apresentam, respectivamente, 93,97%, 93,62% e 93,37% de práticas ambientalmente adequadas à destinação dos seus resíduos e subprodutos.

Palavras-chave: Análise Hierárquica de Processos Melhorada, EDIP, Potencial de Toxicidade Humana, Sucroenergia, Gestão Ambiental.

CONSTRUCTION OF A METHODOLOGICAL STRUCTURE FOR ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT (EPA) OF SUUGARCANE INDUSTRIES: A MULTICASES STUDY

ABSTRACT – The objective of this research is to present a multi-case study on the evaluation of environmental performance based on human toxicity potential in three companies (denominated by company A, B and C) of the Brazilian sugarcane industry. Was developed an index, exclusively for industries of the sugarcane industry, called the human toxicity potential indicator I_{pth}, where the calculations for obtaining the index are formed by weighing the impact potential of each residue and by-product generated in the manufacture of ethanol and sugar, by the relative geographic coverage they can achieve And by the evaluation of the final disposal by the industry. It was identified that in the specialized literature there are few studies related to the environmental performance assessment based on the human toxicity potential of sugarcane industry industries, as well as methodologies to evaluate the environmental performance of these industries with the use of environmental performance indicators. The method developed can be applied to measure the environmental impact generated by any industry in the sugarcane sector. As results, the residues / by-products with the highest human toxicity potential are: vinasse (35.57%), filter cake (29.15%), bagasse burning ashes (27.38%), gases from burning Of the bagasse (4.73%), representing 96.83% of the total. Vinasse is the by-product with the highest relative participation in the formation of the I_{pth} index, with company A of 89.73%, company B of 89.55% and company C of 89.24%. Despite the large amount of waste and by-products generated, the result achieved is favorable to the companies studied. The I_{pth} index resulted in 93.97% for company A, 93.62% for company B and 93.37% for company C, showing that companies A, B and C have, respectively, 93.97% %, 93.62% and 93.37% of practices that are environmentally appropriate to the destination of their residues and by-products.

Keywords: Improved Process Hierarchical Analysis, EDIP, Potential Human Toxicity, Sugarcane, Environmental management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de produção de etanol.....52
Figura 2 - Armazenamento da cana.....53
Figura 3 - Tombador de cana.....53
Figura 4 - Decantador de cinzas (fuligem).....55
Figura 5 - Peneiras.....55
Figura 6 - Preparo da cal.....56
Figura 7 - Aquecedores.....57
Figura 8 - Decantador.....57
Figura 9 - Evaporadores.....58
Figura 10 - Cozedores.....59
Figura 11 - Tanque de armazenagem de etanol.....61
Figura 12 - Vinhaça para fertirrigação.....63
Figura 13 - Cana separada para analises.....66
Figura 14 - Cinzas em processo de decantação.....67
Figura 15 - Fluxograma de gerenciamento de resíduos e subprodutos.....71
Figura 16 - Estrutura de analise hierárquica para ponderação dos resíduos e subprodutos gerados nos processos de fabricação sucroenergéticos.....79
Figura 17 - $R_{a(i)}$ Razão dos 17 resíduos/produtos da indústria sucroenergética.....82
Figura 18 - Gráfico do potencial de impacto na saúde humana dos resíduos e subprodutos gerados nos processos de fabricação sucroenergéticos.....82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios utilizados na cobertura geográfica dos resíduos 30

Tabela 2 – Resíduos e subprodutos gerados nos processos de fabricação sucroenergéticos 69

Tabela 3 – Composição química da vinhaça.....74

Tabela 4 – Composição química da vinhaça no âmbito brasileiro.....74

Tabela 5 - Quantidade, fatores de equivalência e potencial de toxicidade humana da vinhaça.....76

Tabela 6 – Potencial de toxicidade humana da vinhaça 76

Tabela 7 – Potenciais de Toxicidade Humana para os resíduos e subprodutos da indústria sucroenergética 77

Tabela 8 – Potenciais de Toxicidade Humana para os resíduos e subprodutos da indústria sucroenergética 79

Tabela 9 - Peso relativo do potencial de toxicidade humana de cada resíduo/subproduto 81

Tabela 10 - Quantidade absoluta (b_i) dos resíduos/subprodutos no processo de fabricação estudado 83

Tabela 11 - Destinação e avaliação categórica dos resíduos/subprodutos da empresa A 84

Tabela 12 – Destinação e avaliação categórica dos resíduos/ subprodutos da empresa B 84

Tabela 13 – Destinação e avaliação categórica dos resíduos/subprodutos da empresa C.....85

Tabela 14 – Resultados de $V_{(a)i}$, (bi), (Qi), (Ai), (ki), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para a empresa A.....86

Tabela 15 – Resultados de $V_{(a)i}$, (bi), (Qi), (Ai), (ki), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para a empresa B.....86

Tabela 16 – Resultados de $V_{(a)i}$, (bi), (Qi), (Ai), (ki), I_{pth} e percentual de participação no Ipth geral para a empresa C.....87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais métodos de ADA e suas características.....48

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADA	Avaliação do Desempenho Ambiental
AHP	*Analytic Hierarchy Process*
API	*American Petroleum Institute*
BSC	*Balanced Score Card*
CMA	*Chemical Maufactures Association*
EBSCSC	*Environmental Balanced Scorecard for Supply Chain*
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de Oxigênio
EDIP	*Environmental Design of Industrial Products*
EF	Fator de Equivalência
GRI	*Global Reporting Initiative*
IAHP	*Improved Analytic Hierarchy Process*
IDA	Indicadores do Desempenho Ambiental
IDG	Indicadores de desempenho de gerenciamento
IDO	Indicadores de Desempenho Operacional
ISO	*International Organization for Standardization*
I_{pth}	Índice do potencial de toxicidade humana
HTF	*Human Toxicity Factor*
HRC	*Human Toxicity Concentration*
HRD	*Human Toxicity Reference*
HTA	*Hazard Toxicity Air*
HTW	*Hazard Toxicity Water*
HTS	*Hazard Toxicity Soil*
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RTECS	*Registry of toxic effects of chemical substances*
SGA	Sistemas de Gestão Ambiental
STEP	*Strategies for Today´s Environmental Partnership*
SGADA	Sistema de Gestão e Avaliação de Desempenho Ambiental

1. INTRODUÇÃO

A temática ambiental vem sendo cada vez mais discutida nas esferas política, empresarial e acadêmica. Desde a década de 1990, a questão ambiental vem se firmando com pesquisas de extensão acerca do tema. Referente à esfera empresarial, há um aumento lento e gradual em que se inclui a temática ambiental nos processos administrativos e produtivos. Na esfera política evidencia-se um avanço nas questões ambientais com a integração das políticas ambientais e econômicas (JABBOUR et al., 2012; MUNKSGAARD et al., 2017).

O avanço tecnológico nos processos industriais aliado ao aumento do consumo de recursos naturais e a emissão de substâncias tóxicas e perigosas vem se tornando um problema para o meio ambiente e a saúde humana (SONG et al., 2016; ZUI et al., 2017). Com isso, verifica-se que em 2010, foi promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, considerada um avanço para a preservação ambiental. Esta Lei apresenta como propósito instituir o princípio da responsabilidade compartilhada entre governo, empresas e população, o sistema da logística reversa e a obrigatoriedade da realização do gerenciamento dos resíduos pelo poder público. As indústrias deverão assim, adotar tecnologias limpas como maneira de minimizar o impacto ambiental (JABBOUR et al., 2014).

A inclusão da temática ambiental nas organizações decorre do aumento da competitividade do setor industrial na economia, fato que motiva o desenvolvimento de metodologias para melhoria dos processos administrativos e produtivos (SILVA e AMARAL, 2011). A inclusão dessa temática nos processos administrativos e produtivos leva ao surgimento de uma nova função organizacional: a gestão empresarial ambiental (RODRIGUES, 2015).

Entende-se como gestão ambiental empresarial o conjunto de diretrizes e atividades administrativas e operacionais de forma a minimizar as externalidades negativas sobre o meio ambiente (CORAZZA, 2003). Dessa forma, as empresas buscam mensurar, controlar e divulgar suas práticas ambientais. Esse processo se desenvolve através da implementação de uma avaliação de desempenho ambiental e do estabelecimento de indicadores ambientais (HENRI e JOURNEAULT, 2008).

Frente a essas questões, constata-se interesse para mensurar o desempenho ambiental das empresas, mas destaca-se que as metodologias de avaliação de desempenho ambiental e a utilização de indicadores para tal finalidade carecem de aprimoramento, apesar de encontrar em alguns estudos indicadores de desempenho sendo aplicados como ferramentas efetivas para melhoria das práticas empresariais e ambientais (TRIERWEILLER et al., 2014; HENRI e JOURNEAULT, 2008).

Com isso, encontrar o caminho, a melhor forma de compreender e melhorar o seu desempenho ambiental tem sido o foco de muitas organizações. Para tal finalidade ser alcançada é necessário administrar de modo eficaz os produtos e serviços que podem impactar negativamente o meio ambiente. A norma ISO 14031 descreve Avaliação do Desempenho Ambiental (ADA) como uma ferramenta de gestão para fornecer informações confiáveis para determinar se o desempenho ambiental da organização está adequado (NBR ISO 14031, 2004). A ADA pode auxiliar uma organização a identificar os aspectos ambientais, determinar quais aspectos serão tratados com relevância, estabelecer critérios e avaliar o desempenho ambiental baseado nesses critérios (HARIZ; BAHMED, 2013).

Assim, a avaliação de desempenho ambiental é um processo que busca facilitar as tomadas de decisões gerenciais sobre o desempenho ambiental de determinada organização através do uso de indicadores, coleta e análise de dados, avaliação de informações de acordo com critérios de desempenho ambiental além de divulgação, revisão e aperfeiçoamento desse processo (ABNT, 2015).

Para a aplicação de uma estrutura de ADA as empresas devem apresentar em seu planejamento ambiental indicadores consistentes, e que apresentem um padrão estabelecido, permitindo assim se realizar uma comparação na ADA entre as empresas de um mesmo setor de atuação. Verifica-se, atualmente, um crescente aumento de estudos publicados acerca de ADA, o que evidencia os esforços da academia para encontrar formas mais adequadas para avaliar e interpretar o desempenho ambiental dos processos produtivos (ZEVIANI et al., 2013, OSTAD-AHMAD-GHORABI; ATTARI, 2013).

Em concordância com o exposto acima, verifica-se que alternativas para a mensuração do desempenho ambiental são importantes para o alcance de objetivos produtivos paralelos com os impactos ambientais, estabelecendo-se assim a

necessidade de ser desenvolvido indicadores de desempenho ambiental, para expor os impactos das operações industriais ao meio ambiente e consequentemente à saúde humana (REBELATO et al., 2016). A avaliação do aspecto ambiental é uma tarefa complexa e que leva em consideração um grande número de fatores. Tal complexidade reside, também, no fato de existirem muitos critérios subjetivos e com isso torna-se inviável estabelecer um valor monetário para custos e benefícios intangíveis como o valor de uma reserva natural ou o custo para o ambiente absorver poluentes (LOPES, 2015).

No entanto, verifica-se que a literatura atual sobre ADA não apresenta consenso absoluto sobre quais critérios ambientais devem ser mensurados. Muitos autores propõem estruturas e metodologias de ADA das atividades industriais baseadas em diferentes aspectos dentre os quais os impactos à saúde humana.

Os impactos à saúde humana, no domínio de ADA em processos de fabricação, referem-se à influência que resíduos, efluentes, emissões e subprodutos industriais possuem sobre os seres humanos, pontuando o nível de periculosidade que estas emissões oferecem ao bem-estar e à continuidade da vida humana (Yeo; Neo, 1988). O estudo dos impactos à saúde humana pode levar em consideração distintas categorias de impacto, estando entre elas a toxicidade humana (Wenzel, 1997; Steen, 1999; ITSUBO, 2004; GUINÉE, 2002; TOFFOLETTO et al., 2007). Segundo Wenzel et al. (1997), a toxicidade humana é ocasionada pelas substâncias químicas com alto teor venenoso que atingem o ser humano através do ambiente. O ser humano, exposto a estas emissões através dos compartimentos solo, água e atmosfera, pode ter sua saúde negativamente afetada a depender do grau de toxicidade inerente à sua composição.

É importante salientar, no entanto, que o potencial de toxicidade humana de resíduos oriundos de operações produtivas varia de acordo com natureza das operações necessárias à produção de seus produtos. Dentre as indústrias que apresentam um rol de resíduos e subprodutos potencialmente impactantes no que tange à toxicidade humana está a indústria sucroenergética que, a partir do processamento da cana de açúcar, é responsável pela produção de etanol, açúcar e de energia, além de outros subprodutos comercializáveis. Estes impactos originam-se ao longo de todo o processo produtivo, a partir da elevada geração de resíduos

sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas originados nas etapas de transformação necessárias à geração dos produtos desta indústria. Uma planta industrial sucroenergética libera resíduos/subprodutos tais como a vinhaça, a torta de filtro, cinzas, gases provenientes da queima do bagaço, efluentes de lavagem de dornas, entre outros, os quais podem impactar significativamente a saúde humana caso sejam inadequadamente destinados dado seu elevado potencial de toxicidade humana (REBELATO et al., 2013). Frente à estas considerações, a indústria sucroenergética atua visando a mitigação dos efeitos negativos ao meio ambiente e a saúde humana proveniente de suas atividades de fabricação (INGARAMO et al., 2009; SAHU, CHAUDHARI, 2015).

Atualmente, as empresas da indústria sucroenergética bem como empresas relacionadas aos setores químico, mineração, petróleo, siderurgia, celulose e papel, geração de energia e transportes, que também apresentam processos altamente poluidores, estão adotando estratégias para mitigação do risco ambiental (EPELBAUM, 2013). Dessa forma, as empresas da indústria sucroenergética buscam a aplicação contínua de uma estratégia ambiental de forma preventiva e integrada para processos, produtos e serviços, de modo a aumentar a eficiência de produção e reduzir os riscos humanos e ambientais (CASTILLO-VERGARA et al., 2015). Assim, torna-se uma alternativa essencial pesquisar metas de produção relacionadas com questões ambientais, o que sugere o desenvolvimento de indicadores de desempenho ambiental para mostrar os impactos potenciais das operações industriais no meio ambiente e a saúde humana.

As diversas atividades produtivas de uma empresa apresentam diferentes impactos no meio ambiente, que podem acarretar em impactos à saúde humana, e os indicadores de ADA devem considerar a especificidade dos bens produzidos e a natureza dos processos adotados. Tal fato se deve à grande diversidade de produtos químicos, gases, compostos orgânicos entre outros, que são gerados e descartados pela indústria (REBELATO et al., 2013). Sendo assim, o uso da ADA torna necessário o conhecimento de cada etapa de fabricação afim de se identificar todos os resíduos e subprodutos gerados, de modo que se possa apresentar seus potenciais efeitos sobre a saúde humana (WONG et al., 2016).

O pesquisador contribui juntamente com outras pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de estruturas metodológicas para avaliação do desempenho ambiental, baseadas no potencial de toxicidade humana, aplicadas à industrias sucroenergética, uma vez que essa indústria apresenta grande valor econômico no país e em escala global, apesar ser alvo de inquietações e julgamentos críticos relativos aos impactos ambientais negativos dos seus processos produtivos (MACHADO; SILVA, 2010). Contribui-se com esse estudo para uma aplicabilidade metodológica em outras empresas e pesquisas que pretendam ou que necessitem avaliar ou implementar as atividades associadas à gestão ambiental e avaliação do desempenho ambiental.

1.1 Apresentação da pesquisa

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete seções.

A seção um apresenta a introdução, a apresentação da pesquisa identificando o problema da pesquisa, seus objetivos e justificativa. A seguir são apresentadas as etapas metodológicas adotadas para a presente dissertação. Na seção três é realizada uma discussão sobre os principais assuntos deste trabalho, quer sejam avaliação de desempenho ambiental e indicadores de avaliação de desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana. Na seção quatro é apresentado o processo de fabricação sucroenergético e os resíduos e subprodutos por ele gerados. Na seção cinco são apresentados os resultados do estudo multicasos e, a seguir, na seção seis, tem-se uma discussão acerca dos resultados obtidos. Por fim, a seção sete traça as considerações finais sobre o desenvolvimento da pesquisa.

1.2 Problema de pesquisa

As ações antrópicas da indústria sucroenergética, derivadas das atividades industriais, têm como consequência a geração de resíduos e subprodutos que podem ser potencialmente impactantes à saúde humana. Dessa forma, apesar de apresentar importância econômica no cenário nacional, a indústria sucroenergética tem sido alvo

de críticas acerca dos impactos negativos ao meio ambiente e, consequentemente à saúde humana, originados por suas atividades industriais (MACHADO; SILVA, 2010).

O potencial de impacto da indústria sucroenergética apresenta inúmeros riscos que podem afetar negativamente o solo, água e atmosfera e consequentemente à saúde humana, além de causar impactos sociais como alterações no modo de produção dos municípios inseridos na economia sucroenergética, competição com outros cultivos alimentares e concentração da posse da terra (JABBOUR et al., 2014). As atividades de fabricação de açúcar e etanol, geradora de resíduos e subprodutos como a vinhaça, a torta de filtro, a levedura, a flegmaça entre outros, apresentam diversas etapas que se não forem gerenciadas adequadamente podem impactar negativamente solo, água, atmosfera e à saúde humana (ANA, 2009).

Com isso, apesar da existência de leis com vistas à regulação das atividades industriais, buscando a prevenção e minimização dos impactos de suas operações produtivas (OLIVEIRA et al., 2009), as indústrias sucroenergéticas vem adotando práticas de gestão ambiental mais modernas em suas atividades industriais, visando à mitigação do passivo ambiental decorrente de suas operações produtivas. A busca por alinhar os objetivos produtivos com as questões ambientais está vinculada à necessidade do desenvolvimento de indicadores de desempenho ambiental que permitam mensurar os impactos à saúde humana das operações industriais, bem como avaliar a atuação ambiental das industrias com a finalidade de melhoria deste desempenho (JABBOUR et al., 2014).

Apesar de a avaliação ambiental, que busca um entendimento integral de todos os fenômenos envolvidos, não ser uma ideia nova, tendo suas primeiras discussões acerca de ADA em 1973, não é tarefa fácil identificar e avaliar de modo amplo os riscos que a poluição proveniente das atividades industriais causam à sociedade, uma vez que os impactos podem ser diretos, indiretos e cumulativos (SALTER; FORD, 2001). Até o momento, os incidentes de poluição com fábricas e com efeitos puramente locais não tiveram atenção suficiente na literatura, já que as suas consequências são limitadas. No entanto, nas indústrias, mesmo incidentes de pequenas proporções podem resultar em grandes problemas toxicológicos à saúde dos colaboradores e à população residente nas proximidades de incidentes (THORESEN, 1999).

A busca por melhoria nos processos produtivos está alinhada às questões ambientais dada a necessidade de se desenvolver indicadores de desempenho ambiental que possam apontar os impactos negativos das operações industriais bem como à avaliação e medição da atuação ambiental das empresas face à melhoria deste desempenho (ROHRICH; CUNHA, 2004).

Frente às questões apresentadas, realizar a avaliação do desempenho ambiental pode levar à redução dos impactos das operações e melhorar a qualidade dos processos de fabricação do setor sucroenergético. Apesar do aumento da exposição da temática de ADA, não há consenso sobre um método específico para mensuração do desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana. Sendo assim, surge a necessidade de se estabelecer modelos, métricas e ferramentas para medir e gerenciar o desempenho ambiental das empresas (ESCRIG-OLMEDO et al., 2017).

Diante disso, o estudo visa responder a seguinte questão: como elaborar uma estrutura metodológica válida para a avaliação de desempenho ambiental, com base no potencial de toxicidade humana, das empresas do setor sucroenergético baseadas na adequação da destinação dos resíduos e subprodutos gerados?

1.3 Objetivo

Para elucidar esse questionamento, apresenta-se os objetivos deste trabalho a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma estrutura metodológica coerente e suficiente para a avaliação de desempenho ambiental aplicada em empresas da indústria sucroenergética, localizadas no Brasil, com base nos aspectos relacionados ao potencial de toxicidade humana.

1.3.2 Objetivos Específicos

a) Estudar o processo de fabricação da indústria sucroenergética;

b) Identificar os resíduos e subprodutos gerados em cada etapa do processo de fabricação de usina sucroenergética;
c) Estudar os indicadores existentes para avaliação do potencial de toxicidade humana e definir o método para cálculo dos impactos;
d) Estimar os potenciais de impacto de toxicidade humana de cada resíduo e subproduto;
e) Determinar os indicadores para avaliar o potencial de toxicidade humana de cada resíduo e subproduto;
f) Determinar o mecanismo lógico da estrutura para ADA a ser criada;
g) Testar a estrutura de ADA em três empresas da indústria sucroenergética.

1.4 Justificativa

A indústria sucroenergética apresenta uma relevante importância econômica ao Brasil, estando em plena fase de expansão frente à demanda mundial por combustíveis limpos e oriundos de fontes renováveis (SANTOS et al., 2015). Devido à crescente demanda a indústria sucroenergética brasileira movimentou U$ 11,34 bilhões no ano de 2016 (NEVES e TROMBIN, 2014; CONAB, 2017).

Além de apresentar uma relevante importância econômica para o país, a indústria sucroenergética busca por modernização para acompanhar novas tendências gerenciais, fato este que se tornou constante nesse setor. Aliás, esse setor apresenta papel fundamental em questões ligadas ao desenvolvimento sustentável e na utilização consciente dos recursos naturais.

A indústria sucroenergética produz açúcar, etanol e energia, que além de utilizarem para consumo próprio vendem o excedente, e outros subprodutos comercializáveis. Os processos produtivos desse tipo de indústria têm alto potencial de impacto ambiental negativos e consequentemente à saúde humana. Com a imposição de novas leis e a conscientização dos empreendedores do setor relativo a questões ambientais, a indústria sucroenergética vem adotando inovações no gerenciamento de seus resíduos industriais (REBELATO et al., 2015).

Os impactos industriais estão presentes em todo o processo produtivo, que vão desde a entrada de matérias-primas, passando pelo seu processamento para a

produção de bens, até o produto em si, a geração dos resíduos e efluentes ao longo da produção até durante a vida útil do produto (RODRIGUES, 2015).

Referente à produção industrial, o setor sucroenergético apresenta uma elevada geração de resíduos e subprodutos. Estes são derivados de um processo natural das atividades de transformação do produto principal. Há uma relação direta em que quanto maior a quantidade a ser produzida, maior será o volume de resíduos e subprodutos gerados na atividade (LUNAS; LUSTOSA, 2015).

A organizações impulsionadas pela pressão social, mudanças legislativas ou por diferencial competitivo, começam a adotar novos comportamentos frente a questão ambiental (SILVA e AMARAL, 2011; MEINDERS e MEUFFELS, 2011). Com isso, faz-se necessário desenvolver estruturas metodológicas consistentes que permitam às empresas medir e gerenciar todos os aspectos relevantes de sustentabilidade. Torna-se relevante a definição de metas para alcançar assim, a melhoria do desempenho ambiental (NESSA et al., 2007; SING et al., 2012).

Dessa forma, nota-se que o objetivo da avaliação do desempenho ambiental é fornecer aos tomadores de decisão informações que permitam uma avaliação dos sistemas produtivos em perspectivas de curto e longo prazo, com a finalidade de auxilia-los a promover ações para melhoria da eficácia organizacional, dos aspectos ambientais e minimização das perdas de matérias-primas (SINGH et al., 2012).

Em uma revisão da literatura aprofundada, verifica-se a falta de mecanismos que permitam a avaliação do desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana das industrias sucroenergéticas. Diante do exposto, tornam-se relevantes estudos com o objetivo voltado para a avaliação do desempenho ambiental baseado no potencial de toxicidade humana, bem como na construção de indicadores específicos para esta indústria.

Para as indústrias sucroenergéticas, o desenvolvimento de uma estrutura metodológica para ADA torna-se relevante à medida que contribui para uma reflexão dos impactos negativos à saúde humana oriundas de seu processo produtivo, bem como para o desenvolvimento de indicadores para medir o desempenho ambiental destas indústrias. Melhores práticas ambientais podem ser incorporadas no processo produtivo, contribuindo para um maior controle da geração de resíduos e subprodutos.

O uso de indicadores de avaliação de desempenho ambiental torna-se importante para a tomada de decisão nas empresas no que diz respeito ao cumprimento de leis e da estratégia organizacional previamente definidas. Os indicadores otimizam recursos para a solução de problemas ambientais bem como permitem uma reflexão em busca de melhorias para o desempenho organizacional e ambiental (HENRI e JOURNEAULT, 2008).

Além disso, a aplicação de uma ADA auxilia para o conhecimento de cada etapa do processo de fabricação a fim de se identificar os resíduos e subprodutos gerados de forma que se possam apontar seus efeitos e impactos no meio ambiente e consequentemente ao ser humano. Deste modo, torna-se interessante uma pesquisa que desenvolva uma metodologia para avaliar o desempenho ambiental baseado no potencial de toxicidade humana das operações produtivas das industrias sucroenergéticas, possibilitando uma análise do impacto dessas industrias sobre o bem-estar do ser humano.

A presente dissertação contribui para as tomadas de decisão do setor sucroenergético com utilização da ADA em seus processos produtivos, buscando alternativas ambientalmente adequadas para os resíduos/subprodutos gerados no processo de fabricação. Além disso, este trabalho contribui em futuros estudos acadêmicos sobre ADA envolvendo a avaliação do potencial toxicidade humana, tendo em vista a ausência de estudos nessa temática (SONG et al., 2016).

2 MÉTODOS DE PESQUISA

Quanto ao escopo desta dissertação três considerações devem ser feitas. Em primeiro lugar, ela ateve-se às etapas industriais do processamento da cana de açúcar, excluindo-se as etapas de plantio e colheita da planta e também as etapas de distribuição e comercialização dos produtos finais. Neste sentido, para o cálculo do potencial de toxicidade humana desta indústria foram considerados os resíduos e os subprodutos gerados exclusivamente por suas operações produtivas.

Em segundo lugar, é importante esclarecer que para este trabalho foi adotada a definição de “resíduo” para qualquer emissão proveniente de atividades produtivas, seja um efluente líquido, um resíduo sólido ou uma emissão gasosa. Já para ser considerado um “subproduto”, o material gerado em etapas produtivas deve atender às seguintes condições: i) apresentar uma utilização futura ou comercialização; ii) poder ser utilizado diretamente, ou seja, sem sofrer alterações; e iii) fazer parte de um processo de produção contínuo (FIPA, 2007). Assim como o resíduo, um subproduto pode ser considerado poluente, tendo em vista que um material poluente é uma substância ou material que não acomoda em um sistema natural em caso de introdução em uma quantidade acima da capacidade de assimilação do sistema natural.

Em terceiro lugar, um resíduo/subproduto pode ser considerado tóxico caso contenha elementos químicos que não sejam biologicamente essenciais ou que sejam biologicamente essenciais, mas que estejam em concentrações elevadas no organismo. Elementos como cádmio, mercúrio, chumbo, cromo e cobre são exemplos de elementos considerados tóxicos para a saúde humana (RIBEIRO et al., 2015).

Defronte às considerações apresentadas e aos objetivos propostos nesta dissertação, pode-se classifica-la metodologicamente como sendo de natureza aplicada, com sua finalidade descritiva, sua abordagem sendo qualitativa e quantitativa, o procedimento sendo o estudo de caso múltiplo ou multicasos, e utilizando-se de técnicas de intervenção baseadas em entrevistas, observação participante, análise de documentos e elaboração de diagnóstico.

Entre os vários tipos de pesquisa qualitativa, a metodologia de estudo de caso foi considerada a mais adequada para este estudo, pois esta envolve um estudo em

profundidade da empresa. De acordo com YIN (2010), o estudo de caso envolve técnicas de coleta de dados e análise dos dados. Como destacado anteriormente, a escolha das empresas da indústria sucroenergética para o estudo multicasos foi realizada de forma intencional devido principalmente a: i) demonstração de interesse pelo trabalho por parte da indústria; ii) disponibilização de dados para o estudo; e iii) permissão para realizar a visita para observação de seus processos produtivos.

Para a coleta de dados foram utilizados documentos fornecidos pelas empresas e também através das visitas *in loco*, onde foi possível realizar as entrevistas com gestores e engenheiros e observar o processo de fabricação de açúcar e etanol. De acordo com YIN (2010), no estudo de caso pode-se utilizar como fontes de informação: documentos, registros, entrevistas, observação direta, observação dos participantes.

Para o desenvolvimento desta dissertação, foram utilizadas como fontes de informação: i) relatórios gerenciais que caracterizam a empresa estudada; ii) informações disponíveis no site institucional da empresa; iii) relatórios de projetos de produção de açúcar e etanol, incluindo fluxogramas, balanços de massa e energia; iv) livros, artigos científicos de periódicos nacionais e internacionais; e v) outros documentos pertinentes ao projeto estudado.

Foram realizadas diversas visitas nas empresas estudadas durante o ano de 2016 e 2017 pelo autor deste trabalho. Nestas visitas houve, também, a presença de uma consultoria externa formada por especialistas no tema deste estudo, o que permitiu a triangulação no levantamento de dados entre os gestores da empresa, os documentos apresentados e a consultoria externa. Todas as visitas tiveram supervisão de Gerentes das empresas, onde foram observados os processos de produção de açúcar e etanol e efetuados registros fotográficos.

Os dados coletados durante a visita, envolvendo os processos industriais, permitiram caracterizar todo o processo produtivo e identificar a geração de resíduos e subprodutos em cada etapa da produção.

A análise dos dados foi realizada de forma descritivo-qualitativa, onde foi possível captar a essência dos processos dinâmicos, permitindo-se compreender com maior profundidade o comportamento do objeto de estudo (COOPER; SCHIDLER, 2011). Apesar de se tratar de uma dissertação, com sua metodologia baseada em

uma abordagem quantitativa para análise dos dados e qualitativa com o método do estudo de caso, algumas limitações na interpretação e na replicação deste trabalho são evidentes, tais como: i) os resultados obtidos serem únicos para o contexto investigado; ii) toda extrapolação deve considerar as novas especificidades tecnológicas, culturais e de gestão.

O método de pesquisa utilizado neste estudo foi desenvolvido em cinco etapas, a saber:

1) Mapeamento dos processos produtivos da indústria sucroenergética e inventário dos resíduos sólidos, efluentes líquidos, emissões gasosas e subprodutos gerados nas etapas produtivas. Adicionalmente, os resíduos e subprodutos foram caracterizados quanto a: i) atividade geradora; ii) composição físico-química; e iii) ao impacto potencial à saúde humana, considerando a sua eventual exposição no solo, na água e na atmosfera. Esta etapa foi realizada a partir de levantamento bibliográfico junto a base de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*, livros, materiais técnicos e documentos coletados em industrias sucroenergéticas além de observações realizadas em plantas industriais.

2) Desenvolvimento de um Índice de Potencial de Toxicidade Humana (I_{pth}) para representar o desempenho ambiental de empresas da indústria sucroenergética brasileira com base no potencial de toxicidade humana. Aqui se prevê a agregação dos indicadores formando um índice global. O I_{pth} foi desenvolvido para representar, em valor de porcentagem, se a destinação dos resíduos e/ou subprodutos na fabricação sucroenergética está ambientalmente adequada.

A fórmula geral para o I_{pth} é expressa por:

$$\mathrm{I}pth = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{(V(a)iQiAi)}{(\sum_{j=1}^{n}(V(a)iQiAi)} ki \right) x100 \qquad (1)$$

onde:

a) *n* - número de resíduos gerados no processo produtivo considerado, identificados na Etapa 1.

b) $V_{(a)i}$ - peso relativo do potencial de toxicidade humana de cada resíduo/subproduto. O cálculo desta variável se deu em duas etapas:

Etapa 1 – Cálculo das contribuições potenciais das emissões, utilizando o método EDIP 97.

Neste estudo, a avaliação de impacto foi realizada inicialmente pela definição dos potenciais de toxicidade humana para cada resíduo e subproduto a partir do construto de Potencial de Toxicidade Humana proposto no método EDIP 97 (*Environmental Design of Industrial Products*) desenvolvido por Wenzel et al. (1997). Segundo estes autores, a toxicidade humana é causada por substâncias que apresentam características tóxicas, não biodegradáveis e concentradas nos organismos vivos, ocorrendo devido à combinação destas características com o modo de exposição da substância, quer seja via ar (*hazard tocixity air* - hta), via água (*hazard tocixity water* - htw) ou via solo (*hazard tocixity soil* - hts).

Neste sentido, para cada substância podem ser calculados os chamados fatores de caracterização da toxicidade humana (fatores de equivalência) e são determinados pelo produto de cinco componentes: dispersão da substância no ambiente, transferência da substância pela rota de exposição, fator de inalação ou ingestão da substância, toxicidade e biodegradabilidade da substância. Fatores de equivalência (EF) de noventa substâncias são apresentados em Wenzel et al. (1997). O potencial de toxicidade humana (EP) de um resíduo/subproduto é, portanto, calculado pela somatória da multiplicação do fator de equivalência de cada substância que o compõe pela quantidade (Q) da substância presente no resíduo/subproduto, expresso pela fórmula:

$$\mathbf{EP} = Q \cdot EF \qquad (2)$$

Com isso, foram calculados os três potenciais de toxicidade humana, quer sejam EP(hta) para emissões no ar, EP(htw) para emissões na água e EP(hts) para emissões no solo, para cada resíduo e subproduto. O apêndice A contempla em mais detalhes o desenvolvimento dos cálculos do potencial de toxicidade humana;

Etapa 2 – Ponderação relativa entre critérios e alternativas

A ponderação refere-se aos pesos relativos atribuídos a diferentes categorias de impacto e consumo de recursos. A ponderação é definida como a união de resultados já previamente calculados para alcançar uma única medida total do impacto ambiental do sistema estudado e assim interpretar e analisar os dados. Ou seja, são ponderados entre si variados impactos tendo como resultado final um valor relativo das alternativas e categorias elencadas para cálculo do impacto total do sistema estudado (WESTKÄMPER; ALTING; ARNDT, 2000; OLIVEIRA; CRISTOBAL; SAIZAR, 2016).

Neste estudo, para a ponderação quantitativa dos potenciais de toxicidade humana dos resíduos/subprodutos aplicou-se o método *Improved Analytic Hierarchy Process* (IAHP). O método IAHP é uma variante do método de *Análise Hierárquica de Processos* (AHP) proposto por Saaty (1991).

O método AHP original requer uma comparação em pares de várias alternativas em relação a cada um dos atributos e uma comparação por pares dos próprios atributos. O tamanho e o número das matrizes de comparação aumentam à medida que o número de alternativas e/ou atributos aumenta (RAO, 2013). Isso pode ser considerado um dos principais problemas com a técnica convencional de AHP, onde ocorre um aumento quadrático no número de comparações, dependendo do número de alternativas (mais precisamente, [n × (n-1) / 2]) (ZHANG, 2015).

O método IAHP foi escolhido por lidar eficientemente com atributos objetivos, em que uma matriz de comparação é construída usando uma escala de importância relativa, e propõe uma maneira sistemática de normalizar os valores dos atributos e a conversão de valores subjetivos em valores objetivos (RAO, 2013; ZHANG, 2015). O IAHP apresenta três vantagens, quer sejam: i) consistência nas matrizes de comparação; ii) eficácia de extração de informação; e iii) método prático para implementação (LI et.al, 2013). O peso de cada índice de avaliação determinado através do método IAHP permite que fique evidente que o julgamento da matriz é muito mais consistente e, ao mesmo tempo, pode resolver as dificuldades na determinação das escalas tradicionais e na consistência na verificação da matriz de julgamento (XIULIN; DAWEI, 2014).

Para obter resultados rapidamente e lidar com o ponto fraco do método AHP original, optou-se pelo uso do software MindDecider (www.minddecider.com). O software apresenta uma opção interessante que é habilitar a função "auto resolver dependências", sendo que esta opção reduz o número de perguntas com base nos significados de correlação inseridos anteriormente. De acordo com Roodchenko e Banin (2015), se o usuário entrar nas seguintes proporções durante a comparação em pares: X < Y e Z > Y, a função "auto resolver dependências" faz uma suposição lógica de que X < Z. Alternativamente, quando for inserido: X < Y e Y = Z, a função "auto resolver dependências" formula que X < Z. Assim, dependendo de uma ordem de comparação, a função "auto resolver dependências" pode reduzir o número de solicitações até quase linear no caso mais apropriado. Desta forma, os dados referentes aos potenciais de toxicidade humana de cada resíduo/subproduto calculados pelo método EDIP 97 foram, então, aplicados no software MindDecider e o resultado obtido refere-se ao peso relativo de cada resíduo e subproduto ($V_{(a)i}$).

c) Q_i - quantidade relativa de cada resíduo ou subproduto. Esta variável identifica a participação, em porcentagem, que cada resíduo ou subproduto apresenta relativo à quantidade total de resíduos e subprodutos gerados pela indústria sucroenergética brasileira, considerando o período de um ano correspondente à safra 2015/2016. É expressa por:

$$Qi = \frac{bi}{\sum_{j=1}^{n} bj} x100 \qquad (3)$$

onde, b_i representa a quantidade absoluta de resíduo ou subproduto *i* gerado pela indústria considerada.

d) A_i - impacto da cobertura geográfica relativa de cada resíduo ou subproduto, expressa por:

$$Ai = \frac{xi}{\sum_{j=1}^{n} xj} x100 \qquad (4)$$

onde, *x* é igual a um valor, entre 1 e 3, definido conforme a cobertura geográfica que o impacto de cada resíduo/subproduto pode alcançar (Tabela 1).

X	1	2	3
Critério	O impacto é local, os efeitos afetam o local de produção e seus arredores.	O impacto é regional, é relevante para além dos arredores do local de produção.	O impacto é estratégico, podem ter consequências relevantes com cobertura em âmbito nacional ou global.

Tabela 1 - Critérios utilizados na cobertura geográfica dos resíduos
Fonte: Rebelato *et al.* (2017)

e) k_i - avaliação categórica da destinação final realizada pela empresa a ser analisada para cada resíduo e subproduto, uma vez que podem ser empregados meios adequados ou inadequados para esta destinação. É atribuído o valor 1 para destinação considerada ambientalmente adequada e o valor 0 para destinação considerada ambientalmente inadequada.

3) Realização do estudo multicasos - esta etapa foi realizada em três empresas da indústria sucroenergética observando o local estudado e reunindo informações documentadas das empresas, tais como quantidades produzidas de cada resíduo/subproduto e alocação final atribuída a cada um deles. As empresas foram escolhidas por conveniência e por permitirem acesso à todas etapas de fabricação de etanol e açúcar.
4) Quantificação dos resultados finais - esta etapa foi realizada através da análise dos dados obtidos e cálculo dos parâmetros necessários para a formação do I_{pth} de cada empresa.
5) Teste e refinamento da estrutura metodológica

Esta etapa foi realizada através de estudos multicasos com aplicação da estrutura de ADA em três industrias sucroenergéticas. O objetivo consiste em identificar e corrigir elementos conflitantes e tornar a estrutura metodológica mais robusta.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção são apresentadas as fundamentações teóricas que norteiam o desenvolvimento e a compreensão dos temas abordados nessa dissertação.

3.1 Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA)

A inclusão da dimensão ambiental nas organizações deve ser considerada como uma das maiores mudanças que vêm ocorrendo nas indústrias e em todo mundo dos negócios ao longo dos últimos anos. A complexidade e importância da gestão ambiental podem ser observadas quanto o envolvimento em uma série de ajustes e planejamento de estrutura, sistemas e atividades de uma empresa, a fim de estabelecer uma postura holística, relacionando a variável ambiental (JABBOUR; JABBOUR; SARKIS; GOVINDAN, 2014).

Além disso, os recursos naturais resultam em matérias-primas para atividades industriais que, em consequência de processos ineficientes, geram resíduos e subprodutos que podem acarretar contaminação ambiental. Estes problemas afetam negativamente, além do meio ambiente, a saúde humana e podem também provocar a escassez dos recursos naturais (DIAS, 2011).

Com isso surge a importância do tratamento do produto e/ou serviço em todo seu processo produtivo, agindo como uma ferramenta de gerenciamento ambiental para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados ao produto. Essa análise é feita sobre toda a vida do produto ou processo, desde o seu início até o final da utilização, quando o produto se torna resíduo ou subproduto (ABNT, 2004).

Concatenado com essas questões apresentadas, a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), temática bastante utilizada pela academia e por empresas, busca a implementação de programas voltados ao desenvolvimento de tecnologias e produtos ambientalmente sustentáveis, que buscam atender a legislação, mas, também, aproveitar oportunidades de negócios paralelamente à melhora da imagem institucional.

A ADA é um processo que visa facilitar decisões gerenciais sobre o desempenho ambiental de uma organização por meio da seleção de indicadores, coleta e análise de dados, avaliação de informações de acordo com critérios de desempenho ambiental, divulgação, revisão e aperfeiçoamento desse processo (DIAS-SARDINHA; REIJNDERS, 2001).

De acordo com a norma ISO 14.031, a ADA visa auxiliar as organizações a identificar e determinar os aspectos ambientais que serão tratados como relevantes, estabelecer critérios para seu desempenho ambiental e avaliar o desempenho ambiental baseado nos critérios anteriormente estabelecidos. A metodologia ISO 14.031 apresenta três indicadores: i) Indicadores de desempenho Operacional (IDO), ii) Indicador de desempenho de Gestão (IDG), e iii) Indicadores de Condições Ambientais (ICA) (ABNT, 2004).

Outro ponto é que a ADA é uma metodologia que pode ser aplicada a todo tipo de empresa, em que não é fator determinante sua estrutura organizacional, atividade econômica, ou local de implantação, para aplica-la. No entanto os indicadores devem ser avaliados sistematicamente, seja pela influência da variável competitividade ou por regulamentação legal (CUNHA, 2010). A melhoria do desempenho ambiental pode apresentar vantagem competitiva à empresa a medida que aumenta a eficiência dos seus processos, traz melhorias na produtividade e apresenta redução dos custos (IRALDO; TESTA; FREY, 2009).

Destarte, as questões ambientais vêm se tornando mais relevantes, sendo os impactos a saúde humana provenientes das atividades produtivas gradativamente mais presentes no processo de tomada de decisões principalmente do setor industrial, em que suas operações incidem no meio ambiente, desde matérias-primas até a geração de resíduos e subprodutos potencialmente poluidores.

Dada a relevância e exposição à sociedade frente às questões ambientais, as empresas estão cada vez mais engajadas em melhorar seu desempenho ambiental, sendo relevante gerenciar esse desempenho ambiental em relação as políticas, objetivos e metas ambientais. De acordo com Silva (2011), um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) é uma ferramenta adequada para controle ambiental, que tem em seu escopo a redução do volume e potencial poluidor dos resíduos. O SGA apresenta medidas simples para a implantação, quer sejam: i) identificar os pontos de geração

de resíduos; ii) buscar medidas de intervenção para redução produtos defeituosos; iii) reciclagem; e iv) reaproveitamento de resíduos como subprodutos. Além disso, o SGA requer definição de metas e controle do nível de desempenho ambiental buscado pela empresa (ALMEIDA; SELLITTO, 2013).

Segundo Shigunov et al. (2009), alguns pontos fundamentais levam as empresas a adotarem SGA: i) utilização otimizada de recursos naturais, ii) legislação ambiental cada vez mais exigente, iii) privilégios financeiros concedidos a empresas ambientalmente saudáveis, iv) exigência de clientes por produtos desenvolvidos sem prejuízos ambientais, v) melhoria da imagem da empresa como ambientalmente correta, pratica conhecida como “marketing verde”.

A adoção de um SGA como ferramenta para mensuração do desempenho ambiental empresarial, alinhados com a estratégia e objetivos da empresa, permitem que as ações para minimizar riscos ambientais tornem-se inerente aos fatores competitivos (SILVA, 2011). O desempenho ambiental de uma empresa é acompanhado através de medições e regulado por indicadores. Os indicadores são variáveis que resumem as informações importantes de um sistema complexo (PEROTTO et al., 2008).

Para as empresas adotarem o SGA, este deve atender objetivos ambientais e econômicos, assim como contribuir para a adequação dos processos produtivos tornando-os mais eficientes. Sendo assim, a monitoração contínua dos indicadores ambientais tornam-se uma forma de assegurar o resultado pretendido com a implantação de um SGA (ALMEIDA; SELLITTO, 2013).

Segundo Melo e Pegado (2006), a medição de desempenho ambiental pode ser realizada por indicadores de impacto ambiental, sendo que é considerado impacto ambiental o efeito ou mudança causada no estado do ambiente por uma atividade antrópica. Medir o impacto ambiental é um meio mais completo de medir o desempenho ambiental, exigindo mais informações e variando de acordo com as condições do ambiente. Salienta-se que o impacto à saúde humana ocorre em detrimento do impacto ao meio ambiente. É relevante que os objetivos de produção estejam alinhados com as questões ambientais, especialmente com os indicadores de desempenho ambiental que não apenas mensurem o impacto ambiental, mas que

possibilitem o progresso do desempenho ambiental dentro das empresas (REBELATO; RODRIGUES; MADALENO, 2015).

Verifica-se na literatura atual sobre ADA, que não há consenso absoluto sobre os temas ambientais que devam ser mensurados e encontram-se distintos modelos e ferramentas para identificar e avaliar práticas de desempenho ambiental (SEARCY et al., 2005). No entanto, encontra-se uma proximidade em torno dos principais construtos apontados pela literatura, quer sejam: atmosfera, água, terra, energia e materiais. Algumas questões importantes tais como a biodiversidade, materiais perigosos e geração de resíduos perigosos, emissões perigosas à saúde humana e qualidade da água são fundamentais na medida em que são relacionados ao bem-estar humano, assim como à continuidade da vida nos ambientes naturais (DELAI; TAKAHASHI, 2011). Estes trabalhos podem ser de abordagem qualitativa, em que são avaliados através de mecanismos descritivos ou quantitativa, que mensura as práticas adotadas através de indicadores numéricos (RODRIGUES, 2015).

A ADA é relevante às empresas, uma vez que fornece informações que permite priorizar os aspectos ambientais através da minimização dos impactos causados durante as operações produtivas. Ao longo de décadas, foram realizados inúmeros estudos para o conhecimento e avaliação de práticas de gestão ambiental.

Em 1984, surgiu no Canadá o Programa de Atuação Responsável (*Responsible Care Program*), sendo considerado como o primeiro modelo de gestão ambiental formal (CULLEY, 1998). Este modelo consistiu em uma iniciativa formalizada por parte da Associação de Fabricantes Químicos (*CMA - Chemical Maufactures Association*) e baseou-se principalmente em: i) princípios diretivos, equivalentes a uma declaração de propósitos, ii) códigos de práticas gerenciais, com metas gerais que permitem a cada empresa estabelecer o modo para alcançá-los, iii) Painel Público Consultivo composto, por membros de diferentes áreas da sociedade que cooperam com a indústria química no desenvolvimento de práticas de gestão, iv) grupos de liderança formados por executivos de empresas que se enquadram nos princípios de assistência responsável para troca de experiências, v) identificação de necessidades de melhoria e assistência mútua (CAMPOS, 2001).

Em 1990, foi criado o STEP (*Strategies for Today´s Environmental Partnership*) pelo Instituto de Petróleo Americano (*API - American Petroleum Institute*), cujo objetivo

foi desenvolver um guia para aprimoramento do desempenho ambiental e de saúde para a indústria de petróleo americana (KUHRE, 1998). Assim, foi criado o *American Petroleum Institute Environmental, Health anda Safety Mission and Guiding Principles* baseado nos princípios: i) prevenção da poluição, ii) conservação dos recursos naturais, iii) relação de parceria e acordos com a comunidade, entre outros (CAMPOS, 2001).

Hunt e Auster (1990) com a proposta de uma taxonomia para sistemas de gestao ambiental de organizações industriais, concentraram-se na preocupação ambiental das empresas e propuseram um modelo de cinco etapas para classificar as empresas estudadas, que podem ser para uma empresa sem qualquer preocupação ambiental, ou para uma empresa altamente engajada com questões ambientais.

Segundo Maimon (1994), a avaliação do desempenho ambiental de uma empresa pode ser analisada através de três etapas, quer sejam: i) adaptação da empresa aos regulamentos e exigências do mercado, ii) adaptações necessárias quanto à questão ambiental, que contempla modificação dos processos e/ou produtos de modo a prevenir a problemas relacionados a poluição que possam prejudicar a consolidação da estratégia comercial, iii) antecipação dos problemas ambientais que podem ocorrer.

Já o modelo desenvolvido por Sanches (2000) elenca dois tipos de integração da variável ambiental para a empresa: i) o primeiro afirma que as questões ambientais geram custos operacionais extras, sendo uma barreira para a expansão do negócio, e ii) o segundo sendo uma gestão ambiental proativa, na qual a dimensão ecológica é tomada como um gerador de lucro. Donaire (1994) sugeriu uma análise em três etapas que podem ocorrer simultaneamente: i) realizar ações de controle ambiental em locais como chaminés e esgotos, mantendo a estrutura existente, ii) realizar ações voltadas para mitigar pressões ambientais, materiais de reciclagem e entradas de energia simplificadas, iii) adotar metas para um alto desempenho ambiental sob a pressão do mercado consumidor, onde atuam como supervisores assim como fazem os agentes legais.

Corazza (2003) propôs que a estrutura dos processos de produção pudessem ser alteradas de duas formas para tratar com o gerenciamento ambiental: i) integração específica da variável ambiental, ou seja, criar um departamento de meio ambiente

tornando-o um sistema de gerenciamento ambiental mais eficiente e proativo; ou ii) integração matricial, na qual há um envolvimento das áreas de recursos humanos, produção, gestão e pesquisa e desenvolvimento.

Günes et al. (2008) colheram amostras de água poluída da bacia do rio Ergene na Turquia, onde observou-se altas concentrações de cromo, sulfetos, amônia, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e de demanda química de oxigênio (DQO), concluindo, dessa forma, que a água apresenta alta toxicidade para a saúde humana. RPS (2008) apresentou uma avaliação do risco à saúde humana realizada em emissões de chaminés industriais através da inalação de ar e indiretamente através da ingestão de alimentos contaminados, em que esta avaliação apresentou as construções: i) estimativas de risco de câncer, ii) estimativas de risco relacionadas à exposição a contaminantes, iii) estimativas de risco associadas ao trato respiratório, iv) estimativas do nível de exposição ao chumbo, v) exposição infantil por amamentação, e vi) estimativas das concentrações de solo dos receptores mais afetados e concentração de metais nos alimentos .

A proposta metodológica de Tahir e Darton (2010), baseada em uma avaliação quantitativa, sugere uma visão mais ampla das medidas de desempenho ambiental de uma empresa. A proposta está dividida em cinco etapas, quer sejam: i) visão geral de negócios, ii) definição de sustentabilidade e derivação de perspectivas de negócios, iii) estabelecimento de limites ao sistema analisado, iv) desenvolvimento de indicadores e métricas, e v) verificação e modificações.

Liu et al. (2013) relataram que as culturas na China são contaminadas por metais pesados de fumaça do tráfego, mineração e indústrias locais. Os resultados apresentados sobra a avaliação do risco para a saúde apontaram que os campos próximos a áreas de mineração e aterros apresentaram contaminação carcinogênica por chumbo, cromo, arsênio, cádmio e mercúrio e eram, portanto, inadequados para o cultivo de vegetais. Já Kubota e Rosa (2013), propuseram através de uma pesquisa bibliográfica, a integração entre a teoria da resolução inventiva de problemas e as estratégias de produção mais limpa para construir um novo método destinado a redução de efluentes, resíduos e emissões de gases das empresas. Samuel et al. (2013) criaram indicadores-chave para uma produção sustentável em uma indústria petroquímica da Malásia.

Outro método de avaliação de desempenho ambiental desenvolvido para calcular pressões ambientais, que contemplam consumo de água e de materiais, uso do solo, emissões de gases de efeito estufa e outras emissões poluentes, é o *Ecoblock.* Este método é baseado na quantificação por meio de indicadores com escala de abrangência regional, nacional ou global. Campos (2001), apresenta o Sistema de Gestão e Avaliação de Desempenho Ambiental (SGADA), em que é utilizado o *Balanced Scorecard* (BSC) em um SGA para assim, avaliar o desempenho ambiental de uma empresa (CUNHA, 2010).

Já o documento Diretrizes para Relatórios de Sustentabilidade, emitido pela *Global Reporting Initiative* (GRI), é um guia com o objetivo de elaborar e difundir as diretrizes para a elaboração de relatórios de sustentabilidade reconhecidos e aplicados mundialmente, onde são abordados as emissões atmosféricas, águas residuais, total dos resíduos, energia, água, acidentes ambientais e investimentos com a gestão ambiental (GRI, 2017). Cunha (2010), propõe a metodologia "*Environmental Balanced Scorecard for Supply Chain* (EBSCSC)", assentada numa lógica de *Balanced Scorecard*, recorrendo à ISO 14.031 com auxílio da definição de indicadores pelas metodologias GRI e *Ecoblock*.

A metodologia SBP (abreviatura de Sellitto, Borchardt e Pereira), apresenta como premissas: i) o desempenho ambiental de uma operação antrópica pode ser desdobrado em construtos latentes que descrevem como as atividades da operação impactam o ambiente; ii) os construtos podem ser apreendidos por indicadores; iii) a prioridade dos construtos é variável e pode ser atribuída por gestores; e iv) os indicadores podem ser agregados formando um índice global que oscila entre 0 e 100%, para comunicação e comparação entre operações (SELLITTO; BORCHARDT; PEREIRA, 2010).

O estudo de Rebelato et al. (2013) apresenta uma análise do desempenho ambiental de industrias sucroenergéticas localizadas na bacia hidrigráfica do Rio Mogi-Guaçu (SP), onde utilizam o método AHP para estruturação do problema com foco nos objetivos, com abordagem qualitativa e com auxílio de um grupo focado para mensurar impactos no solo, águas e atmosfera.

A literatura apresenta estudos de diversas metodologias e indicadores utilizados para a ADA. Destaca-se ainda Campos e Melo (2008) e Jash (2000) com

metodologia de avaliaçao baseados na ISO 14031, Jabbour e Santos (2008) com a questao da inteligência ambiental, Piacente (2005) com o modelo criado para usinas sucroenergeticas, além de outros autores com relevância para a temática como Thoresen (1999), Tuzkaya et al. (2009), Dias-Sardinha et al. (2002), Hermann, Kroeze e Jawjit (2007), dentre outros.

. Neste contexto, outros autores propõem estruturas e metodologias de ADA das atividades antrópicas tomando como base de análise os potenciais de impacto à saúde humana originados em processos de fabricação, ou seja, referem-se à influência que resíduos, efluentes, emissões e subprodutos industriais têm sobre os seres humanos (YEO; NEO, 1988). No entanto, o estudo dos impactos à saúde humana pode levar em consideração distintas categorias de impacto, estando entre elas a toxicidade humana que, segundo Wenzel *et al*. (1997), é ocasionada pelas substâncias químicas com alto teor venenoso que atingem o ser humano através do ambiente. As vias de exposição do ambiente que atingem o ser humano mais frequentes são: água (51%), seguido de solo (47%) e ar (30%) e biota (12,5%) (DEARWENT, et al. 2006).

Para o potencial de toxicidade humana de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas são levados em consideração as substâncias químicas que os compõem. Os dez maiores poluentes que têm o maior impacto potencial sobre a saúde humana com base na persistência ambiental, na bioacumulação e na quantidade emitida e/ou na toxicidade inerente são: cádmio, mercúrio, arsênico, cromo, níquel, dioxinas, bifenilos policlorados, materiais particulados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e SO_2 (RUSHTON, 2003).

A avaliação ambiental holística apresenta uma árdua tarefa em identificar e avaliar os riscos que a poluição proveniente de atividades industriais causa ao ser humano, uma vez que os impactos podem ser diretos, indiretos e cumulativos e, até mesmo incidentes de pequenas proporções podem resultar em grandes problemas toxicológicos à saúde humana (SALTER e FORD, 2001; THORESEN, 1999).

3.2 Indicadores de avaliação de desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana

Os indicadores e métodos de ADA são ferramentas que descrevem, de forma ampla, uma grande quantidade de dados ambientais. São aplicados para a definição de dados absolutos de material e energia despendida comparados à outras variáveis de modo a aumentar o valor das informações dos dados quantitativos, garantindo a comparação entre os dados e entre o histórico analisado (JASCH, 2000; PEROTTO et al., 2008).

A ADA apresenta uma característica negativa em seus métodos de pesquisa dada a inexistência de universalidade entre eles, haja vista a existência de distintos modos para elaborar os constructos de avaliação. Os indicadores e métodos de ADA exibem diversas finalidades, tais como: i) comparar o desempenho ambiental entre empresas em determinado período de tempo; ii) ter um propósito e ser orientado para o objetivo da empresa; iii) identificar oportunidades de mercado; iv) identificar possíveis reduções de custos; v) servir como ferramenta de comunicação para relatórios ambientais; e vi) ser medido frequentemente; vii) refletir o desempenho ambiental de forma clara e equilibrada (JASCH, 2000).

Outra questão acerca dos indicadores e métodos de ADA reside na condição que estes têm de fornecer às lideranças organizacionais informações ambientais completas das empresas, além de permitir a verificação dos progressos, identificação de problemas relevantes e poderem destacar tendências adversas através do controle ambiental. Um aspecto positivo dos indicadores ambientais está, especialmente, na análise numérica das tendências e nas possíveis comparações em determinados períodos de tempo. Outro ponto é que tais indicadores estão sujeitos a avaliação periódica e controle de metas (JASCH, 2000).

Os indicadores de ADA permitem às organizações a quantificação e a elaboração de relatórios dos desempenhos ambientais, permitem classificar e resumir os dados relativos aos aspectos ambientais, demonstrando assim a situação da empresa frente à sua situação ambiental, de acordo com o contexto local da empresa, com os objetivos e limites de estudo estabelecidos. Os indicadores devem contemplar os impactos ambientais em que a empresa possa influenciar, de forma direta, através de suas operações produtivas, de seus produtos e serviços, sendo esses valores

essenciais por representarem uma referência para as futuras avaliações de desempenho ambiental (PEROTTO et al., 2008).

De acordo com Pegado et al. (2004), a abordagem de ADA através de indicadores de impacto ambiental avaliam a consequência ou transformação causada no meio ambiente por determinada atividade produtiva.

Um aspecto relevante dos indicadores de desempenho ambiental é que devem levar em conta as especificidades dos processos produtivos e dos produtos, pois cada etapa do processo produtivo apresenta características específicas a serem consideradas para a seleção dos indicadores ambientais mais adequados, que contemplem os aspectos definidos no objetivo e escopo (JASCH, 2000).

Com relação à seleção e definição de indicadores ambientais específicos, vários estudos foram publicados nas últimas décadas, dentre eles encontra-se os estudos desenvolvidos por Thoresen (1999), Jasch (2000) e a própria norma ISO 14000 onde, a partir dos padrões ISO 14031 (Organização Internacional de Normalização, 2013a) e ISO 14034 (Organização Internacional de Normalização, 2013b), têm-se um conjunto de recomendações para a escolha de indicadores ambientais. De acordo com Perotto et al. (2008), a seleção de indicadores de desempenho ambiental deve levar em consideração os produtos produzidos e as particularidades do processo de produção associadas a eles, sugerindo uma pesquisa cuidadosa desses fatores como pré-requisito para estabelecer indicadores capazes de medir o desempenho ambiental de uma empresa.

Dessa forma, realizou-se um levantamento com os termos de pesquisa “Indicadores e Métodos de ADA”, “Avaliação de Desempenho Ambiental” e “Potencial de Toxicidade Humana” em bases de dados de periódicos internacionais, quer sejam Scopus e Web of Science, em que a partir da análise das publicações foi possível identificar os métodos que abordam indicadores de avaliação de desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana mais utilizados e citados nos artigos disponíveis.

Foram identificados os seguintes métodos de ADA: CML 2002, Eco-indicator 99, EDIP 97 e EDIP 2003, EPS 2000, Impact 2002+, MEEuP, ReCiPe, LUCAS, TRACI, LIME, USEtox e IMPACT World+. A partir de uma análise comparativa entre esses métodos, foram identificadas quatro categorias para distingui-los, permitindo

assim determinar o método adequado para presente o estudo. As categorias de comparação são:

- Local de origem do método abordado (País ou instituição);
- Nível de avaliação do impacto atribuído a cada método, conforme segue:
    - Midpoint – A caracterização midpoint usa indicadores localizados ao longo do sistema produtivo (envolvendo processos físicos, químicos e biológicos) antes de chegar ao ponto final da categoria (ABNT, 2009);
    - Endpoint – A caracterização endpoint considera todo o sistema produtivo até o seu ponto final, ou seja, refere-se a um dano específico relacionado com uma área mais ampla de proteção, por exemplo a saúde humana (JOINT RSESARCH CENTRE, 2011; GUINÉE, 2002);
    - Combinado – Considera as vantagens das abordagens midpoint e endpoint;
- Categorias de impacto avaliadas pelo método;
- Abrangência de aplicação de cada método, sendo classificados como: global; continental, nesse caso o nome do continente abordado é indicado; nacional, nesse caso o nome do país abordado é indicado.

Com o conjunto de dados identificados baseado nas categorias de comparação descritas acima foi possível estruturar semelhanças e singularidades entre os métodos de avaliação de desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana, conforme segue:

3.2.1 CML 2002

O CML 2002 é um manual holandês publicado em 2002 com base nas normas ISO (GUINÉE, 2002). Esse método é baseado em uma abordagem midpoint e seus modelos de caracterização foram selecionados através de uma extensa revisão das metodologias existentes no mundo. O CML 2002 apresenta escopo de aplicação global, exceto para as categorias de impacto acidificação e formação de foto-

oxidantes, que apresentam escopo de aplicação direcionado para a Europa (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

Este método aborda as seguintes categorias de impacto: depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana e algumas categorias de impacto adicionais a depender dos requisitos do estudo: perda de função de suporte à vida, perda de biodiversidade e ecotoxicidade (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010; GUINÉE, 2002).

3.2.2 Eco-indicator 99

O Eco-indicator 99 foi desenvolvido na Holanda. É um método endpoint, que visa simplificar a interpretação e ponderação dos resultados por meio do cálculo de pontuações únicas, chamadas de eco indicadores. O Eco-indicator 99 surgiu em substituição aos métodos EPS 2000 e Eco-indicator 95 e também foi ponto de partida para o desenvolvimento dos métodos LIME e Impact 2002 (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

Este método apresenta escopo de aplicação global e abrange as categorias de impacto quantidade e duração das doenças, mudança climática, depleção do ozônio, escopo de aplicação para o continente europeu para substancias carcinogênicas, inaláveis orgânicos e inorgânicos, radiação ionizante e ecotoxicidade e escopo específico para a Holanda para a acidificação e eutrofização, e para a Suíça para o uso da terra (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010; MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING AND THE ENVIRONMENT, 2000).

3.2.3 EDIP 1997- EDIP 2003

O método EDIP 97 foi desenvolvido na Dinamarca através do programa Danish EDIP. A versão EDIP 2003 incluiu a avaliação de exposição de categorias de impacto de emissões não globais e não substitui a versão EDIP 97 (WENZEL et al., 1997). É um método midpoint desenvolvido para apoiar análises ambientais durante o desenvolvimento de produtos industriais e fornecer fatores de caracterização espacialmente diferenciados.

O EDIP 97 abrange as categorias de impacto: aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo de recursos e ambiente de trabalho (HAUSCHILD; WENZEL, 1998). Apresenta escopo de aplicação global para todas as categorias (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

O EDIP 2003 abrange as categorias de impacto: aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, eutrofização terrestre, eutrofização aquática, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade e barulho, com escopo de aplicação global para aquecimento global e depleção de ozônio e somente para a Europa para as demais categorias (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.4 EPS 2000

O método EPS 2000 (Environmental Priority Strategies in product development) foi desenvolvido na Suécia, na Universidade de Tecnologia Chalmers. É um método de avaliação endpoint (STEEN, 1999a).

As categorias de impactos abrangem as áreas: saúde humana, toxicidade humana, cancerígenos e não cancerígenos, efeitos respiratórios, mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, radiação ionizante e ruído. Apresenta escopo de aplicação global e somente para a categoria de impacto de biodiversidade é específico para a Suécia. Esse método abrange aproximadamente 200 substâncias e todos os efeitos são calculados por substância, conferindo a ele maior precisão (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.5 IMPACT 2002+

O IMPACT 2002+ (Impact Assessment of Chemical Toxics) é um método suíço que propõe a implementação da avaliação combinada midpoint/endpoint ligando todos os tipos de resultados do inventário através de 14 categorias midpoint e quatro endpoint (JOLLIET et al., 2003).

Apresenta escopo de aplicação válido para a Europa. Essa metodologia apresenta novos conceitos e métodos de avaliação comparativa de toxicidade humana e efeitos

de ecotoxicidade. As categorias de impacto midpoint abrangem toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, depleção de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, aquecimento global, ruído. As categorias endpoint contemplam saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.6 LIME

O método LIME (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) foi lançado em 2003 pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Industrial Avançada (AIST) visando quantificar os impactos ambientais associados às cargas ambientais no Japão com a maior precisão possível (ITSUBO et al., 2004). O escopo de aplicação é voltado para as condições naturais e humanas japonesas, apresenta aplicação global para aquecimento global e destruição da camada de ozônio e específico para o Japão nas demais categorias de impacto (JOINT RSESARCH CENTRE, 2011; ITSUBO et al., 2003).

As categorias midpoint englobam aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade, formação de oxidantes fotoquímicos, poluição do ar inteior de ambientes fechados, geração de ruídos e geração de resíduos, consumo de minerais, consumo de energia, consumo de recursos bióticos. Já as categorias endpoint contemplam malária, doenças infecciosas, fome e desastres naturais, catarata, câncer de pele, deficiência respiratória, biodiversidade (terrestre e aquática), recursos minerais e recursos energéticos (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.7 LUCAS

O LUCAS (LCIA method Used for a Canadian-Specific context) foi desenvolvido em 2005 pelo Centro de Pesquisa Interuniversitário para o Ciclo de Vida de Produtos, Processos e Serviços (CIRAIG) no Canadá, com a finalidade de desenvolver uma metodologia voltada para aplicação no Canadá (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010). A princípio, foram selecionados modelos de caracterização para dez categorias de

impacto midpoint. São abordados os modelos utilizados pelos métodos EDIP 2003, Impact 2002+, LIME e TRACI, por incluírem especificidades locais em seus fatores de caracterização até o desenvolvimento do método LUCAS (TOFFOLETTO et al., 2007).

Apresenta escopo de aplicação global para as categorias de impacto mudança climática e depleção de ozônio e específica para o Canadá para as demais categorias de impacto. As categorias de impacto presentes são mudança climática, depleção de ozônio, efeitos respiratórios, ecotoxicidade, toxicidade humana, uso da terra e destruição de recursos abióticos (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.8 MEEuP

O MEEuP (Methodology study for Eco-design of Energy-using Products) foi desenvolvido em nome da Comissão Europeia sob aplicação de medidas previstas na Diretiva 2005/32/CE. Apresenta escopo de aplicação voltado para a União Europeia e abrange as categorias de impacto consumo total de energia bruta, consumo de eletricidade, consumo de água, resíduos sólidos perigosos e não perigosos, aquecimento global, destruição do ozônio, acidificação, emissão de metais pesados (ar), emissão de metais pesados (água), toxicidade humana e eutrofização aquática (KEMNA et al., 2005).

3.2.9 ReCiPe

O método ReCiPe é da continuidade aos métodos Eco-indicador 99 e CML 2000 que integra abordagens midpoint e endpoint. As categorias de impacto abordam mudança climática, depleção de ozônio, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, esgotamento de recursos minerais e esgotamento de recursos de água doce (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010; GOEDKOOP et al., 2009).

Apresenta escopo de aplicação global para as categorias de impacto mudança climática, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos e escopo de aplicação válido para a Europa para as demais categorias de impacto (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.10 TRACI

O TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) é um método de avaliação do impacto elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos em 2003 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2010). Trata-se de um método midpoint que considera as condições ambientais dos Estados Unidos.

O método contempla as categorias de impacto depleção de ozônio, aquecimento global, formação de fumaça, acidificação, eutrofização, saúde humana (carcinogênicos e não carcinogênicos, poluentes), ecotoxicidade, esgotamento de combustíveis fósseis, uso da terra e uso da água (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010; BARE et al., 2003).

Apresenta escopo de aplicação global para as categorias depleção de ozônio e aquecimento global, escopo de aplicação válido para a América do Norte para acidificação, eutrofização e formação de fumaça e escopo de aplicação válido para os Estados Unidos para as categorias relacionadas a saúde humana e ecotoxicidade (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010).

3.2.11 USEtox

O USEtox é um método de avaliação midpoint projetado para descrever destino, exposição e efeitos de produtos químicos, fornecendo fatores de caracterização recomendados para a toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce na avaliação de impacto do ciclo de vida (JOINT RSESARCH CENTRE, 2010; HUIJBREGTS et al., 2010).

No método USEtox são determinados fatores para impactos cancerígenos, não cancerígenos e impactos totais. Aplicando-se o USEtox com um banco de dados bem referenciado são encontrados fatores de caracterização para 991 substâncias orgânicas na categoria de impacto toxicidade humana (HUIJBREGTS et al., 2010).

3.2.12 IMPACT World +

O método IMPACT World+ foi desenvolvido como uma avaliação de impacto regionalizada cobrindo todas as regiões do mundo. Os modelos de caracterização são uma atualização dos modelos existentes nos métodos Impact 2002+, EDIP e LUCAS, o que resultou em fatores de caracterização para diferentes resoluções geográficas, cada um com sua própria incerteza e variabilidade espacial associada (IMPACT WORLD+, 2012).

O IMPACT World+ (2012) traz como principais diferenciais: o modelo USEtox para impactos tóxicos e os impactos do uso da água com fatores continentais específicos e alternativas especializadas consistentes; desenvolvimento de melhorias de modelagem para uso da terra; para acidificação; para o uso de recursos; para efeitos respiratórios e a inclusão dos impactos de resíduos de pesticidas.

Aborda as categorias de impacto: toxicidade humana, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozônio, aquecimento global, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da água, uso da terra e uso de recursos. Na categoria toxicidade humana os indicadores midpoint podem ser atribuídos ás subcategorias composta por substâncias não cancerígenas, cancerígenas, inorgânicos inaláveis e radiações ionizantes.

3.2.13 Análise dos métodos estudados

O Quadro 1, baseado nas referências bibliográficas utilizadas nesse estudo, contempla o método, o nível de avaliação de impacto, as categorias de impacto e a abrangência de aplicação.

Os principais métodos de indicadores de avaliação de desempenho ambiental foram desenvolvidos em sua maioria em países da Europa, como os métodos: CML 2002, Eco-indicator 99, EDIP 97 e EDIP 2003, EPS 2000, Impact 2002+, MEEuP e ReCiPe. Os métodos LUCAS e TRACI têm origem na América do Norte e o método LIME foi desenvolvido pelo Japão. Os métodos mais recentes, USEtox e IMPACT World+, foram desenvolvidos por grupos de pesquisadores de todo o mundo, o demonstra uma tentativa de globalização quanto à aplicação desses métodos.

Método	Nível de avaliação de impacto	Categorias de impacto	Abrangência de aplicação
CML 2002	Midpoint	Depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana	Global
Eco-Indicator 99	Endpoint	Quantidade e duração das doenças, mudança climática, depleção do ozônio,	Global
	Endpoint	Substancias carcinogênicas, inaláveis orgânicos e inorgânicos, radiação ionizante e ecotoxicidade	Europa
	Endpoint	Acidificação e eutrofização,	Holanda
	Endpoint	Uso da terra	Suiça
EDIP 97	Midpoint	Aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo de recursos e ambiente de trabalho	Global
EDIP 2003	Midpoint	Aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, eutrofização terrestre, eutrofização aquática, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade e barulho, com escopo de aplicação global para aquecimento global e depleção de ozônio	Europa
EPS 2000	Endpoint	Saúde humana, toxicidade humana, cancerígenos e não cancerígenos, efeitos respiratórios, mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, radiação ionizante e ruído	Global
Impact 2002+	Combinado	Toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, depleção de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, aquecimento global, ruído	Europa
LIME	Combinado	Aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade, formação de oxidantes fotoquímicos, poluição do ar inteior de ambientes fechados, geração de ruídos e geração de resíduos, consumo de minerais, consumo de energia, consumo de recursos bióticos	Japão
LUCAS	Midpoint	Mudança climática, depleção de ozônio, efeitos respiratórios, ecotoxicidade, toxicidade humana, uso da terra e	Canadá

		destruição de recursos abióticos	
MEEuP	Midpoint	Consumo total de energia bruta, consumo de eletricidade, consumo de água, resíduos sólidos perigosos e não perigosos, aquecimento global, destruição do ozônio, acidificação, emissão de metais pesados (ar), emissão de metais pesados (água), toxicidade humana	Europa
ReCiPe	Combinado	Toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, esgotamento de recursos minerais e esgotamento de recursos de água doce	Europa
	Combinado	Mudança climática, depleção de ozônio	Global
TRACI	Midpoint	Formação de fumaça, acidificação, eutrofização, saúde humana, ecotoxicidade, esgotamento de combustíveis fósseis, uso da terra e da água	América do Norte
	Midpoint	Depleção de ozônio, aquecimento global	Global
USEtox	Midpoint	Toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce	Global
IMPACT World +	Combinado	Toxicidade humana, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozônio, aquecimento global, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da água, uso da terra e uso de recursos.	Global

Quadro 1 - Principais métodos de ADA e suas características
Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se, assim, uma lacuna de métodos originados no Brasil, o que implica na ausência de procedimentos de caracterização direcionados ao contexto brasileiro, havendo assim uma oportunidade para pesquisas nessa área do conhecimento e a participação de especialistas brasileiros em projetos de alcance global nesse tema.

O método escolhido para esta dissertação foi o método EDIP 97, sendo um método midpoint e com escopo de aplicação global. Tal fato se justifica, pois, os métodos recomendados para aplicação no Brasil são aqueles que apresentam uma abrangência classificada como global para o escopo de aplicação de suas categorias de impacto. Além disso as avaliações no nível endpoint apresentam modelagem com complexidade e incertezas claramente maiores do que a modelagem midpoint. Outro ponto relevante para tal escolha é que o método EDIP 97 diferencia a toxicidade humana em decorrência de emissões poluentes na atmosfera, na água e no solo. O método EDIP 97 é um método consagrado para mensuração dos impactos

ambientais, foi desenvolvido para apoiar análises ambientais durante o desenvolvimento de produtos industriais e fornecer fatores de caracterização diferenciados (HAUSCHILD et al., 2012; MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS

O processamento da cana de açúcar é realizado em etapas, sendo as etapas iniciais similares tanto para a fabricação do açúcar quanto do etanol, ou seja, a partir de dado momento do processamento o resultado é destinado para a fabricação de um dos dois produtos desta indústria. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo produtivo sucroenergético, exibindo simplificadamente suas etapas e os resíduos/subprodutos gerados. Os retângulos na cor preta representam os processos produtivos, em vermelho os resíduos e em verde os subprodutos.

As operações preliminares dos processos sucroenergéticos iniciam-se na colheita da cana. A colheita pode ser realizada de forma manual ou mecanizada, sendo que no Brasil, houve grande avanço das colheitas mecanizadas, principalmente, em cumprimento às legislações ambientais. A cana pode ser estocada provisoriamente conforme demonstrado na figura 2 e posteriormente descarregada nas mesas alimentadoras. A figura 3 apresenta um tombador de cana, em que a cana através desse equipamento é descarregada nas mesas alimentadoras. A cana também pode ser provisionada em barracão ou nas próprias carretas, sistema que é denominado “bate e volta” (REIN, 2017).

A industrialização da cana de açúcar inicia-se com essa **recepção** na usina. Após ser descarregada nas mesas alimentadoras, a cana passa por um processo de **limpeza** a seco e é então transferida a uma esteira metálica que a conduz até a próxima etapa, quer seja a **extração do caldo** (REIN, 2013; DE SOUZA DIAS et al., 2015).

A lavagem da cana não deve ocorrer em cana mecanizada, pois este processo acarretaria em perda de sacarose pela água, por causa da cana colhida ser picada. Atualmente, as indústrias sucroenergéticas utilizam o sistema de lavagem a seco, em que a cana passa por sopradores que retiram somente as impurezas mais robustas como a palha e uma quantidade maior de terra. As impurezas que seguem são retiradas no processo de tratamento do caldo. Destaca-se que atualmente, na etapa de colheita, a palha já é separada pelas colheitadeiras sendo deixadas no campo, onde servem de adubo (DE SOUZA DIAS et al., 2015).

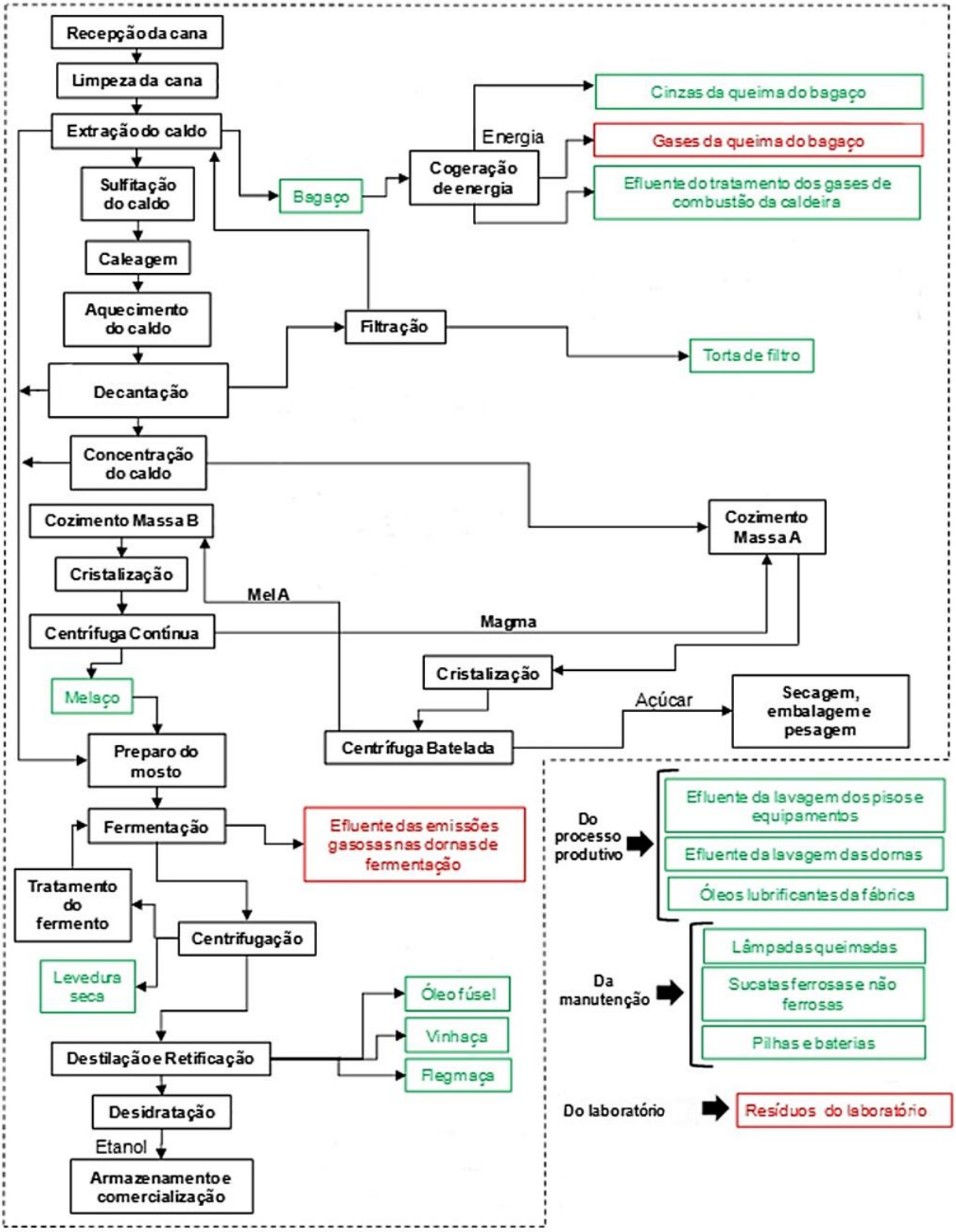

Figura 1 - Fluxograma de produção de etanol
Fonte: Adaptado de Rebelato (2016)

Figura 2 - Armazenamento da cana
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 3 - Tombador de cana
Fonte: elaborado pelo autor

A cana de açúcar é composta de caldo e fibras sendo que é no caldo que se encontra o açúcar presente na planta. A extração do caldo se dá a partir de moendas que extraem de 92% a 97% da sacarose presente na cana. Ressalta-se que em algumas usinas pode ser utilizado o método de difusão para extrair o caldo que apresenta igual ou maior eficiência que o método por prensagem. Para extração da parcela de sacarose ainda presente no bagaço, é a ele adicionada água, processo chamado de embebição. Este processo tem a finalidade de diluir o caldo ainda existente no bagaço aumentando, dessa forma, a extração da sacarose (ALBUQUERQUE, 2011). Desta etapa, tem-se o caldo, que seguirá nas demais etapas do processamento, e o bagaço livre do caldo que será destinado à produção de energia (OMETTO et al., 2014).

A cogeração na indústria sucroenergética é o processo de produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana. O bagaço tem sido um dos resíduos de biomassa mais aplicados à geração de energia no mundo, sendo aplicado como recurso de insumo em mais de 80 países produtores de cana-de-açúcar para geração de eletricidade. Tal fato se deve aos benefícios ambientais e econômicos que traz para a indústria sucroenergética já que, além de dar destinação adequada ao subproduto bagaço, a cogeração pode tornar esta indústria autossuficiente em produção de energia elétrica (BOTHA e BLOTTNITZ, 2006). Neste estudo o bagaço foi considerado como matéria prima para a cogeração de energia. Na cogeração, o bagaço é queimado em caldeiras e este processo gera os seguintes resíduos: cinzas da queima do bagaço, gases da queima do bagaço e efluente de tratamento dos gases de combustão da caldeira. Na Figura 4 é apresentado o decantador de cinzas (ou fuligem) em que são dispostas as cinzas da queima do bagaço, e após o processo de decantação podem ser destinadas à lavoura como adubo.

O caldo de cana obtido no processo de moagem pode apresentar impurezas solúveis ou insolúveis. Assim, o tratamento primário do caldo tem por finalidade eliminar as impurezas insolúveis que podem ser terra, areia, bagacilho entre outros. Para a areia e terra é utilizado o hidrociclone e para o bagacilho a eliminação ocorre por peneira rotativa conforme figura 5, que fica junto à moenda, visando manter a eficiência dos equipamentos instalados (ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 4 - Decantador de cinzas (fuligem)
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5 - Peneiras
Fonte: elaborado pelo autor

Após a extração, o caldo passa pela etapa de **sulfitação** que consiste na absorção de SO_2 (dióxido de enxofre) pelo caldo, o que reduz seu pH original de 5 a 5,5 para 3,8 a 4,3. A sulfitação visa inibir as reações que causam formação de cor nos cristais de açúcar e diminuir a viscosidade do caldo com objetivo de facilitar os posteriores processos de evaporação e cozimento. Em seguida, o caldo encaminhado para a etapa de **caleagem**, conforme apresentado na figura 6, onde é aplicado o leite de cal para elevação do pH para próximo da neutralidade. O objetivo é a proteção da

molécula da sacarose, que pode ser hidrolisada em pH baixos (DELLA-BIANCA et al., 2013).

Figura 6 - Preparo da cal
Fonte: elaborado pelo autor

A próxima etapa consiste no **aquecimento do caldo** para acelerar o processo químico de formação de substâncias insolúveis, processo este realizado nos aquecedores conforme figura 7. Em seguida, o caldo é encaminhado a degasagem em balão de flash, adicionando o polímero que aumenta a massa das substâncias insolúveis, sendo encaminhado ao processo de **decantação**. No decantador, equipamento apresentado na figura 8, o caldo clarificado é separado do lodo. O caldo limpo segue o processamento e o lodo é filtrado para recuperação da sacarose ainda presente no lodo. O lodo passa, então, pela etapa de **filtração** na qual é gerado o subproduto denominado torta de filtro (REIN, 2017).

Figura 7 - Aquecedores
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 8 - Decantador
Fonte: elaborado pelo autor

Já o caldo filtrado é misturando com caldo extraído formando o caldo clarificado, que é, então, submetido à etapa de **concentração de caldo**, para remoção do excesso de água presente. A etapa de concentração é feita em dois estágios: evaporação rápida (através dos evaporadores, apresentados na Figura 9) e evaporação controlada (cozedores, apresentados na Figura 10) para formação dos cristais de açúcar. O primeiro estágio do processo de concentração do caldo é realizado na evaporação, a qual ocorre de forma contínua. O evaporador é equipamento formado por caixas ligadas em série, fazendo com que o caldo sofra uma concentração progressiva da primeira à última caixa. Nesse processo é injetado vapor de escape na primeira caixa e essa água evaporada na primeira caixa (denominado vapor vegetal) irá aquecer o caldo nas demais (ALBUQUERQUE, 2011).

A Figura 9 apresenta os evaporadores e a Figura 10 apresenta os cozedores.

Figura 9 - Evaporadores
Fonte: elaborado pelo autor

A produção do açúcar continua no segundo estágio de concentração chamado **cozimento**, em que os cozedores trabalham individualmente sob vácuo e de forma descontínua para produção de massa cozida (“massa A”), formada de cristais de açúcar e mel (DE SOUZA DIAS et al., 2015)**.**

Figura 10 - Cozedores
Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida, se inicia a etapa de **cristalização**, onde a massa cozida é enviada dos cozedores para os **cristalizadores com os** objetivos de recuperar parte da sacarose dissolvida no mel e de armazenar a massa para a etapa de **centrifugação**. Nesse processo, a massa é direcionada à centrifuga que possui um cesto perfurado em que o mel atravessa as perfurações e os cristais ficam retidos em seu interior. Ao fim da centrifugação, o açúcar é retirado desse cesto e conduzido através de esteiras ao processo de **secagem**. Após a finalização do processo de secagem, o açúcar sai pronto para o ensaque com uma temperatura entre 35º e 40°C e umidades entre de 0,03% a 0,04%, podendo ser ensacado em sacos de 50 kg ou em pacotes que formam os fardos (**embalagem e pesagem**). Para o açúcar bruto (tipo VHP – very high polarization), o açúcar é armazenado e comercializado a granel (FERNANDES, 2011).

O mel removido na etapa de centrifugação retorna aos cozedores para recuperação da sacarose ainda presente, até atingir seu esgotamento obtendo nesta segunda etapa a chamada “massa B”, uma massa mais pobre em sacarose que a massa A (REIN, 2017). A centrifugação da massa B dá origem ao magma, produto utilizado no cozimento da massa A, e ao mel final, subproduto chamado **melaço.** O melaço é enviado para a produção de etanol (DE SOUZA DIAS et al., 2015).

Concluídas as etapas de produção do açúcar tem início a produção de etanol que pode utilizar como matéria prima o caldo extraído da cana, o caldo clarificado e/ou o melaço. A fabricação do etanol é obtida após a fermentação do caldo ou de uma mistura entre melaço e caldo (transformado em mosto). O mosto é uma solução de açúcar na qual sua concentração e outros atributos são preparados e controlados de forma a favorecer o processo fermentativo. O **preparo do mosto** consiste em redução do pH para 4,5, regulação da temperatura a 32ºC e suprimento de deficiências nutricionais. Após a etapa do preparo do mosto, inicia-se sua **fermentação** que é realizada por leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) que são adicionadas ao mosto para produção de etanol por via bioquímica (DELLA-BIANCA et al., 2013).

No processo de fermentação os açúcares presentes no mosto são transformados em etanol. Esse processo ocorre nas dornas de fermentação por cerca de 6 a 8 horas. Ao término, o teor médio de etanol nas dornas varia entre 7% a 12% sendo chamada de vinho levedurado (DELLA-BIANCA et al., 2013). Durante a fermentação do mosto há, ainda, a produção CO_2 que pode carregar parte do etanol produzido. Para a recuperação deste etanol, o CO_2 é lavado com água e origina o efluente das emissões gasosas das dornas de fermentação. Além disso, na assepsia das dornas de fermentação é gerado outro efluente, denominado efluente de lavagem das dornas (ANDRIETTA et al., 2011).

Após a fermentação irá ocorrer a recuperação de leveduras através da **centrifugação** do vinho. Após ser recuperada, a levedura poderá seguir os seguintes caminhos: i) ser separada para secagem (levedura seca) para posterior comercialização e/ou ii) retornar ao processo fermentativo após **tratamento do fermento** (diluição com água e adição de ácido sulfúrico até chegar ao pH 2,5 (REBELATO et al., 2016).

O vinho livre de levedura originado na centrifugação passa pelo processo de destilação, em que através dos diferentes pontos de ebulição e solubilidade, as substâncias voláteis são separadas. O processo de destilação para obter álcool hidratado é composto por duas colunas principais: **destilação** (coluna A) e **retificação** (coluna B) (REIN, 2017).

Na etapa de destilação são originadas a flegma e a vinhaça, sendo a primeira encaminhada para a coluna de retificação. Já a vinhaça é considerada um subproduto

da produção do etanol, retirada a uma proporção aproximada de 14 litros para cada litro de álcool produzido (FERNANDES, 2011).

Na coluna de retificação a flegma é concentrada e purificada originando: i) álcool hidratado (produto principal do processo); ii) flegmaça, solução aquosa utilizada no processo para lavagens de pisos e equipamentos; e iii) óleo fúsel, que é resfriado, lavado, decantado e armazenado para posterior comercialização (ANDRIETTA et al., 2011).

O etanol hidratado pode ser destinado a comercialização em forma de combustível ou passar pelo processo de **desidratação**. Pode-se utilizar o processo de desidratação de álcool via peneira molecular, via extrativa ou via azeotrópica. O resultado é o álcool anidro que passa a ter uma solução com concentração próxima a 99,9%. O etanol produzido, seja anidro ou hidratado, é quantificado através de medidores de vazão e **armazenados** em tanques de grande volume, conforme Figura 11, aguardando a **comercialização** (DE SOUZA DIAS et al., 2015).

Figura 11 - Tanque de armazenagem de etanol
Fonte: elaborado pelo autor

Adicionalmente, foram levantados resíduos na planta fabril que não foram gerados diretamente pelo processamento da cana de açúcar. Dentre estes estão os óleos lubrificantes da fábrica, derivados das trocas periódicas efetuadas nas máquinas como turbinas, sistemas hidráulicos, entre outros. Das atividades realizadas em laboratórios de controle do processo produtivo têm-se os resíduos de laboratórios, que

são soluções resultantes das análises de impureza mineral e análises do açúcar, etanol e águas das caldeiras. Por fim, das operações de manutenção são gerados os resíduos lâmpadas queimadas, sucatas ferrosas e não ferrosas e pilhas e baterias.

4.1 Resíduos e subprodutos gerados no processo de fabricação sucroenergético

Foram identificados 17 resíduos e subprodutos no processo de fabricação de açúcar e etanol. Os resíduos e subprodutos descritos na figura 1 são apresentados a seguir.

4.1.1 Vinhaça

A vinhaça é efluente obtido na destilação rico em matéria orgânica (aproximadamente 2%), tem pH ácido e apresenta em sua composição cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, zinco, cádmio, chumbo, ferro, fenol. A vinhaça é subproduto da destilação do caldo da cana-de-açúcar, podendo ser sua produção relacionada com a produção de álcool na proporção aproximada de 14 litros de vinhaça para cada litro álcool. Sua destinação é aplicação em fertirrigação. Os tanques de armazenamento de vinhaça são impermeabilizados com uma geomembrana impermeabilizante ou outra técnica de igual ou superior efeito. Trata-se de um resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e/ou águas subterrâneas (REBELATO et al., 2016; GURGEL, 2015; ELIA NETO E NAKAHODO, 1995).

A Figura 12 apresenta a vinhaça sendo preparada para a fertirrigação.

Figura 12 - Vinhaça para fertirrigação
Fonte: elaborado pelo autor

4.1.2 Óleos lubrificantes da fábrica

Os óleos lubrificantes da fábrica são subprodutos que contem hidrocarbonetos e metais, tais como o ferro, chumbo, zinco, manganês, cobre, molibdênio. Esses óleos, caso sejam lançados no solo podem se infiltrar e serem levados pela água da chuva, além de contaminar os lençóis freáticos subterrâneos. Trata-se de um resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e/ou águas subterrâneas (NOGUEIRA; GARCIA, 2013).

4.1.3 Melaço

O melaço é composto de açúcares como frutose, glicose e sacarose os quais não foram cristalizados na fabricação de açúcar. Pode ser utilizado como fertilizante, por ter em sua composição nitrogênio, fosfatos, cálcio e magnésio, zinco, manganês, cobre, ferro e micronutrientes, e também é utilizado como alimento para animais, com até 85º Brix, apresenta uma DBO elevada. Trata-se de um subproduto potencialmente poluente via solo e águas superficiais e/ou águas subterrâneas (REBELATO et al., 2016).

4.1.4 Óleo fúsel

O óleo fúsel é potencialmente poluidor de águas e solo. Além de conter Metanol, que é tóxico, é composto por álcool isoamílico, álcool isobutílico, álcool n-amílico, álcool n-butílico, isopropanol, furfural aldeídos e ácidos graxos. A produção média deste subproduto é estimada em 2,5 L para cada 1.000 L de álcool. Trata-se de um resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e/ou águas subterrâneas (NOGUEIRA, GARCIA, 2013; DA MATA, 2011).

4.1.5 Pilhas e baterias

As pilhas e baterias são resíduos que contém metais pesados como níquel, zinco, cádmio e manganês. Esses metais tem alto potencial para contaminar solo, águas e a saúde humana. Trata-se de um resíduo potencialmente poluente via solo (REIN, 2017).

4.1.6 Lâmpadas queimadas

As lâmpadas são resíduos geralmente ricos em mercúrio além de cádmio, chumbo, manganês, níquel, zinco e ferro apresentando alto potencial de contaminação do solo, águas e da saúde humana. Trata-se de um resíduo potencialmente poluente via solo (REBELATO et al., 2016).

4.1.7 Sucatas ferrosas

As sucatas ferrosas são resíduos que contem metais ferrosos e não ferrosos como alumínio, cobre, bronze, níquel, zinco, ferro, molibdênio e são potencialmente contaminantes de águas e solo, tanto por meio da absorção por parte das plantas como por adsorção por argilas e matéria orgânica e lixiviação pela água. Trata-se de um resíduo potencialmente poluente via solo (NOGUEIRA; GARCIA, 2013).

4.1.8 Torta de filtro

A torta de filtro é um subproduto resultante da filtração do lodo recebido do decantador, cujas características são afetadas por: estágio de maturação e variedade da cana, tipo de solo utilizado, variações no processo de clarificação do caldo, entre outros. A produção média de torta de filtro é de 40 kg por tonelada de cana. O nitrogênio orgânico, cálcio, fósforo, potássio, magnésio, ferro, zinco e manganês estão entre os elementos principais (NOGUEIRA, GARCIA 2013). Constitui-se por bagaço

de cana (11% de lignina, 34% de hemicelulose e 38% de celulose) com pequena fração mineral (principalmente silício). Tem alto potencial poluente principalmente com relação às águas, podendo acarretar significativos danos aos mananciais superficiais ou subterrâneos, se indevidamente disposta no ambiente (ROSSETO; SANTIAGO, 2007; CETESB, 2002).

4.1.9 Levedura

A levedura é um subproduto rico em proteínas e concentrado em vitaminas do complexo B, largamente utilizado na composição de ração para animais e muito utilizada na indústria alimentícia. Como mais de 87% do peso sobre a matéria seca é composto de matéria orgânica e também por apresentar em sua composição manganês, cobre, cromo, molibdênio, níquel, zinco, ferro, cobalto, vanádio, selênio, trata-se de material potencialmente poluidor, principalmente de águas superficiais e subterrâneas (REIN, 2013).

4.1.10 Flegmaça

A Flegmaça é líquido transparente produzido no processo de retificação do flegma. Apresenta em sua composição cobre, ferro, zinco e manganês, além de grande quantidade água, sendo utilizada principalmente para limpeza de equipamentos como dornas e trocadores de calor. Aponta-se uma produção média 2,8 litros de flegmaça para cada litro de etanol produzido (COPERSUCAR, 2005). Trata-se de um resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e/ou águas subterrâneas (REBELATO et al., 2014).

4.1.11 Resíduos dos laboratórios

Tratam-se de soluções clarificantes a base de alumínio, resíduos de papel de filtro, o bolo úmido (análise de fibra), cinzas das análises de impureza mineral e reagentes da análise de quantidade de açúcares redutores. São potencialmente poluidores de águas e solo (REBELATO et al., 2016).

As análises químicas realizadas em laboratório industrial e de sacarose se utilizam diariamente de quantidades elevadas de reagentes. Dentre esses se destacam o cloreto de alumínio, utilizado na análise de sacarose aparente, licor de

Fehling na análise de açúcar redutores, ácidos e bases fortes que são descartados em esgoto doméstico sem algum tratamento (REBELATO et al., 2014).

A Figura 13 apresenta uma amostra de cana separada para analises.

Figura 13 - Cana separada para analises
Fonte: elaborado pelo autor

4.1.12 Efluente da lavagem dornas

Considera-se que a água de lavagem das dornas tem efeito poluidor análogo ao da vinhaça, entretanto bem mais diluído, cerca de 20% da vinhaça. Trata-se de um resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e/ou águas subterrâneas (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2013).

4.1.13 Efluente da lavagem pisos equipamentos

Efluente de características não uniformes. A DBO varia na faixa de centenas até milhares de mg/l e o pH desde muito ácido até muito alcalino. Pode também estar contaminado com graxas e óleos. Trata-se de um efluente com alto potencial de contaminação das águas e do solo (REBELATO et al., 2016).

4.1.14 Cinzas da queima do bagaço

Apesar de quimicamente estável e não conter material orgânico dissolvido, as cinzas são potencialmente poluidoras de águas superficiais. São compostas por manganês, cobre, cromo, molibdênio, níquel, zinco, ferro, cobalto, cadmio, chumbo,

selênio, mercúrio. As cinzas são normalmente dispostas na lavoura como fertilizantes (NOGUEIRA; GARCIA, 2013). A Figura 14 apresenta as cinzas provenientes da queima do bagaço em processo de decantação, onde ao final do processo poderão ser dispostas à lavoura.

Figura 14 - Cinzas em processo de decantação
Fonte: elaborado pelo autor

4.1.15 Gases provenientes da queima do bagaço

Os gases provenientes da queima do bagaço são compostos por CO_2, CO e NO_x. Trata-se de gases potencialmente poluentes via atmosfera (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2013).

4.1.16 Efluente tratamento dos gases combustão

Trata-se de efluente que, apesar de conter certo teor de matéria orgânica, apresenta baixa taxa de DBO (de 100 a 300 mg/L de DBO). É um efluente muito quente (temperatura até 80º C) e alta carga de fuligem, o que não permite seu despejo diretamente em corpos d'água nem na lavoura (REBELATO et al., 2016).

4.1.17 Efluente gasoso das dornas de fermentação

O efluente gasoso das dornas de fermentação é composto pelo gás CO_2 e trata-se de gás potencialmente poluente via atmosfera (REBELATO et al., 2014).

A tabela 2 apresenta os resíduos/subprodutos caracterizados quanto à sua atividade geradora, composição e impacto potencial à saúde humana.

Resíduo ou subproduto	Atividade geradora	Composição	Impacto potencial à saúde humana
Vinhaça	Produção	Efluente rico em matéria orgânica e tem pH ácido, é composta por cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, zinco, cádmio, chumbo, ferro, fenol.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Pilhas e baterias	Todos os setores	Resíduos que contém metais pesados como níquel, zinco, cádmio e manganês.	Resíduo sólido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Óleos lubrificantes fábrica	Todos os setores	Subprodutos que contem metais, tais como o ferro, chumbo, zinco, manganês, cobre, molibdênio.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Lâmpadas queimadas	Todos os setores	Compostas por mercúrio além de cádmio, chumbo, manganês, níquel, zinco e ferro.	Resíduo sólido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Melaço	Produção	Composto de nitrogênio, fosfatos, cálcio e magnésio, zinco, manganês, cobre, ferro e micronutrientes.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Oleo fúsel	Produção	Composto por álcool isoamílico, álcool isobutílico, álcool n-amílico, álcool n-butílico, isopropanol, furfural, aldeídos e ácidos graxos.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Resíduos dos laboratórios	Laboratórios	Tratam-se de soluções clarificantes a base de alumínio, resíduos de papel de filtro, cinzas das análises de impureza mineral e reagentes da análise de quantidade de açúcares redutores. Há também resíduos das analises de açúcar, etanol e águas das caldeiras.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Sucatas metálicas	Produção	Resíduos que contem metais ferrosos e não ferrosos como alumínio, cobre, bronze, níquel, zinco, ferro, molibdênio.	Resíduo sólido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Efluente lavagem dornas	Produção	Considera-se que a água de lavagem das dornas tem cerca de 20% da vinhaça.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Efluente lavagem pisos equipamentos	Produção	Efluente de características não uniformes apresentando pH desde muito ácido até muito alcalino, podendo estar contaminado com graxas e óleos.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Torta de filtro	Produção	Composta por nitrogênio orgânico, cálcio, fósforo, potássio, magnésio, manganês, zinco e ferro.	Resíduo sólido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.
Levedura	Produção	Subproduto rico em proteínas e concentrado em vitaminas do complexo B. Contem manganês, cobre, cromo, molibdênio,	Resíduo sólido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.

		níquel, zinco, ferro, cobalto, vanádio, selênio.	
Cinzas da queima do bagaço	Produção	Compostas por manganês; cobre; cromo; molibdênio; níquel; zinco; ferro; cobalto; cadmio; chumbo; selênio; mercúrio.	Resíduo potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas
Efluente tratamento gases combustão	Produção	Trata-se de efluente que, apesar de conter certo teor de matéria orgânica, apresenta baixa taxa de DBO (de 100 a 300 mg/L de DBO).	Gás potencialmente poluente via atmosfera.
Gases provenientes da queima do bagaço	Produção	Composto por CO_2, CO, NOx.	Gás potencialmente poluente via atmosfera.
Efluente gasoso das dornas de fermentação	Produção	Composto pelo gás CO_2.	Gás potencialmente poluente via atmosfera.
Flegmaça	Produção	Composta por cobre, ferro, zinco e manganês.	Resíduo líquido potencialmente poluente via solo e águas superficiais e / ou águas subterrâneas.

Tabela 2 - Resíduos e subprodutos gerados nos processos de fabricação sucroenergéticos
Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados do presente estudo, abrangendo: i) o estudo multicasos identificando o contexto das empresas estudadas, ii) o cálculo do potencial de toxicidade humana para os resíduos e subprodutos gerados na fabricação de etanol e açúcar e iii) aplicação da estrutura metodológica para avaliação de desempenho ambiental, com base no potencial de toxicidade humana, em indústria sucroenergética.

5.1 Estudo multicasos - Contexto investigado

Para a aplicação da metodologia desenvolvida, foram realizados três estudos de caso em três empresas da indústria sucroenergética. Foram realizadas diversas visitas nas empresas estudadas, durante os anos de 2016 e 2017 pelo autor deste trabalho. Durante as visitas nas empresas estudadas, foi possível realizar uma coleta de dados sobre a quantidade de cana processada durante a safra, quais resíduos/subprodutos são gerados durante a fabricação, a quantidade gerada destes resíduos/subprodutos e a destinação final aos resíduos/subprodutos realizada pelas empresas estudadas. Além disso, foram realizadas observações acerca dos processos produtivos de fabricação de açúcar e etanol, o que permitiu um melhor entendimento sobre a produção na indústria sucroenergética e sua geração de resíduos/subprodutos.

Foram utilizadas como fontes de informação para o estudo multicasos: i) relatórios gerenciais que caracterizam as empresas estudadas, fornecidos durante as visitas nas unidades industriais; ii) informações disponíveis no site institucional das empresas; iii) relatórios de projetos e processos de produção de açúcar e etanol, incluindo fluxogramas, balanços de massa e energia, relatórios técnicos disponibilizados durante as visitas; e iv) livros, artigos científicos de periódicos nacionais e internacionais para complementar as informações coletadas durante as visitas. O contexto investigado das empresas estudadas esta apresentado a seguir. Para fins didáticos e de confidencialidade as empresas estudadas foram denominadas empresa A, empresa B e empresa C.

Empresa A

A empresa A é uma usina sucroenergética fundada na década de 1930. Com 3 unidades instaladas no interior do Estado de São Paulo, Brasil, é uma das maiores usinas processadoras de cana de açucar do mundo, com moagem de aproximadamente 5,9 milhões de toneladas por safra. As visitas nessa empresa foram realizadas durante o ano de 2016, contou com a presença de uma consultoria externa formada por especialistas no tema deste estudo, e também houve supervisão do Gerente Industrial da usina.

Observou-se que o gerenciamento dos resíduos é realizado por uma equipe composta por engenheiro ambiental e técnicos. A empresa elabora um Plano de Gerenciamento de Residuos (PGR) o qual busca minimizar a geração de resíduos na fonte, adequar a segregação na origem, controlar e reduzir riscos ao meio ambiente e assegurar o correto manuseio e disposição final, atendendo à legislação ambiental brasileira. O PGR é atualizado quando ocorrem modificações operacionais, que resultem na ocorrência de novos resíduos ou na eliminação destes.

A figura 15 ilustra um fluxograma do gerenciamento de resíduos adotado pela indústria estudada, onde tal fluxograma contribui para o controle e monitoramento da destinação final dos resíduos e subprodutos.

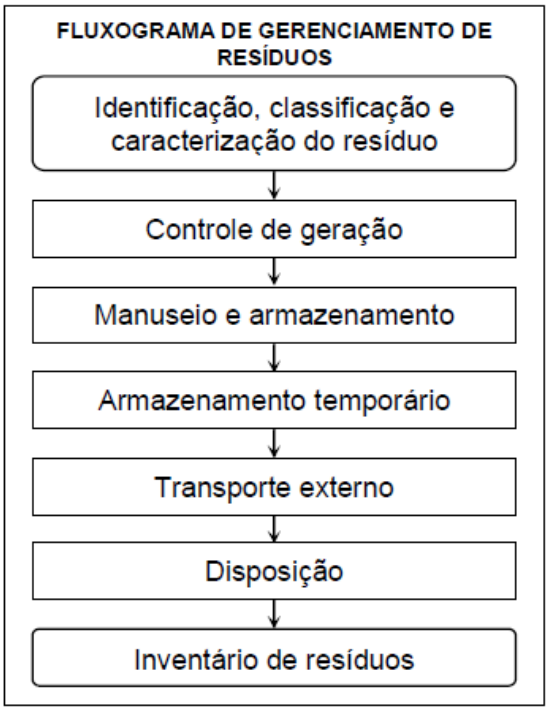

Figura 15 - Fluxograma de gerenciamento de resíduos e subprodutos
Fonte: elaborado pelo autor

Empresa B

A empresa B é uma usina sucroenergética que iniciou suas atividades no final da década de 1940. Com 1 unidade instalada no interior do Estado do Paraná, Brasil, é uma grande processadora de cana de açucar no Brasil, com moagem de aproximadamente 2,2 milhões de toneladas por safra. As visitas nessa empresa foram realizadas durante o ano 2016 e contou com a presença de um engenheiro químico e do Gerente Industrial da usina.

A empresa B realiza o gerenciamento dos seus residuos baseada na Norma Brasileira Regulamentadora NBR 10.004 (2004). A classificação definida pela ABNT na norma NBR 10.004:2004 é medida quanto sua periculosidade, dividindo os resíduos naqueles que podem apresentar risco ambiental e à saúde humana, daqueles que não apresentam risco. Os resíduos de classe I são classificados como perigosos, pois apresentam riscos à saúde humana ou ao meio ambiente, ou características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade. Os resíduos de classe II são classificados como não perigosos, porém apresentam dois subtipos: i) não inertes: estes resíduos não se enquadram em nenhuma das outras características citadas. Apresentam características como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; ii) inertes: nesta classe, os materiais ao serem colocados em contato com a água pura (destilada), não apresentam nenhum dos seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de portabilidade da água.

Empresa C

A empresa C é uma usina sucroenergética fundada na década de 1980. Com 2 unidades instaladas no interior do Estado de São Paulo, Brasil, esta entre as maiores usinas processadoras de cana de açucar no Brasil, com moagem de aproximadamente 4,2 milhões de toneladas por safra. As visitas nessa empresa foram realizadas no inicio do ano de 2017 e contou com a presença de uma consultoria externa formada por especialistas no tema deste estudo, além da supervisão do Gerente de Processos da usina.

A empresa C utiliza um sistema de coleta seletiva na qual alguns resíduos são armazenados em locais específicos e separados de acordo com sua composição para posterior destinação. Observou-se também, que o gerenciamento dos resíduos

é realizado por uma equipe liderada por um engenheiro ambiental em que buscam minimizar a geração de resíduos na fonte, adequar a segregação na origem, controlar e reduzir riscos ao meio ambiente e assegurar o correto manuseio e disposição final, atendendo à legislação ambiental brasileira.

Em contribuição às questões ligadas a Gestão Ambiental, foi promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, em 2010, sendo um avanço para a preservação ambiental. Esta Lei institui o princípio da responsabilidade compartilhada entre governo, empresas e população através de um sistema de logística reversa, da obrigatoriedade do poder público de realizar o gerenciamento dos resíduos. Além disso, têm-se o aspecto social da reciclagem, que conta com a participação formal de catadores em cooperativas organizadas. A indústria, nesse contexto, deve desenvolver e melhorar suas tecnologias produtivas a fim de minimizar o impacto no meio ambiente e à saúde humana consequentemente (JABBOUR et al., 2014).

5.2 Cálculo dos potenciais de toxicidade humana

Foram calculados os potenciais de toxicidade humana, conforme a metodologia desenvolvida, para os dezessete resíduos/subprodutos identificados no processo de fabricação de uma indústria sucroenergética.

Será utilizado o subproduto vinhaça para exemplificar a elaboração dos cálculos dos potenciais de toxicidade humana para os resíduos/subprodutos da indústria sucroenergética.

Para o cálculo do potencial de toxicidade humana da vinhaça, verificou-se que, no Brasil, na safra 2015/2016 foram produzidos 30.371.000.000 de litros de etanol. Como é gerado em média 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido, a quantidade de vinhaça gerada na safra 2015/2016 foi de 394.823.000.000 litros ou $3{,}94.10^{11}$ litros.

Após isso, foi identificada a composição química da vinhaça e a quantidade que se faz presente de cada substância em 1 litro de vinhaça. De posse desses dados, foi possível identificar no âmbito brasileiro, a quantidade de cada substância presente no total de vinhaça gerada na safra 2015/2016.

A Tabela 3 apresenta os resultados da quantidade de cada substância presentes em um litro de vinhaça.

Substância	Quantidade presente da substância em 1 L de vinhaça
Cobre	0,72 mg/L
Cromo	1,76 mg/L
Mercúrio	0,0019 mg/L
Molibdênio	0,008 mg/L
Níquel	0,03 mg/L
Zinco	1,66 mg/L
Cadmio	0,66 mg/L
Chumbo	0,23 mg/L
Ferro	72,5 mg/L
Fenol	34 mg/L

Tabela 3 - Composição química da vinhaça
Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 4 apresenta os resultados da quantidade, em gramas, de cada substância presentes na vinhaça no âmbito brasileiro. Tais valores foram encontrados multiplicando a quantidade de cada substância presente na Tabela 3 pelo total de vinhaça produzida na safra 2015/2016.

Substância	Total
Cobre	$2{,}84.10^{8}$ g
Cromo	$6{,}93.10^{8}$ g
Mercúrio	$7{,}48.10^{5}$ g
Molibdênio	$3{,}15.10^{6}$ g
Níquel	$1{,}18.10^{7}$ g
Zinco	$6{,}54.10^{8}$ g
Cadmio	$2{,}60.10^{8}$ g
Chumbo	$9{,}06.10^{7}$ g
Ferro	$2{,}86.10^{10}$ g
Fenol	$1{,}34.10^{10}$ g

Tabela 4 - Composição química da vinhaça no âmbito brasileiro
Fonte: elaborado pelo autor

O próximo passo foi verificar o fator de equivalência de cada substancia conforme tabela apresentada em Wenzel et al. (1997). A Tabela 5 apresenta a quantidade (em gramas), o local de impacto e os fatores de equivalência de toxicidade humana para cada substância presente na vinhaça.

Destaca-se que a vinhaça apresenta emissões no solo mas apresenta impacto nos três compartimentos (ar, água e solo), fato este que se deve às características físico-químicas do mercúrio, presente em sua composição, contribuindo também para a vinhaça apresentar elevado fator de equivalência.

O mercúrio é um metal prateado que é liquido à temperatura ambiente. É insolúvel em água, é volátil e quando a temperatura é aumentada transforma-se em vapor de mercúrio, sendo tóxico, corrosivo e mais denso que o ar. As atividades industriais em geral são acompanhadas por grandes derramamentos de mercúrio. Quando um curso de água é poluído pelo mercúrio, parte deste se volatiliza na atmosfera e depois torna a cair, em seu estado original com as chuvas. Uma outra parte absorvida direta ou indiretamente pelas plantas e animais aquáticos circula e se concentra em grandes quantidades ao longo das cadeias alimentares até chegar ao ser humano. Além disso, a atividade microbiana transforma o mercúrio metálico em mercúrio orgânico, altamente tóxico. É um elemento perigoso quando inalado, ingerido ou em contato com a pele olhos e vias respiratórias, ocasionando problemas físicos e/ou psicológicos (OLIVEIRA et al., 2011; BUENO et al., 2011; MOREIRA et al., 2010).

De posse desses dados, verifica-se de modo agregado, para a vinhaça, o potencial de toxicidade humana nos compartimentos ar, água e solo, apresentados na Tabela 6. Os resultados da Tabela 6 foram obtidos através da somatória do produto entre a quantidade de cada substancia pelo seu fator de equivalência, apresentados na Tabela 5.

Substância	Quantidade (g)	Local de impacto	EF-hta	EF-htw	EF-hts
	2,84E+08	Ar	0	0	0
Cobre	2,84E+08	Água	0	0	0
	2,84E+08	Solo	5,00E-03	1420000	1420000
	6,93E+08	Ar	0	0	0
Cromo	6,93E+08	Água	0	0	0
	6,93E+08	Solo	1,4	9,7E+08	9,7E+08
	7,48E+05	Ar	6,70E+06	5E+12	5E+12
Mercúrio	7,48E+05	Água	1,10E+05	8,2E+10	8,2E+10
	7,48E+05	Solo	81	6,1E+07	6,1E+07
	3,15E+06	Ar	0	0	0
Molibdênio	3,15E+06	Água	0	0	0
	3,15E+06	Solo	1,9	5985000	5985000
	1,18E+07	Ar	0	0	0
Niquel	1,18E+07	Água	0	0	0
	1,18E+07	Solo	0,15	1770000	1770000
	6,54E+08	Ar	0	0	0
Zinco	6,54E+08	Água	0	0	0
	6,54E+08	Solo	1,60E-02	1E+07	1E+07
	2,60E+08	Ar	0	0	0
Cadmio	2,60E+08	Água	0	0	0
	2,60E+08	Solo	5,6	1,5E+09	1,5E+09
	9,06E+07	Ar	0	0	0
Chumbo	9,06E+07	Água	0	0	0
	9,06E+07	Solo	0,1	9060000	9060000
	2,86E+10	Ar	0	0	0
Ferro	2,86E+10	Água	0	0	0
	2,86E+10	Solo	0,96	2,7E+10	2,7E+10
	1,34E+10	Ar	0	0	0
Fenol	1,34E+10	Água	0	0	0
	1,34E+10	Solo	6,40E-03	8,6E+07	8,6E+07

Tabela 5 - Quantidade, fatores de equivalência e potencial de toxicidade humana da vinhaça

Fonte: elaborado pelo autor

Resíduo/Subproduto	Potenciais de toxicidade humana		
	EP-hta (m^3 ar)	EP-htw (m^3 água)	EP-hts (m^3 solo)
Vinhaça	5,00E+12	8,23E+10	3,01E+10

Tabela 6 - Potencial de toxicidade humana da vinhaça

Fonte: elaborado pelo autor

Do mesmo modo procedeu-se os cálculos para os demais resíduos/subprodutos, onde a Tabela 7 apresenta os potenciais de toxicidade humana para os 17 resíduos/subprodutos gerados na fabricação sucroenergética.

Resíduo/Subproduto	Potenciais de toxicidade humana		
	EP-hta (m^3 ar)	EP-htw (m^3 água)	EP-hts (m^3 solo)
Vinhaça	5,00E+12	8,23E+10	3,01E+10
Pilhas e baterias	0	0	8,53E+07
Óleos lubrificantes da fábrica	0	0	7,37E+05
Lâmpadas queimadas	1,40E+11	2,35E+09	1,81E+07
Melaço	0	0	8,43E+09
Óleo fúsel	0	0	3,90E+05
Resíduos dos laboratórios	0	1,12E+07	0
Sucatas metálicas	0	0	1,19E+09
Efluente da lavagem dornas	0	0	6,01E+09
Efluente da lavagem pisos equipamentos	0	0	8,76E+05
Torta de filtro	0	0	2,06E+11
Levedura	0	0	2,82E+08
Cinzas da queima do bagaço	1,60E+16	2,75E+10	3,56E+10
Gases provenientes da queima do bagaço	0	0	0
Efluente gasoso das dornas de fermentação	0	0	0
Efluente tratamento dos gases combustão	3,90E+12	2,02E+05	1,62E+07
Flegmaça	0	0	2,43E+07
Total	**1,60E+16**	**1,12E+11**	**2,88E+11**

Tabela 7 - Potenciais de Toxicidade Humana para os resíduos e subprodutos da indústria sucroenergética

Fonte: elaborado pelo autor

Os potenciais de toxicidade humana são expressos em m^3 de ar, m^3 de água ou m^3 de solo. Essa unidade de referência é o volume do compartimento (ar, água ou solo) necessário para neutralizar ou diluir a substância tóxica, de forma que a sua concentração seja baixa o suficiente para não ocasionar efeitos tóxicos ao ser humano (WENZEL et al., 1997).

5.3 Aplicação da estrutura metodológica

Para a avaliação do desempenho ambiental baseado no potencial de toxicidade humana das empresas estudadas foi utilizado o índice I_{pth} expresso em (1). Para tanto, foi necessária a definição dos valores das variáveis para as empresas estudadas.

Como *n* – número de resíduos gerados no processo produtivo sucroenergético – foram considerados os 17 resíduos/subprodutos levantados.

De posse desta informação, na sequência foi aplicado método IAHP, com o uso do software Mind Decider, visando ao cálculo do peso relativo do potencial de toxicidade humana para cada resíduo e subproduto - $V_{(a)i}$.

O cálculo de $V_{(a)i}$ realizado pelo método IAHP se deu em duas fases: i) avaliação de desempenho das alternativas à luz dos critérios, ou seja, inicialmente foi definido o ordenamento dos critérios em função da grandeza do impacto, como estabelecido pelo método EDIP 97 (STRANDDORF et al., 2005), para o construto de potencial de toxicidade humana, ii) avaliação dos critérios à luz do objetivo geral, deste modo, como alternativas da avaliação do impacto, foi utilizado cada um dos dezessete resíduos/subprodutos encontrados no processo de fabricação da indústria sucroenergética. Os critérios de avaliação foram utilizados para cálculo dos potenciais de impacto elencados e como comparação das alternativas foi realizada uma comparação pareada dos potenciais calculados previamente no inventário.

Para isso, foi elaborada uma estrutura hierárquica, ilustrada pela Figura 16, envolvendo as três principais vias de exposição que podem levar à toxicidade humana, ou seja, os compartimentos ar, água e solo. Estes três compartimentos se constituíram nos critérios de avaliação, onde foram utilizados como alternativas na ponderação de pares os três potenciais de toxicidade humana – impacto via ar (EP-hta), impacto via água (EP-htw) e impacto via solo (EP-hts) - de cada um dos dezessete resíduos e subprodutos gerados durante o processo de fabricaçao da indústria sucroenergética, calculados previamente.

Os valores calculados dos potenciais de toxicidade humana para cada resíduo/subproduto estão ilustrados na Tabela 8. Estes valores foram inseridos no software Mind Decider para a ponderação relativa $V_{(a)i}$ dos resíduos/subprodutos. A ponderação foi realizada para a junção dos resultados dos potenciais de toxicidade

humana, já previamente calculados, para alcançar uma única medida total do impacto ambiental do sistema estudado e assim interpretar e analisar os dados (WESTKÄMPER; ALTING; ARNDT, 2000; OLIVEIRA; CRISTOBAL; SAIZAR, 2016). Ou seja, foram ponderados entre si os impactos potenciais no ar, água e solo para obtenção como resultado final um valor relativo das alternativas e categorias elencadas para cálculo do impacto total do sistema estudado.

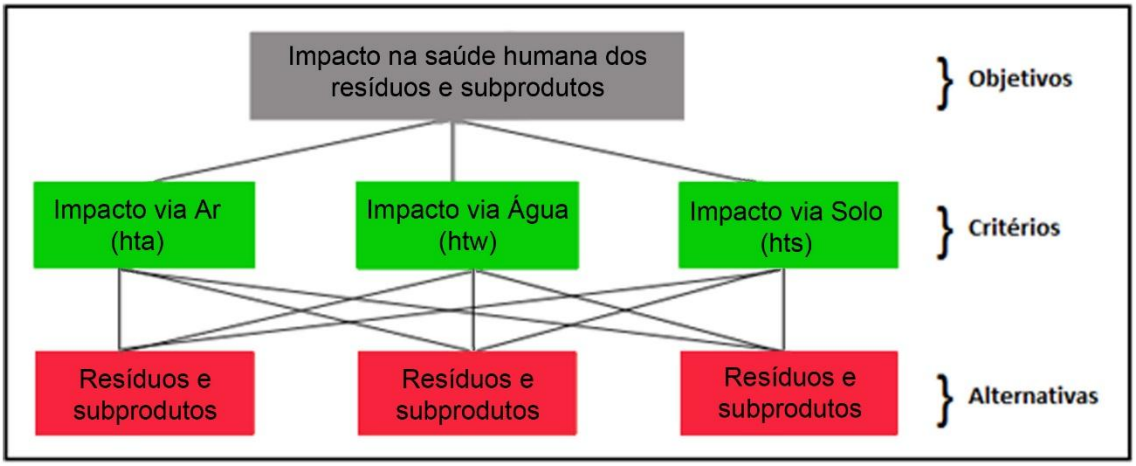

Figura 16 - Estrutura de analise hierárquica para ponderação dos resíduos e subprodutos gerados nos processos de fabricação sucroenergéticos

Fonte: Elaborado pelos autores

Desta forma, os dados referentes aos potenciais de toxicidade humana de cada resíduo/subproduto calculados pelo método EDIP 97 que foram, então, aplicados no software MindDecider resultaram no peso relativo de cada resíduo e subproduto ($V_{(a)i}$).

Ressalta-se que para o cáculo dos potenciais de toxicidade humana partiu-se do pressuposto que cada um deles teve exposição direta indevida (sem tratamento prévio) no ambiente nos compartimentos ar, água e solo. Para exemplificar, na comparação em pares dos resíduos vinhaça e melaço com relação aos impactos no solo, partiu-se da ideia de que ambos foram lançados diretamente no solo. Neste caso, a vinhaça apresentou uma proporção de 29,89:1, ou seja, dada à sua composição, a vinhaça é vinte e nove vezes mais impactante à saúde humana quando lançada no solo do que o melaço.

Resíduo/Subproduto	Potenciais de toxicidade humana		
	EP-hta (m^3 ar)	EP-htw (m^3 água)	EP-hts (m^3 solo)
Vinhaça	5,00E+12	8,23E+10	3,01E+10
Pilhas e baterias	0	0	8,53E+07
Óleos lubrificantes da fábrica	0	0	7,37E+05
Lâmpadas queimadas	1,40E+11	2,35E+09	1,81E+07
Melaço	0	0	8,43E+09
Óleo fúsel	0	0	3,90E+05
Resíduos dos laboratórios	0	1,12E+07	0
Sucatas metálicas	0	0	1,19E+09
Efluente da lavagem dornas	0	0	6,01E+09
Efluente da lavagem pisos equipamentos	0	0	8,76E+05
Torta de filtro	0	0	2,06E+11
Levedura	0	0	2,82E+08
Cinzas da queima do bagaço	1,60E+16	2,75E+10	3,56E+10
Gases provenientes da queima do bagaço	0	0	0
Efluente gasoso das dornas de fermentação	0	0	0
Efluente tratamento dos gases combustão	3,90E+12	2,02E+05	1,62E+07
Flegmaça	0	0	2,43E+07
Total	**1,60E+16**	**1,12E+11**	**2,88E+11**

Tabela 8 - Potenciais de Toxicidade Humana para os resíduos e subprodutos da indústria sucroenergética

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 9 apresenta, em ordem crescente, os valores de $V_{(a)i}$, resultantes da ponderação feita através do software Mind Decider, de cada um dos dezessete resíduos/subprodutos estudado. Pelos resultados apresentados é possível observar que os resíduos com maior peso relativo são vinhaça (35,57%), torta de filtro (29,15%), cinzas da queima do bagaço (27,38%), gases provenientes da queima do bagaço (4,73%), melaço (1,19%), lâmpadas queimadas (0,89%), efluente de lavagem das dornas (0,85%), sucatas metálicas (0,47%), levedura (0,04%) e pilhas e baterias (0,01%). Quanto ao efluente gasoso das dornas, este apresentou $V_{(a)i}$ igual a zero pelo fato deste resíduo ser composto basicamente pelo gás CO_2 que, apesar contribuir para o aquecimento global, este gás não apresenta toxicidade ao ser humano (FILZPATRICK e DOOLEY, 2017).

Resíduos / Subprodutos	$V_{(a)i}$ (%)
Efluente gasoso das dornas	0,00
Óleos Lubrificantes da fábrica	0,0001
Óleo Fúsel	0,0001
Efluente lavagem dos pisos e equipamentos	0,0001
Flegmaça	0,0034
Resíduos dos Laboratórios	0,0043
Efluente tratamento dos gases de combustão	0,0053
Pilhas e Baterias	0,01
Levedura	0,04
Sucatas Metálicas	0,17
Efluente lavagem das dornas	0,85
Lâmpadas queimadas	0,89
Melaço	1,19
Gases provenientes da queima do bagaço	4,73
Cinzas da queima do bagaço	27,38
Torta de filtro	29,15
Vinhaça	35,57

Tabela 9 - Peso relativo do potencial de toxicidade humana de cada resíduo/subproduto

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 17 apresenta o gráfico de resultados, em que temos a razão [$R_{(a)i}$] de cada resíduo e subproduto. Tais relações são determinadas com base no maior resultado ponderado do potencial de toxicidade humana. Nota-se que a vinhaça apresenta o maior $R_{a(i)}$ (100%), sendo considerada como o resíduo com maior impacto à saúde humana, seguido por torta de filtro com 81,95 e cinzas da queima do bagaço com 76,97%.

Com os dados referentes ao peso relativo dos residuos/subprodutos, foi possivel mensurar de forma agregada o potencial de toxicidade humana para cada via de exposição ao ser humano, conforme apresentado na Figura 18. Verifcou-se que através da via de exposição água têm-se o maior potencial de impacto à saúde humana com 40,63%, seguido por impacto via solo com 33,45% e impacto via ar com 25,92%.

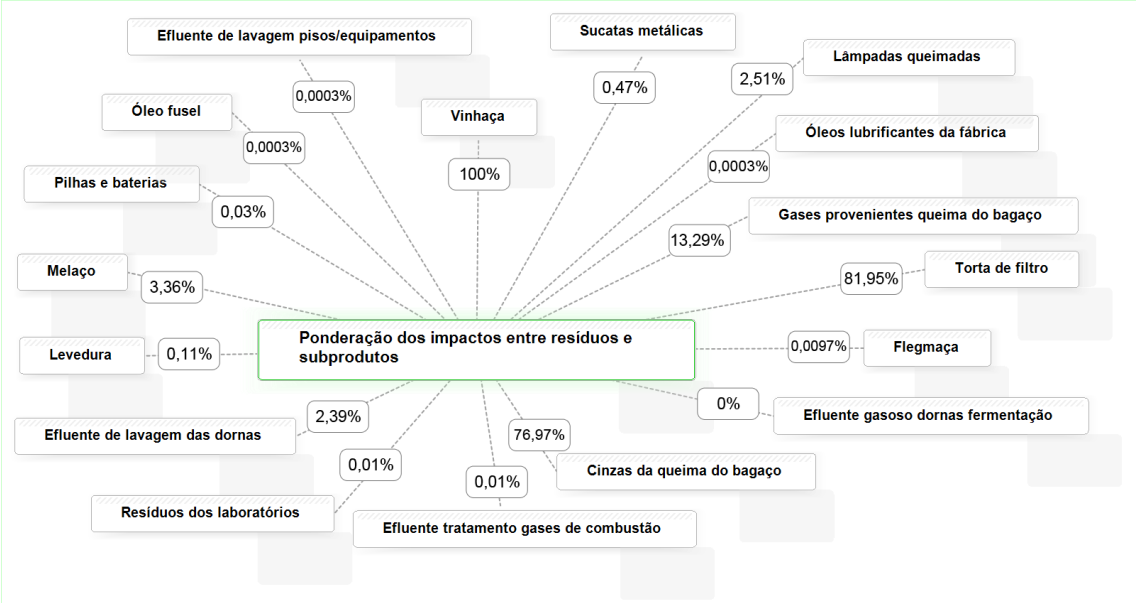

Figura 17 - $R_{a(i)}$ Razão dos 17 resíduos/produtos da indústria sucroenergética
Fonte: elaborado pelo autor

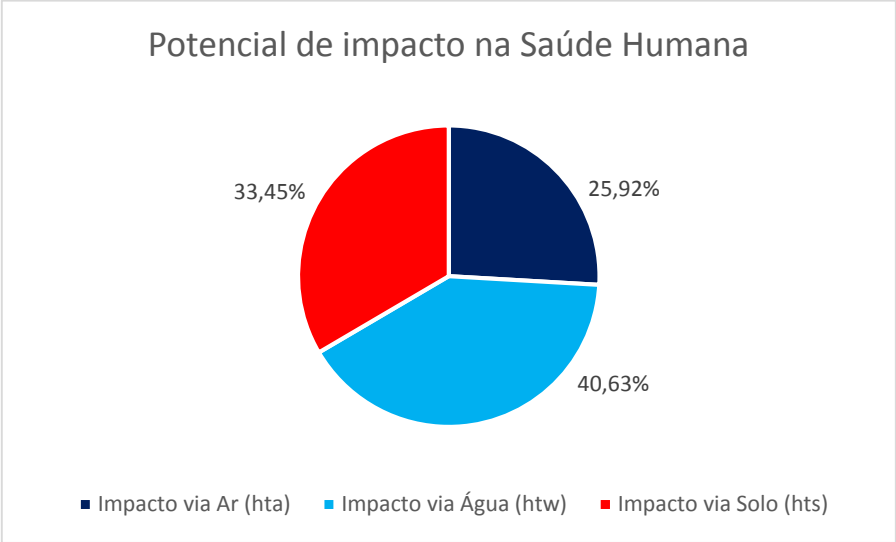

Figura 18 - Gráfico do potencial de impacto na saúde humana dos resíduos e subprodutos gerados nos processos de fabricação sucroenergéticos
Fonte: elaborado pelo autor

Os próximos passos consistiram, para cada resíduo/subproduto, nos seguintes cálculos: i) quantidade relativa (Qi), calculada a partir da quantidade absoluta (bi) dos resíduos/subprodutos no processo de fabricação estudado de cada empresa, como apresenta a Tabela 10; e ii) cobertura geográfica relativa (Ai). Por fim, foi identificada a destinação final de cada resíduo e subproduto efetuada pelas empresas estudadas.

Resíduos/subprodutos	Empresa A	Empresa B	Empresa C
	Quantidade absoluta (b_i) (Ton./Ano)	Quantidade absoluta (b_i) (Ton./Ano)	Quantidade absoluta (b_i) (Ton./Ano)
Efluente da lavagem pisos equipamentos	180.277	67.222	130.000
Óleo fúsel	270	99	189
Óleos lubrificantes da fábrica	24	10	17,5
Efluente tratamento dos gases combustão	35.767	13.600	25.900
Resíduos dos laboratórios	2	1	1,5
Pilhas e baterias	8	6	7
Flegmaça	241.000	92.000	175.000
Sucatas metálicas	2	1,5	2
Lâmpadas queimadas	3	2	2,5
Efluente gasoso das dornas de fermentação	15.400	18.300	35.000
Melaço	130.000	60.000	94.000
Levedura	87.000	35.000	63.000
Efluente da lavagem dornas	80.500	35.000	64.200
Gases provenientes da queima do bagaço	741.000	281.111	536.000
Cinzas da queima do bagaço	94.000	36.000	67.000
Torta de filtro	150.000	50.000	94.000
Vinhaça	2.200.000	800.000	1.460.000
Total Resíduo/subproduto	**3.955.253**	**1.488.353**	**2.744.320**

Tabela 10 - Quantidade absoluta (b_i) dos resíduos/subprodutos no processo de fabricação estudado

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 11 apresenta a identificação dos resíduos e subprodutos, a destinação efetuada pela empresa A e a avaliação categórica de cada destinação (ki). Desta maneira, na avaliação categórica (ki) dos resíduos/subprodutos da empresa A atribuiu-se um valor igual a zero apenas para os gases provenientes da queima do bagaço e do efluente gasoso das dornas. Os demais resíduos e subprodutos apresentaram destinação consideradas ambientalmente adequadas.

A Tabela 12 apresenta a identificação dos resíduos e subprodutos, a destinação efetuada pela empresa B e a avaliação categórica de cada destinação (ki). Na avaliação categórica (ki) dos resíduos/subprodutos da empresa B atribuiu-se um valor igual a zero apenas para os gases provenientes da queima do bagaço, do efluente gasoso das dornas e efluente de lavagem das dornas. Os demais resíduos e subprodutos apresentaram destinação consideradas ambientalmente adequadas.

Resíduos / Subprodutos	Destinação da empresa	Ki
Vinhaça	Lavoura	1
Torta de filtro	Lavoura	1
Cinzas da queima do bagaço	Lavoura	1
Lâmpadas queimadas	Empresa licenciada	1
Gases provenientes da queima do bagaço	Emissões no Ar	0
Efluente gasoso das dornas	Emissões no Ar	0
Efluente lavagem das dornas	Lavoura	1
Sucatas Metálicas	Empresa licenciada	1
Levedura	Comercialização	1
Melaço	Lavoura	1
Pilhas e Baterias	Empresa licenciada	1
Efluente tratamento dos gases de combustão	Lavoura	1
Resíduos dos Laboratórios	Empresa licenciada	1
Flegmaça	Lavoura	1
Óleos Lubrificantes da fábrica	Empresa licenciada	1
Óleo Fúsel	Comercialização	1
Efluente lavagem dos pisos e equipamentos	Lavoura	1

Tabela 11 - Destinação e avaliação categórica dos resíduos/subprodutos da empresa A
Fonte: elaborado pelo autor

Resíduos / Subprodutos	Destinação da empresa	Ki
Vinhaça	Lavoura	1
Torta de filtro	Lavoura	1
Cinzas da queima do bagaço	Lavoura	1
Lâmpadas queimadas	Empresa licenciada	1
Gases provenientes da queima do bagaço	Emissões no Ar	0
Efluente gasoso das dornas	Emissões no Ar	0
Efluente lavagem das dornas	Águas superficiais	0
Sucatas Metálicas	Empresa licenciada	1
Levedura	Comercialização	1
Melaço	Lavoura	1
Pilhas e Baterias	Empresa licenciada	1
Efluente tratamento dos gases de combustão	Lavoura	1
Resíduos dos Laboratórios	Empresa licenciada	1
Flegmaça	Lavoura	1
Óleos Lubrificantes da fábrica	Empresa licenciada	1
Óleo Fúsel	Comercialização	1
Efluente lavagem dos pisos e equipamentos	Lavoura	1

Tabela 12 – Destinação e avaliação categórica dos resíduos/ subprodutos da empresa B
Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 13 apresenta a identificação dos resíduos e subprodutos, a destinação efetuada pela empresa C e a avaliação categórica de cada destinação (ki). Desta maneira, na avaliação categórica (ki) dos resíduos/subprodutos da empresa C atribuiu-se um valor igual a zero apenas para os gases provenientes da queima do bagaço, do efluente gasoso das dornas, efluente de lavagem das dornas e efluente da lavagem dos pisos e equipamentos. Os demais resíduos e subprodutos apresentaram destinação consideradas ambientalmente adequadas.

Resíduos / Subprodutos	Destinação da empresa	Ki
Vinhaça	Lavoura	1
Torta de filtro	Lavoura	1
Cinzas da queima do bagaço	Lavoura	1
Lâmpadas queimadas	Empresa licenciada	1
Gases provenientes da queima do bagaço	Emissões no Ar	0
Efluente gasoso das dornas	Emissões no Ar	0
Efluente lavagem das dornas	Águas superficiais	0
Sucatas Metálicas	Empresa licenciada	1
Levedura	Comercialização	1
Melaço	Lavoura	1
Pilhas e Baterias	Empresa licenciada	1
Efluente tratamento dos gases de combustão	Lavoura	1
Resíduos dos Laboratórios	Empresa licenciada	1
Flegmaça	Lavoura	1
Óleos Lubrificantes da fábrica	Empresa licenciada	1
Óleo Fúsel	Comercialização	1
Efluente lavagem dos pisos e equipamentos	Águas superficiais	0

Tabela 13 - Destinação e avaliação categórica dos resíduos/subprodutos da empresa C
Fonte: elaborado pelo autor

A partir destas definições foi possível o cálculo do potencial de toxicidade humana (I_{pth}) das empresa estudadas. Os resultados de $V_{(a)i}$, (b_i), (Q_i), (A_i), (k_i), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para cada resíduo e subproduto da empresa A são apresentados na Tabela 14.

Resíduos / subprodutos	Ponderação relativa (V(a)i) (%)	Quantidade absoluta (bi) (Ton/Ano)	Quantidade relativa (Qi) (%)	Cobertura geográfica Relativa (Ai) (%)	Avaliação categórica (Ki)	Ipth (%)	Participação no Ipth (%)
Efluente da lavagem pisos equipamentos	0,0001	180.277	4,55791	0,069	1	0,00002	0,00002
Óleo fúsel	0,0001	270	0,00683	0,069	1	0,00000	0,0000001
Óleos lubrificantes da fábrica	0,0001	24	0,00061	0,069	1	0,00000	0,0000001
Efluente tratamento dos gases combustão	0,0053	35.767	0,90429	0,034	1	0,00011	0,00012
Resíduos dos laboratórios	0,0043	2	0,00005	0,069	1	0,00000	0,0000001
Pilhas e baterias	0,01	8	0,00020	0,034	1	0,00000	0,0000005
Flegmaça	0,0034	241.000	6,09316	0,069	1	0,00094	0,00100
Sucatas metálicas	0,17	2	0,00005	0,034	1	0,00000	0,0000001
Lâmpadas queimadas	0,89	3	0,00008	0,034	1	0,00000	0,0000016
Efluente gasoso das dornas de fermentação	0	15.400	0,38936	0,103	0	0,00000	0,00000
Melaço	1,19	130.000	3,28677	0,069	1	0,17739	0,18877
Levedura	0,04	87.000	2,19961	0,034	1	0,00200	0,00212
Efluente da lavagem dornas	0,85	80.500	2,03527	0,069	1	0,07846	0,08349
Gases provenientes da queima do bagaço	4,73	741.000	18,73458	0,103	0	0,00000	0,00000
Cinzas da queima do bagaço	27,38	94.000	2,37659	0,034	1	1,47558	1,57024
Torta de filtro	29,15	150.000	3,79242	0,034	1	2,50687	2,66769
Vinhaça	35,57	2.200.000	55,62223	0,069	1	89,73022	95,48654
TOTAL	100,00	3.955.253	100,00	1,000	**Ipth =**	**93,97159%**	100,00

Tabela 14 - Resultados de $V_{(a)i}$, (bi), (Qi), (Ai), (ki), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para a empresa A

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados de $V_{(a)i}$, (b_i), (Q_i), (A_i), (k_i), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para cada resíduo e subproduto da empresa B são apresentados na Tabela 15.

Resíduos / subprodutos	Ponderação relativa (V(a)i) (%)	Quantidade absoluta (bi) (Ton/Ano)	Quantidade relativa (Qi) (%)	Cobertura geográfica Relativa (Ai) (%)	Avaliação categórica (Ki)	Ipth (%)	Participação no Ipth (%)
Efluente da lavagem pisos equipamentos	0,0001	67.222	4,51654	0,069	1	0,00002	0,00002
Óleo fúsel	0,0001	99	0,00665	0,069	1	0,00000	0,0000003
Óleos lubrificantes da fábrica	0,0001	10	0,00067	0,069	1	0,00000	0,0000003
Efluente tratamento dos gases combustão	0,0053	13.600	0,91376	0,034	1	0,00011	0,00012
Resíduos dos laboratórios	0,0043	1	0,00007	0,069	1	0,00000	0,0000001
Pilhas e baterias	0,01	6	0,00040	0,034	1	0,00000	0,0000001
Flegmaça	0,0034	92.000	6,18133	0,069	1	0,00098	0,00105
Sucatas metálicas	0,17	1,5	0,00010	0,034	1	0,00000	0,0000004
Lâmpadas queimadas	0,89	2	0,00013	0,034	1	0,00000	0,0000029
Efluente gasoso das dornas de fermentação	0	18.300	0,38936	0,103	0	0,00000	0,00000
Melaço	1,19	60.000	4,0313	0,069	1	0,22471	0,23999
Levedura	0,04	35.000	2,35159	0,034	1	0,00220	0,002352
Efluente da lavagem dornas	0,85	35.000	2,35159	0,069	0	0,00000	0,00000
Gases provenientes da queima do bagaço	4,73	281.111	18,88739	0,103	0	0,00000	0,00000
Cinzas da queima do bagaço	27,38	36.000	2,41878	0,034	1	1,55107	1,656602
Torta de filtro	29,15	50.000	3,35942	0,034	1	2,29352	2,44957
Vinhaça	35,57	800.000	53,75071	0,069	1	89,55671	95,65027
TOTAL	100,00	1.488.353	100,00	1,000	**Ipth =**	**93,62934%**	100,00

Tabela 15 - Resultados de $V_{(a)i}$, (bi), (Qi), (Ai), (ki), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para a empresa B

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados de $V_{(a)i}$, (b_i), (Q_i), (A_i), (k_i), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para cada resíduo e subproduto da empresa C são apresentados na Tabela 16.

Resíduos / subprodutos	Ponderação relativa (V(a)i) (%)	Quantidade absoluta (bi) (Ton/Ano)	Quantidade relativa (Qi) (%)	Cobertura geográfica Relativa (Ai) (%)	Avaliação categórica (Ki)	Ipth (%)	Participação no Ipth (%)
Efluente da lavagem pisos equipamentos	0,0001	130.000	4,73706	0,069	0	0,00000	0,00000
Óleo fúsel	0,0001	189	0,00689	0,069	1	0,00000	0,00000035
Óleos lubrificantes da fábrica	0,0001	17,5	0,00064	0,069	1	0,00000	0,0000003
Efluente tratamento dos gases combustão	0,0053	25.900	0,94377	0,034	1	0,000118	0,0001263
Resíduos dos laboratórios	0,0043	1,5	0,00005	0,069	1	0,00000	0,00000012
Pilhas e baterias	0,01	7	0,00026	0,034	1	0,00000	0,00000064
Flegmaça	0,0034	175.000	6,37681	0,069	1	0,00102	0,001095
Sucatas metálicas	0,17	2	0,00007	0,034	1	0,00000	0,00000313
Lâmpadas queimadas	0,89	2,5	0,00009	0,034	1	0,00000	0,000002048
Efluente gasoso das dornas de fermentação	0	35.000	1,27536	0,103	0	0,00000	0,00000
Melaço	1,19	94.000	3,42526	0,069	1	0,19223	0,205877
Levedura	0,04	63.000	2,29565	0,034	1	0,00217	0,0023190
Efluente da lavagem dornas	0,85	64.200	2,33938	0,069	0	0,00000	0,0000
Gases provenientes da queima do bagaço	4,73	536.000	19,53125	0,103	0	0,00000	0,00000
Cinzas da queima do bagaço	27,38	67.000	2,44141	0,034	1	1,57625	1,68815
Torta de filtro	29,15	94.000	3,42526	0,034	1	2,35441	2,52156
Vinhaça	35,57	1.460.000	53,20080	0,069	1	89,24474	95,58085
TOTAL	100,00	2.744.320	100,00	1,000	**Ipth =**	**93,37094%**	100,00

Tabela 16 - Resultados de $V_{(a)i}$, (bi), (Qi), (Ai), (ki), I_{pth} e percentual de participação no I_{pth} geral para a empresa C

Fonte: elaborado pelo autor

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentadas as discussões acerca dos resultados demonstrados na seção 6 e as contribuições gerenciais da presente dissertação.

Verifica-se que para a empresa A, apresentada na Tabela 14, a vinhaça é o subproduto com maior $V_{(a)i}$ ($V_{(a)i}$ =35,57%) e que a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 55,62% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos. Além disso, apresenta uma participação relativa de 95,48% no I_{pth} final da empresa A. Já para a empresa B, apresentada na Tabela 15, a vinhaça apresenta $V_{(a)i}$ ($V_{(a)i}$ =35,57%) e que a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 53,75% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos. Apresenta uma participação relativa de 95,65% no I_{pth} final da empresa B. Para a empresa C, apresentada na Tabela 16, a vinhaça obteve o maior $V_{(a)i}$ ($V_{(a)i}$ =35,57%) e sua quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 53,20% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos. A participação relativa é de 95,58% no I_{pth} final da empresa C.

Dessa forma, a vinhaça apresentou maior potencial de toxicidade humana e maior participação relativa na formação do I_{pth} para as 3 empresas estudadas. Tal fato se justifica devido à quantidade de vinhaça gerada ser de aproximadamente 14 litros para cada litro de etanol produzido. Além disso, a vinhaça apresenta alto potencial de toxicidade humana na medida em que contém mercúrio (Hg) e metais que podem apresentar características cancerígenas, mutagênicas ou teratogênicas (BRAGA et al., 2005). No entanto, após preparação adequada, a destinação final da vinhaça como adubo na lavoura é considerada adequada já que este subproduto apresenta em sua composição o potássio (K), um nutriente necessário à adubação da cana-de-açúcar (GURGEL et al., 2015). A vinhaça é o subproduto com mais potencial contaminante gerado pelas empresas estudadas, fato este que entre em concordância com os estudos cientificos acerca do tema, em que apontam a vinhaça como maior alvo de criticas da produção sucroenergetica.

O segundo resíduo com maior peso relativo $V_{(a)i}$ para as 3 empresas estudadas é a torta de filtro ($V_{(a)i}$ = 29,15%). Verifica-se que para a empresa A,

apresentada na Tabela 14, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 3,79% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 2,66% de participação da formação do I_{pth} total. Já para a empresa B, apresentada na Tabela 15, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 3,35% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 2,44% de participação da formação do I_{pth} total. Para a empresa C, apresentada na Tabela 16, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 3,42% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 2,52% de participação da formação do I_{pth} total.

A torta de filtro possui em sua composição metais como chumbo, mercúrio, níquel, zinco e cádmio. De acordo com MARTINELLI et al. (2014), no caso do níquel e do cádmio, pode ocorrer a bioacumulação em animais e plantas. Já o cádmio apresenta alta toxicidade humana podendo causar hipertensão, enfisema, atrofia muscular, alterações cognitivas entre outras (FERNANDES e MAINIER, 2014). No entanto, a torta de filtro é rica em fósforo e matéria orgânica e, após tratamento e complementação com nutrientes, resulta num composto que pode ser usado no plantio da cana de forma a substituir a utilização de fertilizantes minerais. Neste sentido, após sua preparação, sua utilização na adubação leva ao uso de menor quantidade de adubos, sendo esta destinação considerada adequada (GURGEL et al., 2015).

O terceiro resíduo com maior peso relativo ($V_{(a)i}$ = 27,38%), comum para as 3 empresas estudadas, são as cinzas de queima do bagaço. Verifica-se que para a empresa A, apresentada na Tabela 14, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 2,37% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 1,57% de participação da formação do I_{pth} total. Já para a empresa B, apresentada na Tabela 15, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 2,41% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 1,65% de participação da formação do I_{pth} total. Para a empresa C, apresentada na Tabela 16, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 2,44% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 1,68% de participação da formação do I_{pth} total.

As cinzas de queima do bagaço possuem elementos químicos que podem apresentar funções biológicas como o cromo e outros elementos como o mercúrio e chumbo que podem apresentar toxicidade humana impactando no sistema nervoso central e, ainda, outros elementos como cadmio e cobre que podem afetar rins e fígado (JÄRUP e AKESSON, 2009; JARIC et al., 2011). Porém, após preparação adequada, são enviadas à lavoura, onde atuam como fertilizantes no cultivo da cana (REIN, 2017). Assim, sua destinação final foi considerada adequada na empresa estudada.

O quarto resíduo com maior peso relativo ($V_{(a)i}$ = 4,73%), para as 3 empresas estudadas, foram os gases provenientes da queima do bagaço. Verifica-se que para a empresa A, apresentada na Tabela 14, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 18,73% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 0% de participação da formação do I_{pth} total. Já para a empresa B, apresentada na Tabela 15, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 18,88% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 0% de participação da formação do I_{pth} total. Para a empresa C, apresentada na Tabela 16, a quantidade relativa (Qi) produzida corresponde a aproximadamente 19,53% da quantidade absoluta de resíduos e subprodutos e que apresenta 0% de participação da formação do I_{pth} total.

O resíduo gases provenientes da queima do bagaço é formado por CO, CO_2 e NO_x, sendo que este último apresenta potencial de impacto à saúde humana, podendo afetar o sistema respiratório (MASSUM et al., 2013). Já o gás CO_2 que, apesar contribuir para o aquecimento global, este gás não apresenta toxicidade ao ser humano (FILZPATRICK e DOOLEY, 2017). A despeito disto, a empresa estudada libera estes gases diretamente no ambiente, sem realização de tratamento prévio. Esta destinação foi considerada inadequada, dessa forma foi atribuido k_i = 0. Com a destinação inadequada, o residuo gases provenientes da queima do bagaço não contribui para a formação do I_{pth} final das empresas estudadas.

Desta maneira, os quatro resíduos anteriormente citados (vinhaça, torta de filtro, cinzas da queima do bagaço e gases provenientes da queima do bagaço) são responsáveis por 96,83% dos pesos relativos do potencial de toxicidade humana dos resíduos/subprodutos da produção sucroenergética. Cabe ressaltar que o chamado

efluente gasoso das dornas de fermentação apresentou $V_{(a)i}$ igual a zero para as 3 empresas estudadas, não afetando, portanto, o cáculo do I_{pth}. Isto porque, dada à sua composição, esta emissão gasosa, a despeito de contribuir para o aquecimento global, não apresenta elementos tóxicos à saúde humana (FILZPATRICK e DOOLEY, 2017).

Ressalta-se ainda que a empresa A apresentou apenas dois residuos com destinação consideradas ambientalmente inadequadas: efluente gasoso das dornas de fermentação e gases provenientes da queima do bagaço. Tal atribuição se deve ao fato da empresa emitir estes residuos diretamente no ar, prática que apesar de ser legalmente aceita pela legislação brasileira, não é considerada adequada. Já a empresa B apresentou três residuos com destinação inadequada: efluente gasos das dornas de fermentação, gases provenientes da queima do bagaço e efluente de lavagem das dornas. A empresa B lança o efluente de lavagem das dornas diretamente em águas superficiais, em que apesar de apresentar baixo peso relativo ($V_{(a)i}$ = 0,85%), apresentando assim baixo potencial de toxicidade humana, é uma pratica considerada inadequada. A empresa C apresentou quatro residuos com destinação inadequada: efluente gasoso das dornas de fermentação, gases provenientes da queima do bagaço, efluente de lavagem das dornas e efluente de lavagem dos pisos e equipamentos. A empresa C lança os residuos efluente de lavagem das dornas e efluente de lavagem dos pisos e equipamentos diretamente em águas superficiais, em que apesar de apresentarem baixo peso relativo ($V_{(a)i}$ = 0,85% e $V_{(a)i}$ = 0,0001%, respectivamente), apresentando ambos resíduos baixo potencial de toxicidade humana, é uma pratica considerada inadequada.

Pela análise dos resultados apresentados nas Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 é possível verificar que os demais resíduos/subprodutos gerados pelas empresas da indústria sucroenergética estudadas apresentam pequena participação no peso relativo ($V_{(a)i}$) e possuem pequena participação na formação I_{pth} final.

No entanto, destaca-se alguns resíduos como o melaço ($V_{(a)i}$ = 1,19%), a levedura ($V_{(a)i}$ = 0,04%), os efluentes de lavagem das dornas ($V_{(a)i}$ = 0,85%), as lâmpadas queimadas ($V_{(a)i}$ = 0,89%) e pilhas e baterias ($V_{(a)i}$ = 0,01%), que são potenciais poluidores se destinados de forma inadequada. Seu potencial de risco à saúde humana reside no teor de mercúrio (Hg), que além de ter a capacidade de se

espalhar por todo o ambiente é altamente tóxico à saúde humana (DURÃO JUNIOR, 2008), podendo causar quebra de processos metabólicos do cérebro causando perda de memória e sintomas psicopatológicos como medo, insônia e irritabilidade (LENZI et al., 2009).

De posse dos resultados apresentados, foi realizado, então, o cálculo do Índice de Potencial de Toxicidade Humana (I_{pth}) para as empresas estudadas, chegando-se aos resultados: i) a empresa A apresentou I_{pth} de 93,97%, o que significa que 93,97% dos resíduos e subprodutos gerados por esta empresa apresentam destinação ambiental adequada sob a ótica do potencial de toxicidade humana, ii) a empresa B apresentou I_{pth} de 93,62%, o que significa que 93,62% dos resíduos e subprodutos gerados por esta empresa apresentam destinação ambiental adequada sob a ótica do potencial de toxicidade humana e, iii) a empresa C apresentou I_{pth} de 93,37%, o que significa que 93,37% dos resíduos e subprodutos gerados por esta empresa apresentam destinação ambiental adequada sob a ótica do potencial de toxicidade humana.

Apesar das empresas estudadas apresentarem diferentes residuos com destinação considerada ambientalmente inadequadas, há uma proximidade no Índice de Potencial de Toxicidade Humana (I_{pth}). Tal fato se justifica pois as 3 empresas estudadas apresentam uma destinação considerada adequada para a vinhaça, que é o subproduto com maior contribuição na formação do I_{pth}. A participação relativa na formação do I_{pth} para a empresa A é de 89,73%, para a empresa B é de 89,55% e para a empresa C é de 89,24%.

6.1 Contribuições Gerenciais

O Índice de Potencial de Toxicidade Humana - I_{pth} - foi desenvolvido para representar, em valor percentual, a adequação da destinação dos resíduos e subprodutos gerados nas atividades de fabricação sucroenergética.

Salienta-se que a empresa A apresentou apenas dois residuos com destinação consideradas ambientalmente inadequadas: efluente gasoso das dornas de fermentação e gases provenientes da queima do bagaço. Já a empresa B apresentou três residuos com destinação considerada inadequada: efluente gasos das dornas de

fermentação, gases provenientes da queima do bagaço e efluente de lavagem das dornas. A empresa C apresentou quatro residuos com destinação inadequada: efluente gasoso das dornas de fermentação, gases provenientes da queima do bagaço, efluente de lavagem das dornas e efluente de lavagem dos pisos e equipamentos.

Em etapas do desenvolvimento do índice I_{pth}, permitiu-se identificar os pesos relativos dos resíduos com destinação inadequada, quer sejam: efluente gasoso das dornas de fermentação ($V_{(a)i}$ = 0%), efluente de lavagem dos pisos e equipamentos ($V_{(a)i}$ = 0,0001%), efluente de lavagem das dornas ($V_{(a)i}$ = 0,85%) e gases provenientes da queima do bagaço (V(a)i = 4,73%).

Os resultados desta pesquisa trazem uma nova perspectiva para a gestão ambiental de industrias sucroenergéticas. A aplicação do índice I_{pth} em empresas da indústria sucroenergética, evidencia ser uma ferramenta adequada para a avaliação do desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana, tendo em vista que seus resultados permitem aos gestores das empresas tomarem medidas corretivas em seus processos de fabricação e, assim, melhorarem o seu desempenho ambiental.

A implantação de uma avaliação de desempenho ambiental em uma industria sucroenergetica promove uma melhor consistência na administração das questões ambientais mediante previsão, priorização e melhor distribuição de recursos, atribuindo responsabilidades e avaliação de suas atividades em um processo contínuo (VILAÇA, 2012).

Além disso, a metodologia aplicada nesta pesquisa pode ser empregada em qualquer industria do setor sucroenergetico, o que permite uma comparação entre as práticas de desempenho ambiental por elas aplicadas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como finalidade realizar um estudo multicasos sobre avaliação de desempenho ambiental, com base no potencial de toxicidade humana, em 3 empresas da indústria sucroenergética brasileira. Para alcançar tal finalidade, foi desenvolvido um Índice de Potencial de Toxicidade Humana - I_{pth} - que apresenta, em valor percentual, a adequação da destinação dos resíduos e subprodutos gerados nas atividades de fabricação da industria sucroenergética.

O método desenvolvido apoia-se na relação em que na medida que a empresa aumentar os esforços de gestão ambiental melhor será a classificação de eficiência da adequação ambiental das destinações dadas aos resíduos e subprodutos gerados no processo produtivo.

O índice I_{pth} foi formulado pela combinação das seguintes variáveis: i) ponderação relativa do potencial de toxicidade humana de cada resíduo/subproduto gerado no processo de fabricação sucroenergético; ii) a quantidade relativa de cada resíduo/subproduto que foi gerada na empresa estudada no período correspondente à safra de 2015/2016; iii) cobertura geográfica relativa que cada resíduo/subproduto pode alcançar; e iv) avaliação de adequação da destinação final de cada resíduo/subproduto praticada pela empresa.

A ponderação do impacto relativo à toxicidade humana dos resíduos e subprodutos gerados no processo da fabricação sucroenergética mostrou se tratar de uma questão complexa, uma vez que os resíduos/subprodutos possuem significativas diferenças em sua composição tanto física quanto química, apresentando, portanto, distintos efeitos nocivos à saúde humana em caso de contato humano com estes resíduos via compatimentos ar, água ou solo. Desta maneira, uma análise agregada destes materiais revelou que o impacto à saúde humana dos mesmos se dá na seguinte ordem: via compartimento água (40,63%), via compartimento solo (33,45%) e via compartimento ar (25,92%).

Em uma análise mais pontual dos pesos realtivos do potencial de impacto à saúde humana - ($V_{(a)i}$) - dos resíduos/subprodutos analisados, tem-se: vinhaça (35,57%), torta de filtro (29,15%), cinzas da queima do bagaço (27,38%), gases provenientes da queima do bagaço (4,73%), melaço (1,19%), lâmpadas queimadas (0,89%), efluente de lavagem das dornas (0,85%), sucatas metálicas (0,17%) e

levedura (0,04%). Assim, quatro dos desessete resíduos/subprodutos estudados representaram 96,83% dos pesos relativos do potencial de toxicidade humana da produção sucroenergética.

Referente à destinação dos resíduos/subprodutos pelas empresas estudadas, apenas quatro resíduos apresentaram destinação ambientalmente inadequadas: os gases provenientes da queima do bagaço (para as empresas A, B e C), o efluente gasoso das dornas de fermentação (para as empresas A, B e C), efluente de lavagem das dornas (para as empresas B e C) e efluente de lavagem dos pisos e equipamentos (para a empresa C).

Com isso, a empresa A obteve um índice I_{pth} de 93,97%, o que significa que 93,97% dos resíduos e subprodutos possuem destinação considerada ambientalmente adequada sob a ótica do potencial de toxicidade humana. A empresa B apresentou um I_{pth} de 93,62%, o que significa que 93,62% dos resíduos e subprodutos gerados por esta empresa apresentam destinação ambiental adequada. A empresa C apresentou um I_{pth} de 93,37%, o que significa que 93,37% dos resíduos e subprodutos gerados por esta empresa apresentam destinação ambiental adequada. Somente 6,03% para a empresa A, 6,38% para a empresa B e 6,63% para a empresa C obteram destinação inadequada. Ressalta-se que o efluente gasoso das dornas de fermentação, apesar da destinação inadequada apontada pela pesquisa, não interfere no cálculo do I_{pth} por apresentarem $V_{(a)i}$ igual a zero.

Dentre as contribuições deste trabalho, está o levantamento das principais características do processo produtivo sucroenergético e os potenciais de toxicidade humana dos resíduos e subprodutos gerados. Além disso, foi possível a criação de um índice para o cálculo do potencial de toxicidade humana exclusivo para a avaliação do desempenho ambiental de empresas da indústria sucroenergética. Este índice pode ser utilizado tanto para o levantamento pontual quanto para o acompanhamento do desempenho ambiental no que tange à toxicidade humana de uma empresa ao longo do tempo. Além disso, o I_{pth} pode ser utilizado para a comparação entre as práticas de destinação de resíduos/subprodutos entre empresas da indústria sucroenergética distintas.

Com o estudo também foi possível apontar os principais resíduos/subprodutos gerados pela indústria sucroenergética. A identificação dos resíduos/subprodutos geradores de impacto à saúde humana na fabricação de etanol e açúcar promove

uma busca por soluções que torne a sua fabricação mais viável sob os pontos de vista econômico e ambiental. Essa otimização da produção sucroenergética torna-se um imenso desafio para as industrias, dada a grande quantidade de resíduos/subprodutos gerados. Dessa forma, o I_{pth} mostrou ser uma uma ferramenta adequada para a avaliação do desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana.

Esse conceito é um ponto crucial para o bom desenvolvimento dos negócios e da sociedade, sendo que é inviável progredir em um ambiente deteriorado. Além disso, também contribui para a eficiência operacional da industria e redução dos custos de produção, promovendo também uma melhora da imagem da empresa perante seus stakeholders.

7.1 Limitações do Trabalho e Trabalhos futuros

Verifica-se com o presente estudo a existência de uma lacuna de métodos de avaliação de desempenho ambiental originados no Brasil e na América Latina, o que acarreta na ausência de procedimentos específicos ao contexto brasileiro e sul-americano. Dessa forma, identifica-se uma oportunidade para pesquisas nessa área do conhecimento e para a participação de especialistas brasileiros em projetos de alcance global na temática da avaliação do desempenho ambiental com base no potencial de toxicidade humana.

Destaca-se como limitação de ordem prática a mensuração dos aspectos ambientais em industrias sucroenergéticas, tal fato é justificado pela dificuldade da medição dos resíduos/subprodutos e pela falta de preparo e disponibilidade dos gestores das empresas. Além disso, conforme discutido em seções anteriores, o setor sucroenergético é alvo de críticas e inquietações acerca do impacto de suas atividades produtivas.

O indicador I_{pth} proposto foi estabelecido para a indústria sucroenergética trazendo originalidade ao presente estudo. Contudo, apresenta como limitação o fato não pode ser usado para outros setores industriais, mas abre espaço para que este indicador seja estudado e desenvolvido para outros setores.

Ressalta-se também a importância de se estabelecer modelos que caracterizem com maior tenacidade métodos padronizados para ADA, tendo em vista

que não há um consenso na literatura sobre esses métodos bem como há uma carência de estudos específicos para este tipo análise.

Dada a relevancia do tema, a avaliação do desempenho ambiental do setor sucroenergético, com base nos potenciais de toxicidade humana, pode ser ampliada para posteriores estudos abrangendo desde os processos preliminares (plantio, colheita e transporte) até a distribuição final dos produtos (etanol e açucar).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14031:2004. Gestão ambiental – avaliação de desempenho ambiental – diretrizes**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), p. 38, 2004.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14031 - Gestão ambiental – avaliação de desempenho ambiental – diretrizes**. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro, p. 38. 2015.

ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de Fabricação do açúcar**. 3 ed. Recife: Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

ALMEIDA, T. S. M.; SELLITTO, M. A. Avaliação do desempenho ambiental de uma Avaliação do desempenho ambiental de uma. **Produção**, jul/set 2013. p. 625-636.

ANA. Manual de conservação e reuso da água na agroindústria sucroenergética. Agência Nacional das Águas – FIESP – ÚNICA- **ANA CTC** – Brasília, 2009. Disponível em: <*www.fiesp.com.br/ambiente/downloads/publicaguab.pdf*> Acesso em: 13 abr 2016.

ANDRIETTA, M.; ANDRIETTA SR; STUPIELLO, E. **Bioethanol what has Brazil learned about yeasts inhabiting the ethanol production processes from sugar cane?** p. 67–84, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

BARE, J. C., NORRIS, G. A., PENNINGTON, D. W. e McKONE, T. E. TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. **Journal of Industrial Ecology**, 6(3), 49-78, 2003.

BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J.G.L., MIERZWA, J.C., BARROS, M.T.L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N. e EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.

BOTHA, T.; BLOTTNITZ, H. A comparison of the environmental benefits of bagasse derived eletricity and fuel etanol on a life-cycle basis. **Energy Policy**, 2006.

BUENO, P C; RODRIGUES, J C; LEMOS, A F, Exposição humana a mercúrio: subsídios para o fortalecimento das ações de vigilância em saúde. **Caderno Saúde Coletiva**, 2011.

CAMPOS, L. M. S. **SGADA - Sistema de Gestão e avaliação de desempenho ambiental: uma proposta de implementação**. 2001. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

CAMPOS, L.M.S., MELO, D.A. “Indicadores de desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): Uma pesquisa teórica”, **Revista Produção**, Vol. 18 No. 3, pp. 540-555, 2008.

CASTILLO-VERGARA, M. et al. Implementation of a Cleaner Production Agreement and impact analysis in the grape brandy (pisco) industry in Chile. **Journal of Cleaner Production**, junho 2015. p. 110-117.

CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. Biomass power generation: sugarcane bagasse and trash. **COPERSUCAR**. 2005 Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br/site/images/downloads/biomassa.pdf>, Acesso em: 30 janeiro 2017.

CETESB. A Produção Mais Limpa no Setor Sucroalcooleiro: Informações Gerais. **CETESB**/2002. Disponível em: < https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Adubacao_organica_producao_mais_limpaID-37HFh1RpEg.pdf>. Acesso: 03 maio 2016.

CONAB “Acompanhamento da safra brasileira de cana de açúcar”, **Conab**, 2017 Disponível em: <http://www.conab.gov.br/boletim_cana_portugues_17-18.pdf> Acesso em: 5 Maio 2017.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. **Métodos de pesquisa em administração**. 10. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

CORAZZA, R. I. Gestão ambiental e mudanças da estrutura organizacional. **Revista de Administração de Empresas (RAE-eletrônica)** v.2, n.2, p. 1-23, 2003.

CULLEY, W.C. **Environmental and Quality Systems Integration**, Lewis Publishers, Boston, MA, 1998.

CUNHA, J. M. O. L. **Avaliação do Desempenho Ambiental de uma Cadeia de Abastecimento – Estudo de Caso de uma Indústria do Sector Automóvel**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de ResíduosUniversidade de Aveiro.

DA MATA **Açúcar e Álcool. Óleo fusel**. Valparaíso, SP, 2011. Disponível em: <http://www.damata.ind.br/p.php?ID=24&IDSessao=3> Acesso em: 11/10/2016.

DE SOUZA DIAS, M. O. et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35–51, 2015.

DELAI, I.; TAKAHASHI, S. Sustainability measurement system: a reference model proposal. **Social Responsibility Journal**, 7, n. 3, 2011. p. 438-471.

DELLA-BIANCA, B. E. et al. **What do we know about the yeast strains from the Brazilian fuel ethanol industry?** Applied Microbiology and Biotechnology, v. 97, n. 3, p. 979–991, 2013.

DEARWENT, S., MUMTAZ, M. M., GODFREY, G., SINKS, T. e FALK, H. "Health Effects of Hazardous Waste", **Annals of the New York Academy of Sciences**, Vol. 1066, pp. 439-448, 2006.

DIAS, R. **Gestão Ambiental: Responsabilidade Social e Sustentabilidade**. São Paulo: Editora Atlas, 2011.

DIAS-SARDINHA, I.; REIJNDERS, L. Environmental Performance Evaluation and Sustainability Performance Evaluation of Organizations: an Evolutionary Framework. **Eco-management and auditing**, 2001. p. 71-79.

DONAIRE, D. **Gestão Ambiental na Empresa**, Atlas, São Paulo, 1994.

DURÃO JUNIOR, W.A., CASTRO, C.A. e WINDMOLLER, C.C. "Mercury reduction studies to facilitate the thermal decontamination of phosphor powder residues from spent fluorescent lamps", **Waste Management**, Vol. 28 No. 11, pp. 2311-2319, 2008.

ELIA NETO, A; NAKAHODO, T. **Caracterização físico-química da vinhaça**. Relatório técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia COPERSUCAR, Piracicaba, 1995.

EPELBAUM, M. Sistemas de gestão ambiental. In: VILELA JÚNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental:** desafio e perspectivas para as. 3. ed. ed. São Paulo: Editora Senac, 2013. p. 115-146.

ESCRIG-OLMEDO, E. et al. Measuring Corporate Environmental Performance: A Methodology for Sustainable Development. **Business Strategy and the Environment**, 2017. p. 142-162.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-açúcar**. 3 ed. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açúcareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB, 2011.

FERNANDES, L.H. e MAINIER, F.B. "Os riscos da exposição ocupacional ao cádmio", **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, Vol. 9 No. 2, pp. 194-199, 2014.

FIPA. Boletim informativo da Federação das Indústrias Portuguesas Agro-Alimentares. **Fipa**, 2007. Disponivel em: <www.fipa.pt/pdf/fipaflash95.pdf>. Acesso em: 10 jun 2017.

FITZPATRICK, J.J. e DOOLEY, P., “Holistic view of CO2 reduction potential from energy use by an individual processing company”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Process & Chemical Engineering, Ireland, 2017.

GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., SCHRYVER, A., STRUIJS, J. ReCiPe: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. **Ministerie van Volkshuisvesting**. (Report, 1), 2009.

GRI. Global Reporting Initiative (GRI). **Global Reporting Initiative (GRI)**, 2017. Disponivel em: <https://www.globalreporting.org/Information/about-gri/Pages/default.aspx>. Acesso em: 08 fev 2017.

GUINÉE, J. B. **Handbook on Life Cycle Assessment: operational guide to the ISO Standards**. Kluwer Academic Publishers, 2002.

GURGEL, M. N. A.; CORREA, S. T. R.; DOURADO NETO, D. e PAULA JUNIOR, D. R. Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado. **Eng. Agríc. [online].** 2015, vol.35, n.1, pp.63-75.

GÜNES, E. H., GÜNES , Y. e TAL1NL1, Y. “Toxicity evaluation of industrial and land base sources in a river basin”, **Desalination**, Vol.226, No. 2, pp. 348-356, 2008.

HARIZ, S.; BAHMED, L. "Assessment of environmental management system performance in the Algerian companies certified ISO 14001", **Management of Environmental Quality: An International Journal**, Vol. 24 Issue: 2, pp.228-243, 2013.

HAUSCHILD, M. Z., GOEDKOOP, M., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., JOLLIET, O., MARGNI, M., SCHRYVER, A., HUMBERT, S., LAURENT, A, SALA, S., PANT, R. (2012). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 18(3), 683-697.

HAUSCHILD, M. Z., e WENZEL, H. **Environmental assessment of products** (Vol. 2). United Kingdom: Chapman & Hall, Hingham: Kluwer Academic Publishers, 1998.

HENRI, J.; JOURNEAULT, M. Environmental performance indicators: An empirical study of Canadian manufacturing firms. **Journal of Environmental Management**, 2008. 165-176.

HERMANN, B.; KROEZE, C.; JAWJIT, W. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, 2007. p. 1787-1796.

HUIJBREGTS, M., HAUSCHILD, M., JOLLIET, O., MARGNI, M., McKONE, T., ROSENBAUM, R. K., E VAN de MEENT, D. **USEtoxTM User manual**, 2010.

HUNT, C.B. e AUSTER, E.R. “Proactive environmental management: avoiding the toxic trap”, **MIT Sloan Management Review**, Vol. 31 No. 2, pp. 7-18, 1990.

IMPACT World+. What is IMPACT World+?. **IMPACT World+** (2012). Disponível em: <http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php> Acesso em: 10 julho 2016.

INGARAMO, A.; HELUANE, H.; COLOMBO, M.; CESCA, M. Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, ed. 4, p.487–495, 2009.

IRALDO, F.; TESTA, F.; FREY, M. Is an environmental management system able to influence environmental and competitive performance? The case of the eco-management and audit scheme (EMAS) in the European union. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, nov. 2009. p. 1444–1452.

ITSUBO, N., E INABA, A. **A new LCIA method: LIME has been completed**. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(5), 305-305, 2003.

ITSUBO, N., SAKAGAMI, M., WASHIDA, T., KOKUBU, K., E INABA, A. Weighting Across Safeguard Subjects for LCIA through the Application of Conjoint Analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 9(3), 196-205, 2004.

JABBOUR, A. B. L. S., JABBOUR, C. J. C.; SARKIS, J.; GOVINDAN, K. Brazil’s new national policy on solid waste: challenges and opportunities. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 16, janeiro 2014. p. 7-9.

JABBOUR, C. J. C.; JABBOUR, A. B. L.; STEFANELLI, N. O.; TEIXEIRA, A. A. Gestão Ambiental e estrutura organizacional: estudo de múltiplos casos. **REGE**. São Paulo, v.19, n.3, p. 361-376, 2012.

JASCH, C. Journal of Cleaner Production. **Environmental performance evaluation and indicators**, v. 8, fev 2000. p. 79-88.

JARIC, I., VISNJIC-JEFTIC, Z., CVIJANOVIC, G., GACIC, Z., JOVANOVIC, L., SKORIC, S. E LENHARDT, M. “Determination of differential heavy metal and trace element accumulation in liver, gills, intestine and muscle of Sterlet (Acipenser ruthenus) from the Danube River in Serbia by ICP-OES”, **Microchemical Journal**, Vol. 98 No. 1, pp. 77-81, 2011.

JÄRUP, L. E AKESSON, A. “Current status of cadmium as an environmental health problem”, **Toxicology and Applied Pharmacology**, Vol. 238 No. 3, pp. 201-208, 2009.

JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G., E ROSENBAUM, R. **IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology**. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(6), 324-330, 2003.

JOINT RESEARCH CENTRE – JRC. **Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document**. (ILCD Handbook), 2010.

JOINT RESEARCH CENTRE – JRC. **Recommendations based on existing environmental impact assessment models and factors for life cycle assessment in European context**. (ILCD Handbook), 2011.

KEMNA, R., van ELBURG M., Li, W., e van HOLSTEKJIN, R. **MEEUP: the methodology Report**. Brussels: European Commission. (Final version), 2005.

KUBOTA, F.I. E ROSA, L.C. “Identification and conception of cleaner production opportunities with the theory of inventive problem solving”, **Journal of Cleaner Production**, Vol. 47 No. 2, pp. 199-210, 2013.

KUHRE, W. L.; ISO 14031 **Environmental Performance Evaluation (EPE)**. Prentice Hall, Inc. New Jersey, 1998.

LENZI, E., FAVERO, L.O.B. E LUCHESE, E.B. **Introdução à química da água: ciência vida e sobrevivência**, LTC, Rio de Janeiro, 2009.

LI, F. et al. Improved AHP Method and Its Application in Risk Identification. **Journal of Construction Engineering and Management**, março 2013. p. 312-320.

LIU, X., SONG, Q., TANG, Y., LI, W., XU, J., WU, J., WANG, F. e BROOKES, P. C. “Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis”, **Science of the Total Environment**, Vols. 463-464, No. 3, pp. 530-540, 2013.

LOPES, R. R. **Cenário sobre os residuos de cortume no brasil**. 2015. 35 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.

LUNAS, A. L.; LUSTOSA, P. R. Benefício econômico do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo no setor sucroenergético do Sudoeste goiano. **Custos e @gronegócio on line**, 2015.

MACHADO, A. G. C.; SILVA, J. C. Estratégia empresarial e práticas ambientais: evidências no setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 12, n. 37, p. 405-424, 2010.

MAIMON, D. “Eco estratégia nas empresas brasileiras: realidade ou discurso?”, **Revista de Administração de Empresas (RAE)**, Vol. 34 No. 4, pp. 119-130, 1994.

MARTINELLI, A.C., BARRADA, R.V., FERREIRA, S.A.D., FREITAS, M.B.J.G.F. E LELIS, M.F.F. “Avaliação da lixiviação do cádmio e níquel provenientes da degradação de baterais níquel-cádmio em uma coluna de solo”, **Química Nova**, Vol. 37 No. 3, pp. 465-472, 2014.

MASUMM, B.M., H.H. MASJUKI, M.A. KALAM, I.M. RIZWANUL FATTAH, S.M. PALASH, M.J. ABEDIN - Effect of ethanol–gasoline blend on NOx emission in SI engine - Centre for Energy Sciences, Faculty of Engineering, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** - University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia - 2013

MEINDERS, H.; MEUFFELS, M. Product clain responsibility – an industry perspective. **International Journal of Corporate Sustainability**, v.8, p. 348-354, 2011.

MELO, J.; PEGADO, C. **Ecoblock**: A method for integrated environmental performance evaluation of companies and products (construction case-study), 2006. Disponível em: <http://gasa.dcea.fct.unl.pt/ecoblock/EcoBalance_02.pdf>. Acesso em: 03 Maio 2015.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Produção**, 2015. p. 160-175.

MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING E THE ENVIRONMENT. **Eco-indicator 99** manual for designers: a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, 2000.

MOREIRA, F R; JESUS, L F; MARINHA, M S, Amálgama dentário: fonte de contaminação por mercúrio para a odontologia e para o meio ambiente. **Caderno Saúde Coletiva**, 2010.

MUNKSGAARD, J. et al. An environmental performance index for products reflecting damage costs. **Ecological Economics**, 2017. p. 119-130.

NESSA, B. et al. Categorising tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**, 2007. p. 498-508.

NEVES, M.F.; TROMBIN, V.G. **A dimensão do Setor Sucroenergético. Mapeamento e Quantificação da Safra 2013/2014**. Ribeirão Preto: Markestrat, Fundace, FEA–RP/USP, 2014. Disponível em: <http://www.brasilagro.com.br/imagens/pdf/Mapeamento_Quantificacao_Setor_Sucroenergetico_Safra_2013-14.pdf> Acesso em: 10 julho 2016.

NOGUEIRA, M. A.; GARCIA, M. S. Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brilhante, Mato Grosso do Sul. **Revista Eletronica em Gestão, Educacao e Tecnlogia Ambiental**, v. 17, n. 17, p. 3275-3283, 2013.

OECD. The Oslo Manual: The Measurement of Scientific and Technical Activities. Paris: **OECD**; Eurostat, 2005. Disponível em: < https://www.oecd.org/sti/inno/2367580.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2016.

OLIVEIRA, A.; CRISTOBAL, S.; SAIZAR, C. Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social: una herramienta para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones. **INNOTEC Gestión**, 7, 2016. p. 20-27.

OLIVEIRA, L C; BOTERO, W G; ROCHA, F C, Santos, A, Silva, H C Influência das características físico-quimicas dos solos no ciclo hidrobiogeoquimico do mercúrio na região do rio Aracá-AM. **Química Nova**, 2011, Vol. 34, N 8, p 1303-1308.

OLIVEIRA, S. M.; HANSEN, A. O.; SILVA, T. N.; PEDROZO, E. A.; BOLDIN, V. P. Responsabilidade socioambiental no setor sucroalcooleiro: um estudo de caso na Pioneiros Bioenergia S/A. **Revista Eletrônica de Gestão**, v. 2, n. 1, p. 111-134, 2009.

OMETTO, A.R.; Montes, M.L.D.; Silva, D.A.L; Delai, I. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014.

OSTAD-AHMAD-GHORABI, M. J.; ATTARI, M. Advancing environmental evaluation in cement industry in Iran. **Journal of Cleaner Production**, 2013. p. 23-30.

PEGADO, C., MELO, J. e RAMOS, T. (2004), "**Ecoblock: Método de avaliação do desempenho ambiental**", Disponível em: <http://gasa.dcea.fct.unl.pt/ecoblock/Apea%2001.doc> Acessado em 12 Abril 2016.

PEROTTO, E. et al. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, março 2008. p. 517-530.

PIACENTE, F. J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental: o caso das usinas localizadas nas Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Campinas**, 2005. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Econômico, UNICAMP.

RAO, R. V. **Decision Making in the Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods**. Londres: Springer-Verlag London, v. 1. ed. , 2013.

REBELATO, M. G. et al. Environmental performance analysis: foundry industry case report. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 28, 2017. p. 248-263.

REBELATO, M. G. et al. Environmental performance assessment (EPA): a case study in a graphic company. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 28, 2017. 593-608.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Ponderação do impacto ambiental dos resíduos e subprodutos da produção industrial sucroenergética. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, 2013. p. 392-415.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Proposta de Indicadores para Avaliação do Desempenho Ambiental dos Processos Produtivos de Usinas Sucroenergéticas. **4º International Workshop - Advances in Cleaner Production**, São Paulo, 2013. 1-10.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Avaliação Do Desempenho Ambiental dos Processos Industriais de Usinas Sucroenergéticas: um Estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. **Revista de Administração da UNIMEP**, v. 12, n. 3, 2014. p. 122-151.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Análise do desempenho ambiental das usinas sucroenergéticas localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. **Engenharia Sanitária Ambiental**, jul/set 2016. p. 579-591.

REBELATO, M. G.; RODRIGUES, A. M.; MADALENO, L. L. Environmental Performance Assessment of Industrial Processes in Sugar Power Plants: A Proposed Methodological Framework. **Modern Environmental Science and Engineering** , 2015. p. 53-63.

REIN, P. (2017), **Cane Sugar Engineering**, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin.

REIN, P. (2013), **Engenharia do Açúcar de Cana**, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin.

RIBEIRO, A. P. et al. Effects of contamination with toxic metals on the environmental quality of Sepetiba Bay (SE Brazil): The case of Ingá Company. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 2015. p. 538-551.

RODRIGUES, A. M. et al. Avaliação de Desempenho Ambiental Industrial: Elaboração de umreferencial metodológico. **Revista Produção Online**, v. 15, 2015. p. 101-134.

ROHRICH, S. S.; CUNHA, J. C. A Proposição de uma taxonomia para análise da gestão ambiental no Brasil. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 8, n. 4, p. 81-97, 2004.

ROODCHENKO, S. V.; BANIN, A. MindDecider theory. **personal communication**, 2015.

ROSSETO, R.; SANTIAGO, A.D. **Adubação: resíduos alternativos**. Brasilia, DF: Embrapa, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/getor/cana-de-açucar/arvore/CONTAFG01_39_711200516717.html> acesso em 10 abril 2017.

RPS "Human Health Risk Assessment/Technical Appendix. Energy from Waste Facility", **RPS** 2008. Disponível em: <www.sepa.org.uk/PDF/AppD_Human_Health_Risk_Assessment.pdf> Acesso em: 5 maio 2016.

RUSHTON, L. "Health hazards and waste management", **British Medical Bulletin**, Vol.68, pp. 183-197, 2003.

SAATY, T.L. **Método de Análise Hierárquica**, Makron Books do Brasil Editora Ltda, Rio de Janeiro, 1991.

SAHU, O. P.; CHAUDHARI, P. K. The Characteristics, Effects, and Treatment of Wastewater in Sugarcane Industry. **Water Qual Expo**, v. 7, p. 435–444, 2015.

SALTER, E., FORD, J. "Holistic Environmental Assessment and Offshore Oil Field Exploration and Production", **Marine Pollution Bulletin**, Vol.42, No.1, pp. 45-58, 2001.

SAMUEL, V.B., AGAMUTHU, P. E HASHIM, M.A. "Indicators for assessment of sustainable production: a case study of the petrochemical industry in Malaysia", **Ecological Indicators**, Vol. 24 No. 2, pp. 392-402, 2013.

SANCHES, C.S. "Gestão ambiental proativa", **Revista de Administração de Empresas (RAE)**, Vol. 40 No. 1, pp. 76-87, 2000.

SANTOS, D. F. L.; BASSO, L. F. C.; KIMURA, H.; SOBREIRO, V. A. Eco-Innovation in the Brazilian Sugar-Ethanol Industry: a case study. **Brazilian Journal of Science and Technology**, v. 2, n.1, p. 1-15, 2015.

SEARCY, C.; KARAPETROVIC, S.; MCCARTNEY, D. Designing sustainable development indicators: analysis for a case utility. **Measuring Business Excellence**, v. 9, 2005. p. 33-41.

SELLITO, M. A.; BORCHARDT, M.; PEREIRA, G. M. Modelagem para avaliação de desempenho ambiental em operações de manufatura. **Gestão Produção**, São Carlos, v. 17, 2010. p. 95-109.

SHIGUNOV, T.; SHIGUNOV NETO, A.; CAMPOS, L. **Fundamentos da Gestão Ambiental**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2009, 295p.

SILVA, D. J. P. **Guia para implantação de um sistema de gestão ambiental na agroindústria: um estudo da indústria de laticínios**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 40. 2011. Série Sistema de Gestão Ambiental.

SILVA, D. A. L. et al. Environmental performance assessment of the melamine-ureaformaldehyde formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, 2015. p. 299-307.

SILVA, P. R.; AMARAL, F. G. Modelos para avaliação ambiental em sistemas produtivos industriais – MAASPI – aplicação em uma fábrica de esquadrilhas metálicas. **Gestão e Produção**. São Carlos, v.18, p. 41-54, 2011.

SINGH, R. K. et al. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, 2012. p. 281-299.

SONG, M. L.; FISHER, R. W. J. L.; CUI, L. B. Environmental performance evaluation with big data: theories and methods. **Annals of Operations Research**, 2016. p. 1-14.

STEEN, B. (1999a). **A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) (Version 2000).** Gothenburg: Chalmers University of Technology. (CPM report 1999:4).

STEEN, B. (1999b). **A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) (Version 2000).** Gothenburg: Chalmers University of Technology. (CPM report 1999:5).

STRANDDORF, H. K.; HOFFMANN, L.; SCHMIDT, A. **Impact categories, normalisation and weighting in LCA:** Updated on selected EDIP97-data. Copenhage: Danish Ministry of the environment, v. Environmental news No. 78, 2005.

TAHIR, A. C.; DARTON, R. C. The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 16-17, 2010. p. 1598-1607.

THORENSEN, J. “Environmental performance evaluation — a tool for industrial improvement”, **Journal of Cleaner Production**, Vol.7, pp. 365-370, 1999.

TOFFOLETTO, L., BULLE, C., GODIN, J., REID, C., E DESCHÊNES, L. LUCAS: a new LCIA method used for a canadian-specific context. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 12(2), 93-102, 2007.

TRIERWEILLER, A. C. et al. Gestão ambiental: levantamento da produção científica brasileira em periódicos de Engenharia de Produção. **Produção**, v. 24, abr-jun 2014. p. 435-450.

TUZKAYA, G. et al. Environmental performance evaluation of suppliers: A hybrid fuzzy multi-criteria decision approach. **International Journal of Environmental Science & Technology**, 2009. p. 477-490.

UNEP/SETAC. **Towards a Life Cycle Sustainability Assessment:** Making informed choices on products. UNEP/SETAC, 2011.

VILAÇA, A.C.; PINTO, D.C.A. **Sustentabilidade do setor sucroalcooleiro**. 2012. Disponivel em:<http://fazu.br/ojs/index.php/posfazu/artivle/viewfile/467/359> acesso em: 24 junho 2016.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products.** Chapman & Hall, Massachusetts, 1997.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products:** Methodology, tools and case studies in product development. 2. ed. ed. Copenhagen: Kluwer Academic Publishers, 2000.

WESTKÄMPER, E.; ALTING; ARNDT. Life Cycle Management and Assessment: Approaches and Visions Towards Sustainable Manufacturing (keynote paper). **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, 2000. p. 501-526.

WONG, C. W. Y. W. et al. Part of the series SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. **Environmental Management**, 2016. p. 1-27.

XIULIN, S.; DAWEI, L. An Improvement Analytic Hierarchy Process and Its Application in Teacher Evaluation. **Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications**, 2014.

YEO, S. H., NEO, K. G. “Inclusion of environmental performance for decision making of welding processes”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.82, No.3, pp. 78-88, 1988.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ZEVIANI, C. H.; RODRIGUES, A. M.; REBELATO, M. G. Levantamento da Produção Científica Brasileira em Gestão Ambiental Empresarial em periódicos da área de administração entre 2007 e 2012. **Anais do IX Congresso Virtual Brasileiro - Administração (CONVIBRA)**, 2013.

ZHANG, M. Application and Research of Improved AHP Model in Employment of College Student. **The Open Cybernetics & Systemics Journal**, 2015. p. 1212-1217.

ZUI, X. et al. Environmental Performance Index at the Provincial Level for China 2006–2011. **Ecological Indicators**, v. 75, abr 2017. p. 48-56.

Apêndice A – Cálculo do potencial de toxicidade humana pelo método EDIP 97

No presente estudo foi realizada uma avaliação de desempenho ambiental de três empresas da indústria sucroenergética, baseada no Potencial de Toxicidade Humana.

A toxicidade humana ocorre pelas atividades antrópicas que emitem substancias químicas com elevado teor venenoso e que podem alcançar o ser humano através do ambiente. Tal fato ocorre devido às características das substâncias combinadas com o modo de emissão. Há três vias de exposição em que as substâncias podem alcançar e afetar à saúde humana: através do contato com ar, água e solo. A toxicidade humana é causada por substâncias com características tóxicas, não biodegradáveis e concentradas nos organismos vivos (WENZEL et al., 1997).

O cálculo do potencial de toxicidade humana (EP) para as 3 vias de exposição, é determinado pelo produto da quantidade (Q) de determinadas substâncias com os fatores de equivalência (EF), representados através da fórmula: EP (ht) = Q . EF (ht). Os potenciais de toxicidade humana são expressos em m^3 de ar, m^3 de água ou m^3 de solo. Essa unidade de referência é o volume do compartimento (ar, água ou solo) necessário para neutralizar ou diluir a substância tóxica, de forma que a sua concentração seja baixa o suficiente para não ocasionar efeitos tóxicos ao ser humano.

Até três potenciais de toxicidade são calculados para cada substância:

EP (hta) = Q . EF (hta) potencial de toxicidade para o ser humano através do ar;

EP (htw) = Q . EF (htw) potencial de toxicidade para o ser humano através da água;

EP (hts) = Q . EF (hts) potencial de toxicidade para o ser humano através do solo.

Onde, EP (ht) representa o potencial de toxicidade de determinada substância para os seres humanos por exposição através de um dos três compartimentos, Q representa a quantidade de determinada substancia e EF (ht) apresenta os fatores de

equivalencia ou *equivalency factor* de determinada substância no meio ao qual foi emitida (ar, água ou solo).

Segundo Wenzel et al. (1997), os fatores de caracterização da toxicidade humana são determinados pelo produto de cinco variáveis: i) dispersão da substância no ambiente, ii) transferência da substância pela rota de exposição, iii) fator de inalação ou ingestão da substância, iv) toxicidade e v) biodegradabilidade da substância.

Os fatores de equivalência dependem exclusivamente da característica da substância e não do meio em que houve sua emissão. Os fatores calculados podem ser reutilizados cada vez que a substância aparece em um inventário para ser avaliado. Em Wenzel et al. (1997) encontra-se os fatores de equivalência de 90 substâncias.

A fórmula do Fator de Equivalência para cada substância é expressa por EF (ht) = f . T . I . HTF . BIO. As variáveis (f), (T), (I), (HTF) e (BIO) estão apresentas a seguir:

Variável (f) - é a fração que representa a dispersão da substância no ambiente.

Mesmo que uma substância é emitida para um compartimento, pode muito bem fazer a sua principal contribuição para o potencial de toxicidade em outro compartimento. Tal fato se deve às características de tempo de meia-vida da substância e de volatilidade.

Variável (T) - é o fator de transferência para a substância por determinada via de exposição. O fator T é o fator de transferência em que as substâncias alcançam o ser humano através de uma das seguintes vias de entrada: ar, água, solo, plantas, animais, peixes.

Variável (I) - é o fator de consumo para a via de exposição em questão. I é o fator que refere-se à ingestão de uma substância através de determinado compartimento. Pode ser por exposição direta (inalação) ou por ingestão de determinada substância através de peixes, água, solo, plantas, carne, leite.

Variável (HTF) - refere-se ao fator de toxicidade humana ou human toxicity factor (HTF). A variável HTF é mesurada através de dois fatores: HRC = human reference concentration ou concentração de referência humana e HRD = human reference dose ou dose de referência humana.

Quando o contato com uma sustancia tóxica ocorre através do ar, é relevante mensurar a concentração de toxicidade através do HRC. Para o solo e água é relevante mensurar a dose de toxicidade da substância através do HFT.

Para determinar o HRC (Concentração de referência humana), deve-se verificar dados de testes toxicológicos para a inalação da substância, que podem ser encontrados no banco de dados HSDB e (RTECS *registry of toxic effects of chemical substances*). Para determinar o HRD (Dose de referência humana), é medida a quantidade de substância que apresenta efeito tóxico com sua ingestão.

Variável (BIO) - é o fator de biodegradabilidade para a substância.

Estudos sobre a biodegradabilidade de substâncias são encontrados em testes de biodegradabilidade fácil (OCDE 301, 1992a) ou de biodegradabilidade inerente (OCDE 302, 1992a) em Howard, 1990. Se nenhuma informação que permita uma avaliação da biodegradabilidade de determinada substância estiver disponível, deve-se considerá-la como não-biodegradável e apontar o fator BIO igual a 1. Quanto menor a biodrgradabilidade, maior é o fator.

Dessa forma, têm-se como calcular os potenciais de toxicidade humana para os três compartimentos ar (hta), água (htw) e solo (hts). O potencial de toxicidade humana através do ar é expresso por: EP (hta) = Q . EF(hta) = Q . fa . Ta . Ia . HTFa. O potencial de toxicidade humana através da água é expresso por: EP (htw) = Q . EF(htw) = Q . fw . Tw . Iw . HTFw . BIO. O potencial de toxicidade humana através do solo é expresso por: EP (hts) = Q . EF(hts) = Q . fs . Ts . Is . HTFs . BIO.