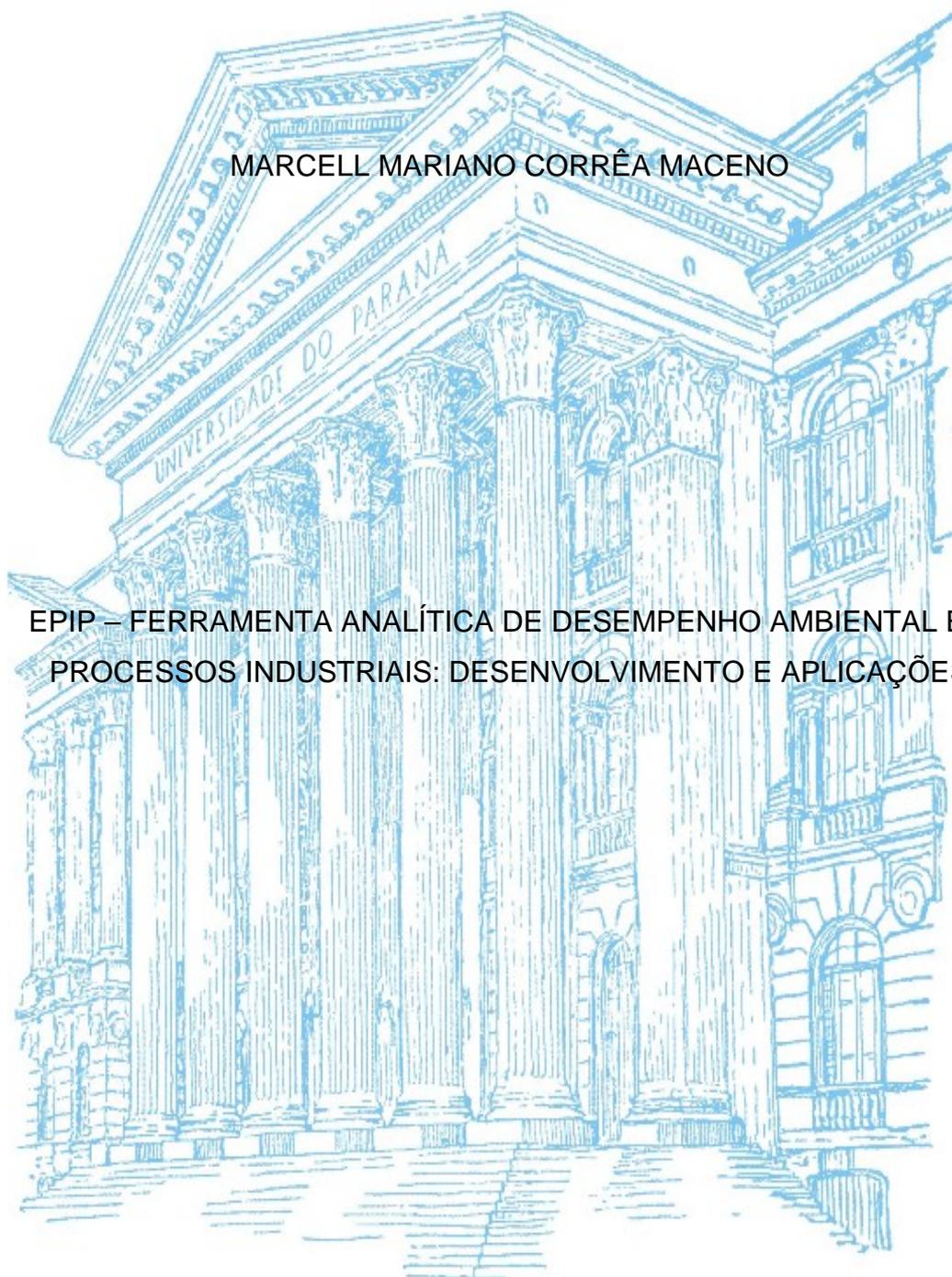


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO



EPIP – FERRAMENTA ANALÍTICA DE DESEMPENHO AMBIENTAL EM  
PROCESSOS INDUSTRIAIS: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÕES

CURITIBA

2015

MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO

EPIP – FERRAMENTA ANALÍTICA DE DESEMPENHO AMBIENTAL EM  
PROCESSOS INDUSTRIAIS: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÕES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de concentração em Engenharia Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Uivald Pawlowsky, Ph.D.

CURITIBA

2015

Maceno, Marcell Mariano Corrêa

EPIP – ferramenta analítica de desempenho ambiental em processos industriais: desenvolvimento e aplicações / Marcell Mariano Corrêa Maceno. – Curitiba, 2015.

211 f. : il.; tabs., grafs.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Uivald Pawlowsky

Bibliografia: p. 195-207

1. Indicadores ambientais. 2. Industrias. 3. Desempenho.  
I. Pawlowsky, Uivald. II. Título.

CDD 574.5



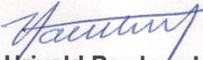
## TERMO DE APROVAÇÃO

### MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO

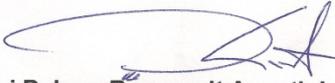
“EPIP - Ferramenta analítica de desempenho ambiental em processos industriais:  
Desenvolvimento e aplicações”

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

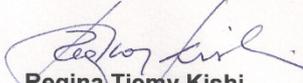
PRESIDENTE:

  
**Uivald Pawłowsky**  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador

MEMBROS:

  
**Feni Dalano Roosevelt Agostinho**  
Universidade Paulista

  
**Klaus Dieter Sautter**  
Universidade Positivo

  
**Regina Tiemy Kishi**  
Universidade Federal do Paraná

  
**Marcelo Rizzo Errera**  
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 20 de outubro de 2015

***À minha esposa, pais, familiares e amigos, os quais de alguma forma auxiliaram e me fortaleceram para levar em frente os obstáculos e concluir mais esta etapa em minha vida.***

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, o prof. Dr. Urivald Pawlowsky, pelo apoio e paciência durante os percalços da Tese.

A minha esposa, Thaís Gaissler Velozo Maceno, pelo apoio e suporte nos mais diferentes momentos, dando sempre a força necessária para que eu não desistisse.

A minha família e, em especial, a minha mãe, Ivonete Corrêa Maceno, pelo apoio incondicional e irrestrito durante o desenvolvimento dos estudos, e também minha sogra Sidnea de Oliveira Gaissler Velozo, que sempre me deu força na caminhada do trabalho.

Aos meus amigos de Paranaguá e, em especial, ao Saulo pelos momentos de desabafo e descontração, e ao Fabiano, Erick e Adan, pelas conversas e tocadãs.

Aos meus amigos de Curitiba, Patrícia Lemizska Ribas Canedo e Rosa Saldanha Fidalski, pelo suporte sempre que precisei.

Aos amigos da UFPR, em especial aos meus colegas de trabalho na Engenharia de Produção, principalmente a Adriana de Paula Lacerda Santos e Mauro Lacerda Santos.

Aos amigos do doutorado, pela divisão de sofrimento e pelo apoio nos momentos críticos, principalmente a Karina Scurupa Machado, que nas poucas conversas, podemos dividir os problemas desta etapa.

A Pitty e Sophia, pelas momentos de relaxamento e alívio mental nos passeios e brincadeiras. E também ao Budy pelos passeios de fim de semana e a Nina pela recepção sempre eufórica na chegada à Paranaguá.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram no processo produtivo para o desenvolvimento e conclusão da pesquisa.

*“O que eu faço, é uma gota no meio  
do oceano. Mas sem ela, o oceano  
será menor.”*

**Madre Teresa de Calcutá (1910-1997)**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
1.1 PROBLEMÁTICA, JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA TESE .....	28
1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESES DE TRABALHO .....	30
1.3 LIMITAÇÕES DA TESE .....	31
1.4 ESCOPO DA TESE.....	31
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
2.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL NAS INDÚSTRIAS.....	33
2.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS.....	35
2.3 CONTABILIDADE DE CUSTOS AMBIENTAIS (CCA) .....	38
2.4 FERRAMENTAS ANALÍTICAS DE DESEMPENHO AMBIENTAL.....	41
2.5 AGREGAÇÃO POR NORMALIZAÇÃO E PONDERAÇÃO DE DADOS .....	49
2.6 MÉTODOS MULTICRITÉRIO PARA APOIO A DECISÃO (MCAD).....	53
2.6.1 Método AHP (Análise Hierárquica de Processo).....	55
2.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	57
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA</b> .....	<b>60</b>
3.1 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DA EPIP .....	60
3.1.1 2º Estágio - Estudo da Literatura.....	61
3.1.2 3º Estágio - Construção da EPIP.....	62
3.1.3 4º Estágio - Estudos de Caso e Análise de Sensibilidade.....	65
3.1.4 5º Estágio - Análise Final (Pós Aplicação) .....	66
<b>CAPÍTULO 4 - CRITÉRIOS PARA O DESEMPENHO AMBIENTAL EM PROCESSOS INDUSTRIAIS E ANÁLISE CRÍTICA DE FERRAMENTAS ANALÍTICAS</b> .....	<b>67</b>
4.1 MFCA – MATERIAL FLOW COST ACCOUNTING.....	70
4.1.1 Vantagens da MFCA .....	73
4.1.2 Desvantagens da MFCA .....	74
4.2 MÉTODOS AICV (AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA) .....	75
4.2.1 Vantagens dos Métodos AICV .....	78
4.2.2 Desvantagens dos Métodos AICV.....	78

4.3 ANÁLISE DE SIGNIFICÂNCIA DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS (ASAIA) .....	79
4.3.1 Vantagens dos métodos ASAIA .....	81
4.3.2 Desvantagens dos métodos ASAIA .....	81
4.4 MODELO DE CERCAL (2000) .....	82
4.4.1 Análise do Resíduo por Valor (ARV) .....	85
4.4.2 Análise do Resíduo por Risco (ARR) .....	86
4.4.3 Análise do Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM).....	87
4.4.4 Ponderação do ARV, ARR E ARFM.....	89
4.4.5 Vantagens do Modelo de Cercal .....	89
4.4.6 Desvantagens do Modelo de Cercal .....	90
<b>CAPÍTULO 5 - A EPIP .....</b>	<b>91</b>
5.1 EQUAÇÕES PRINCIPAIS DA EPIP .....	93
5.2 CUSTO DE PERDA MATERIAL ( $CPM(n)$ ).....	95
5.3 CUSTO DE ENERGIA CONSUMIDA ( $CEC(n)$ ) .....	96
5.4 CUSTO DE DESTINO MATERIAL ( $CDM(n)$ ).....	96
5.5 CUSTO DE GESTÃO LOCALIZADA ( $CGL(n)$ ) .....	97
5.6 CUSTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO ( $CPD(n)$ ).....	98
5.7 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA (AICV) .....	99
5.7.1 Impactos Ambientais de Consumo e Emissão de Materiais ( $ICEM(n)$ ) .....	100
5.7.2 Impactos Ambientais da Energia Consumida ( $IEC(n)$ ).....	105
5.7.3 Multicritério de Apoio à Decisão na Ponderação de Fatores.....	106
5.8 RESUMO DO EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DA EPIP .....	110
5.9 PASSOS DE APLICAÇÃO DO MODELO EPIP.....	111
<b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO EPIP.....</b>	<b>114</b>
6.1 ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA A – FABRICAÇÃO DE EMBALAGENS DE PLÁSTICOS PARA LÁCTEOS FERMENTADOS .....	114
6.1.1 Processo Produtivo da Indústria A .....	114
6.1.2 Levantamento de Dados da Indústria A .....	118
6.1.3 Exemplo de Cálculo das variáveis da EPIP para a Indústria A .....	128
6.1.4 Exemplo de Cálculo das variáveis da ferramenta MFCA para a Indústria A ..	133
6.1.5 Exemplo de Cálculo das variáveis da ferramenta ASAIA para a Indústria A..	135
6.1.6 Exemplo de Cálculo das variáveis do modelo de Cercal para a Indústria A...	135

6.1.7 Resultados da Indústria A para as ferramentas EPIP, MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal .....	137
6.2 ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA B – FABRICAÇÃO DE MÓVEIS PLANEJADOS.....	144
6.2.1 O Processo Produtivo da Indústria B .....	145
6.2.2 Levantamento de dados da Indústria B.....	148
6.2.3 Resultados da Indústria B para as ferramentas EPIP, MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal .....	160
6.3 ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA C – FABRICAÇÃO DE LUMINÁRIAS PLAFON.....	166
6.3.1 O Processo Produtivo da Indústria C .....	166
6.3.2 Levantamento de dados da Indústria C.....	168
6.3.3 Resultados da Indústria C para as ferramentas EPIP, MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal .....	179
6.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA EPIP EM RELAÇÃO AS FERRAMENTAS AICV, MFCA, ASAIA E MODELO DE CERCAL .....	185
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO DA TESE .....</b>	<b>190</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>192</b>
I - APÊNDICE I – IMAGENS DA FERRAMENTA EPIP PROGRAMADA EM EXCEL.....	207

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Estrutura geral do Ciclo PDCA utilizado na Avaliação de Desempenho Ambiental.....	34
FIGURA 2 - Fluxo de decisão de escolha de MCAD mais adequado para determinadas condições.....	55
FIGURA 3 - Modelo de organização hierárquica realizada na etapa de construção de hierarquias do AHP. ....	56
FIGURA 4 - Modelo de matriz quadrada de julgamentos dos elementos em análise. ....	57
FIGURA 5 - Fluxograma das etapas de trabalho para a construção da EPIP (Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais).....	61
FIGURA 6 - Exemplo de contabilidade de custo material para um CQ hipotético..	72
FIGURA 7 - Representação da caracterização, avaliação de danos, normalização e ponderação em um método de AICV. ....	76
FIGURA 8 - Balanço de materiais conforme modelo de Cercal. ....	82
FIGURA 9 - Áreas de abordagem para o cálculo do desempenho ambiental pelas 4 ferramentas estudadas em detalhes e também pela ferramenta EPIP. ....	91
FIGURA 10 - Equação (32) aberta para o cálculo do CPM para um aspecto ambiental $n=1$ .....	96
FIGURA 11 - Equação (34) aberta para o cálculo do custo de destino material para um aspecto ambiental $n=1$ . ....	97
FIGURA 12 - Categorias de impacto e de danos consideradas na AICV da ferramenta EPIP. ....	101
FIGURA 13 - Matriz de julgamento de Saaty construída no julgamento par a par das 10 formas de destinação dos materiais possíveis no modelo EPIP. ....	108
FIGURA 14 - Representação do cálculo da Matriz A' obtida através da normalização da matriz A. ....	108
FIGURA 15 - Representação do cálculo da matriz B'. ....	108
FIGURA 16 - Representação do cálculo do $\lambda_{\max}$ para realização do cálculo da razão de consistência.....	109

FIGURA 17 - Representação do cálculo da razão de consistência RC. ....	109
FIGURA 18 - Etapas de trabalho para uso e aplicação do modelo EPIP em uma indústria. ....	113
FIGURA 19 - Fluxograma do processo de produção do copo plástico pela Indústria A. ....	115
FIGURA 20 - Máquina de extrusão de chapas plásticas. ....	116
FIGURA 21 - Molde de copos plásticos e grelha resultante do processo. ....	116
FIGURA 22 - Diagrama de impressora <i>dry offset</i> . ....	117
FIGURA 23 - Resultados do desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria A através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e modelo de Cercal, e do desempenho ambiental dos centros de quantidade levantados para a MFCA. ....	139
FIGURA 24 - Resultados obtidos dos Custo de Perda Material (CPM), Custo de Energia Consumida (CEC), Custo de Destino Material (CDM) e Custo de Gestão Localizada (CGL) para cada aspecto ambiental através da EPIP aplicada a Indústria A. ....	140
FIGURA 25 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria A através da aplicação da ferramenta AICV. ....	140
FIGURA 26 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria A através da aplicação da ferramenta ASAIA. ....	142
FIGURA 27 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais obtidos para as variáveis ARV (análise de resíduo por valor), ARR (análise de resíduo por risco), ARFM (análise de resíduo por facilidade de minimização) e ARG (análise de resíduo global) para Indústria A através da aplicação do Modelo de Cercal. ....	143
FIGURA 28 - Resultados de desempenho ambiental dos centros de quantidade obtidos para as variáveis CMR (custo de perda material no resíduo), CER (custo da energia no resíduo), CMOR (custo de mão de obra no resíduo), CDR (custo do destino do resíduo) e CT (custo total do resíduo, que é a soma dos outros custos), para Indústria A através da aplicação da ferramenta MFCA. ....	144

FIGURA 29 - Fluxograma do processo de produção do móveis planejados pela Indústria B. ....	145
FIGURA 30 - Foto da esquadrijadeira de precisão utilizada em um dos postos de trabalho do marceneiro.....	146
FIGURA 31 - Foto da área de pintura das peças em MDF após envernizamento. ....	147
FIGURA 32 - Resultados do desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria B através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e modelo de Cercal, e do desempenho ambiental dos centros de quantidade pela aplicação da MFCA. ....	161
FIGURA 33 - Resultados obtidos dos Custo de Perda Material (CPM), Custo de Energia Consumida (CEC) e Custo de Destino Material (CDM) para cada aspecto ambiental através da EPIP aplicada a Indústria B.....	163
FIGURA 34 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria B através da aplicação da ferramenta AICV. ....	163
FIGURA 35 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria B através da aplicação da ferramenta ASAIA.....	164
FIGURA 36 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais obtidos para as variáveis ARV (análise de resíduo por valor), ARR (análise de resíduo por risco), ARFM (análise de resíduo por facilidade de minimização) e ARG (análise de resíduo global) para Indústria B através da aplicação do Modelo de Cercal.....	165
FIGURA 37 - Resultados de desempenho ambiental dos centros de quantidade obtidos para as variáveis CMR (custo de perda material no resíduo), CER (custo da energia no resíduo), CMOR (custo de mão de obra no resíduo), CDR (custo do destino do resíduo) e CT (custo total do resíduo) para Indústria B através da aplicação da ferramenta MFCA. ....	165
FIGURA 38 - Exemplo do produto fabricado pela Indústria C.....	166
FIGURA 39 - Fluxograma do processo de produção das luminárias Plafon pela Indústria C. ....	167
FIGURA 40 - Resultados do desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria C através da aplicação das ferramentas	

EPIP, AICV, ASAIA, modelo de Cercal e do desempenho ambiental dos centros de quantidade para a MFCA. ....	180
FIGURA 41 - Resultados obtidos dos Custo de Perda Material (CPM), Custo de Energia Consumida (CEC) e Custo de Destino Material (CDM) para cada aspecto ambiental através da EPIP aplicada a Indústria C. ....	181
FIGURA 42 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria C através da aplicação da ferramenta AICV. ....	181
FIGURA 43 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria C através da aplicação da ferramenta ASAIA. ....	183
FIGURA 44 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais obtidos para as variáveis ARV (análise de resíduo por valor), ARR (análise de resíduo por risco), ARFM (análise de resíduo por facilidade de minimização) e ARG (análise de resíduo global) para Indústria C através da aplicação do Modelo de Cercal. ....	183
FIGURA 45 - Resultados de desempenho ambiental dos centros de quantidade obtidos para as variáveis CMR (custo de perda material no resíduo), CER (custo da energia no resíduo), CMOR (custo de mão de obra no resíduo), CDR (custo do destino do resíduo) e CT (custo total do resíduo) para Indústria C através da aplicação da ferramenta MFCA. ....	184

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Diferentes focos de aplicação de ferramentas de AIA.....	36
QUADRO 2 - Ferramentas analíticas para avaliação de desempenho ambiental que podem ser aplicadas à indústria, levantadas na pesquisa da literatura.....	42
QUADRO 3 - Ferramentas analíticas combinadas para análise de desempenho ambiental em processos industriais.....	47
QUADRO 4 - Famílias de métodos e os tipos de métodos de ponderação de dados utilizados por ferramentas de avaliação de impactos ambientais.....	52
QUADRO 5 - Principais Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão e breve descrição. ....	54
QUADRO 6 - Escala numérica de Saaty. ....	56
QUADRO 7 - Atendimento dos modelos estudados aos critérios de importância para o estabelecimento de um novo modelo matemático de desempenho ambiental. ....	69
QUADRO 8 - Relação dos julgamentos com os resultados da escala de Saaty e os motivos de classificação por comparação para as categorias de danos da AICV.....	107
QUADRO 9 - Levantamento de processos, Aspectos Ambientais, entradas e saídas / resíduos da Indústria A.....	120
QUADRO 10 - Dados de entrada da Indústria A selecionadas para categoria de impacto da AICV em relação a cada aspecto ambiental <i>n</i> .. ....	124
QUADRO 11 - Dados de entrada para o cálculo de risco através da ASAIA para a Indústria A. ....	126
QUADRO 12 - Resultado da classificação dos aspectos ambientais obtido através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA para a Indústria A. ....	138
QUADRO 13 - Levantamento de processos, Aspectos Ambientais, entradas e saídas / resíduos da Indústria B.....	150
QUADRO 14 - Dados de entrada selecionadas para categoria de impacto da AICV em relação a cada aspecto ambiental <i>n</i> . ....	155

QUADRO 15 - Dados de entrada para o cálculo de risco através da ASAIA para a Indústria B. ....	157
QUADRO 16 - Resultado da classificação dos aspectos ambientais obtido através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA para a Indústria B. ....	160
QUADRO 17 - Levantamento de processos, Aspectos Ambientais, entradas e saída / resíduos da Indústria C.....	170
QUADRO 18 - Dados de entrada selecionadas para categoria de impacto da AICV em relação a cada aspecto ambiental <i>n</i> . ....	174
QUADRO 19 - Dados de entrada para o cálculo de risco através da ASAIA para a Indústria C. ....	176
QUADRO 20 - Resultado da classificação dos aspectos ambientais obtido através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA para a Indústria C. ....	179

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Modelo de formulário de ASAIA para avaliação de significância.....	79
TABELA 2 -	Equacionamento matemático do modelo de Cercal para o cálculo da Análise de Resíduo por Valor (ARV). .....	86
TABELA 3 -	Equação matemática para cálculo da análise de resíduo por risco...87	
TABELA 4 -	Questionamentos para análise do resíduo por facilidade de minimização.....	88
TABELA 5 -	Equações matemáticas para o cálculo da análise de resíduo por facilidade de minimização.....	88
TABELA 6 -	Destinos materiais <i>d</i> considerados no cálculo dos Custos de Destino Material.....	97
TABELA 7 -	Fatores de normalização das categorias de impacto que compõe a AICV da EPIP.....	105
TABELA 8 -	Fatores de ponderação das categorias de danos obtidos para a AICV da EPIP. ....	109
TABELA 9 -	Resumo do Equacionamento matemático da EPIP.....	110
TABELA 10 -	Dados de entrada do modelo EPIP para realização do cálculo dos custos de perda material (CPM) para a Indústria A.....	121
TABELA 11 -	Dados de entrada do modelo EPIP para realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) para a Indústria A.....	122
TABELA 12 -	Dados de entrada da MFCA para a indústria A.....	125
TABELA 13 -	Dados de entrada para o cálculo do ARV (Análise de Resíduo por Valor), ARR (Análise de Resíduo por Risco), ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização) e AGR (Análise Global de Resíduo) através do modelo de Cercal para a Indústria A.....	126
TABELA 14 -	Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização do cálculo dos custos de perda material (CPM) para a Indústria B.....	150
TABELA 15 -	Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) para a Indústria B.....	152
TABELA 16 -	Dados de entrada da MFCA para a indústria B.....	156

TABELA 17 - Dados de entrada para o cálculo do ARV (Análise de Resíduo por Valor), ARR (Análise de Resíduo por Risco), ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização) e AGR (Análise Global de Resíduo) através do modelo de Cercal para a Indústria B. ....	158
TABELA 18 - Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização do cálculo dos custos de perda material (CPM) para a Indústria C. ....	171
TABELA 19 - Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) para a Indústria C. ....	173
TABELA 20 - Dados de entrada da MFCA para a indústria C. ....	175
TABELA 21 - Dados de entrada para o cálculo do ARV (Análise de Resíduo por Valor), ARR (Análise de Resíduo por Risco), ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização) e AGR (Análise Global de Resíduo) através do modelo de Cercal para a Indústria C. ....	177
TABELA 22 - Resultado do Coeficiente de Correlação de Spearman obtido entre os parâmetros de entrada considerados essenciais para uma ADA robusta e as quatro ferramentas analisadas para a Indústria A. Nível de confiança $\alpha \leq 0,05$ . ....	186
TABELA 23 - Resultado do Coeficiente de Correlação de Spearman obtido entre os parâmetros de entrada considerados essenciais para uma ADA robusta e as quatro ferramentas analisadas para a Indústria B. Nível de confiança $\alpha \leq 0,05$ . ....	187
TABELA 24 - Resultado do Coeficiente de Correlação de Spearman obtido entre os parâmetros de entrada considerados essenciais para uma ADA robusta e as quatro ferramentas analisadas para a Indústria C. Nível de confiança $\alpha \leq 0,05$ . ....	188

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AA	Aspecto Ambiental
ACCV	Análise de Custos do Ciclo de Vida
ACV	Análise do Ciclo de Vida de Produtos
ADA	Avaliação de Desempenho Ambiental
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida de Produtos
AS	Análise de Sensibilidade
ASAIA	Análise de significância de aspectos e impactos ambientais
CCA	Contabilidade de Custos Ambientais
CQ	Centro de quantidade
DA	Desempenho Ambiental
IA	Impacto Ambiental
ISO	<i>International Standards Organization</i>
MFCA	<i>Material Flow Cost Accounting</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i> (Planejar – Implementar – Verificar – Agir)
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
EPIP	<i>Environmental Performance in Industrial Processes</i> (Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais)

## LISTA DE SÍMBOLOS DA FERRAMENTA EPIP

$n$	Nº do aspecto ambiental levantado
$m$	Nº do material presente na perda material do aspecto ambiental $n$
$d$	Nº do tipo de destino adotado para o aspecto ambiental $n$
$CPM(n)$	Custos de Perda Material
$MP_{1,m}^{\%}(n)$	Porcentagem de cada material $m$ na quantidade total do no aspecto ambiental $n$
$CM_{m,1}(n)$	Custo unitário do material $m$ no aspecto ambiental $n$
$CEC(n)$	Custos de Energia Consumida
$EG(n)$	Energia Gasta no aspecto ambiental $n$
$PE(n)$	Porcentagem de energia usada pelo aspecto ambiental $n$
$CE(n)$	Custo Unitário de Energia para o aspecto ambiental $n$
$CDM(n)$	Custo de Destino Material
$MD(n)$	Quantidade total de material para destino para o aspecto ambiental $n$
$D_{1,d}^{\%}(n)$	Porcentagem de material para o destino $d$ no aspecto ambiental $n$
$CD_{d,1}(n)$	Custo Unitário de cada destino $d$ no aspecto ambiental $n$
$M_{OUT}(n)$	Massa total de saída para o aspecto ambiental $n$
$M_{IN}(n)$	Massa total de entrada para o aspecto ambiental $n$
$CGL(n)$	Custo de Gestão Localizada para o aspecto ambiental $n$
$CTGL_{GAA}(n)$	Custo total de gestão localizada para $N$ aspectos ambientais
$CPD(n)$	Custo de Pesquisa e Desenvolvimento para o aspecto ambiental $n$
$CTPD_{GAA}(n)$	Custo total de Pesquisa e Desenvolvimento para $P$ aspectos ambientais
$ICEM(n)$	Impacto ambiental do Consumo e Emissão Material para o aspecto ambiental $n$
$DSH(n)$	Fator de caracterização de Danos à Saúde Humana para o aspecto ambiental $n$
$PD_{SH}$	Fator de ponderação de danos à saúde humana
$TH(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Toxicidade Humana

	para o aspecto ambiental $n$
$RIn(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Respiração de compostos Inorgânicos para o aspecto ambiental $n$
$ROrg(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Respiração de compostos Orgânicos para o aspecto ambiental $n$
$DO(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Depleção de Ozônio para o aspecto ambiental $n$
$RI(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Radiação Ionizante para o aspecto ambiental $n$
$P_{TH}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Toxicidade Humana
$P_{RIn}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Respiração de compostos Inorgânicos
$P_{ROrg}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Respiração de compostos Orgânicos
$P_{DO}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Depleção de Ozônio
$P_{RI}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Radiação Ionizante
$N_{TH}$	Fator de normalização da categoria de impacto Toxicidade Humana
$N_{RIn}$	Fator de normalização da categoria de impacto Respiração de compostos Inorgânicos
$N_{Org}$	Fator de normalização da categoria de impacto Respiração de compostos Orgânicos
$N_{DO}$	Fator de normalização da categoria de impacto Depleção de Ozônio
$N_{RI}$	Fator de normalização da categoria de impacto Radiação Ionizante
$DQE(n)$	Fator de caracterização de Danos a Qualidade do Ecossistema para o aspecto ambiental $n$
$PD_{QE}$	Fator de ponderação de danos a qualidade do ecossistema
$Eco(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Ecotoxicidade para o aspecto ambiental $n$
$Aci(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Acidificação para o aspecto ambiental $n$
$Eut(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Eutrofização para o aspecto ambiental $n$

$UA(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Uso de Água para o aspecto ambiental $n$
$SO(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Solo Ocupado para o aspecto ambiental $n$
$ST(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Solo Transformado para o aspecto ambiental $n$
$P_{Eco}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Ecotoxicidade
$P_{Aci}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Acidificação
$P_{Eut}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Eutrofização
$P_{UA}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Uso da Água
$P_{SO}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Solo Ocupado
$P_{ST}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Solo Transformado
$N_{Eco}$	Fator de normalização da categoria de impacto Ecotoxicidade
$N_{Aci}$	Fator de normalização da categoria de impacto Acidificação
$N_{Eut}$	Fator de normalização da categoria de impacto Eutrofização
$N_{UA}$	Fator de normalização da categoria de impacto Uso da Água
$N_{SO}$	Fator de normalização da categoria de impacto Solo Ocupado
$N_{ST}$	Fator de normalização da categoria de impacto Solo Transformado
$DRG(n)$	Fator de caracterização de Danos por Resíduos Gerados para o aspecto ambiental $n$
$RP(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Resíduo Perigoso para o aspecto ambiental $n$
$RNP(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Resíduo Não Perigoso para o aspecto ambiental $n$
$EC(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Escória e Cinzas para o aspecto ambiental $n$
$RR(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Resíduo Radioativo para o aspecto ambiental $n$
$P_{RP}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Resíduo Perigoso
$P_{RNP}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Resíduo Não Perigoso

$P_{EC}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Escória e Cinzas
$P_{RR}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Resíduo Radioativo
$N_{RP}$	Fator de normalização da categoria de impacto Resíduo Perigoso
$N_{RNP}$	Fator de normalização da categoria de impacto Resíduo Não Perigoso
$N_{EC}$	Fator de normalização da categoria de impacto Escória e Cinzas
$N_{RR}$	Fator de normalização da categoria de impacto Resíduo Radioativo
$DRec(n)$	Fator de caracterização de Danos pelo Uso de Recursos para o aspecto ambiental $n$
$PD_{Rec}$	Fator de ponderação de danos pelo Uso de Recursos
$RM(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Recursos Minerais para o aspecto ambiental $n$
$RCNR(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Recursos Combustíveis Não Renováveis para o aspecto ambiental $n$
$P_{RM}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Recursos Minerais
$P_{RCNR}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Recursos Combustíveis Não Renováveis
$N_{RM}$	Fator de normalização da categoria de impacto Recursos Minerais
$N_{RCNR}$	Fator de normalização da categoria de impacto Recursos Combustíveis Não Renováveis
$DAqG(n)$	Fator de caracterização de Danos por Aquecimento Global para o aspecto ambiental $n$
$AqG(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Recursos Aquecimento Global para o aspecto ambiental $n$
$PD_{AqG}$	Fator de ponderação de danos pelo Aquecimento Global
$N_{AqG}$	Fator de normalização da categoria de impacto Aquecimento Global
$IEC(n)$	Impacto ambiental de Energia Consumida para o aspecto ambiental $n$
$ER(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Energia Renovável para o aspecto ambiental $n$
$ENR(n)$	Fator de caracterização da categoria de impacto Energia Não Renovável para o aspecto ambiental $n$
$P_{ER}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Energia Renovável

$P_{ENR}$	Fator de ponderação da categoria de impacto Energia Não Renovável
$N_E$	Fator de normalização das categorias de impacto para Energia
$C_{AA}(n)$	Custo equivalente do aspecto ambiental $n$
$C_{AA}T$	Custo equivalente Total da indústria estudada
$CR\%(n)$	Custo relativo equivalente do aspecto ambiental $n$
$CGG$	Custo de Gestão Global
$\$Eq$	Unidade Monetária Equivalente

## RESUMO

As indústrias são pressionadas na atualidade para controlar seus impactos ambientais e melhorar seu desempenho ambiental. Esta pressão ocorre pois este tipo de empresa é caracterizada, normalmente, com de alto potencial poluidor. Existem ferramentas que auxiliam na busca de melhorias ambientais, tais como o Sistema de Gestão Ambiental (SGA) e a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), porém elas apresentam dificuldades principalmente no diagnóstico da condição ambiental da empresa e de seu respectivo desempenho ambiental. Isto porque, estas ferramentas, chamadas de ferramentas de processo, dependem de ferramentas analíticas para mensurar esta condição ambiental. As ferramentas analíticas direcionam a tomada de decisão em relação a busca de melhorias. Porém, quando se fala em indústrias, não há um consenso na literatura sobre ferramentas analíticas adequadas para mensurar e avaliar o desempenho ambiental delas. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta analítica, chamada de EPIP (analytical tool for *Environmental Performance in Industrial Processes*), para calcular o desempenho ambiental de indústrias, como forma de auxiliar a tomada de decisão em busca de melhorias ambientais. A EPIP busca mensurar o desempenho ambiental de processos industriais através da análise econômica e ambiental dos aspectos ambientais levantados referentes ao processo em estudo. Esta ferramenta é composta por três variáveis principais, o Custo equivalente do aspecto ambiental ( $C_{AA}$ ), o Custo equivalente Total do aspecto ambiental ( $C_{AA}T$ ) e o Custo equivalente relativo do aspecto ambiental ( $CR\%$ ). A variável principal da EPIP, a  $C_{AA}$ , que mensura o desempenho de cada aspecto ambiental, é composta por outras oito variáveis, divididas no grupo de análise econômica, que são o Custo de Perda Material ( $CPM$ ), o Custo de Energia Consumida ( $CEC$ ), o Custo Destino Material ( $CDM$ ), o Custo de Gestão Localizada ( $CGL$ ), o Custo de Pesquisa e Desenvolvimento ( $CPD$ ), o Custo de Externalidades ( $CEx$ ), e o grupo de análise ambiental, que são o Impacto ambiental pelo Consumo de Emissão de Materiais ( $ICEM$ ) e o Impacto ambiental por Energia Consumida ( $IEC$ ). Após a construção da ferramenta, foi realizada a aplicação dela em três diferentes estudos de caso, sendo o primeiro para uma Indústria produtora de copos plásticos de PP de embalagem de iogurte, a segunda uma Indústria de fabricação de móveis planejados e a terceira uma Indústria de fabricação de luminárias Plafon. Os resultados da EPIP foram comparados com outras quatro ferramentas analíticas afim de se verificar o comportamento da EPIP em relação às outras ferramentas estudadas na revisão da literatura. Com a realização dos testes nos três estudos de caso, foi verificado que a ferramenta EPIP conseguiu mensurar o desempenho ambiental das indústrias estudadas com maior profundidade de análises do que as outras ferramentas estudadas.

Palavras-chave: EPIP, desempenho ambiental, processos industriais

## ABSTRACT

The industries are pressed currently to control their environmental impacts and improve its environmental performance. This pressure is because these companies show high pollution potential. There are several tools that aid in environmental improvements, such as the Environmental Management System (EMS) and the Environmental Performance Evaluation (EPE), but all of them have difficulties in the diagnosis of the environmental condition of the company and their respective environmental performance. This is because these tools called “procedural tools” require analytical tools to measure this environmental condition. These analytical tools are important because they guide the decision-making regarding the search for improvements. However for industry object, there is no consensus in the literature on appropriate analytical tools to measure and assess the environmental performance of them. In this context, this study aimed to develop an analytical tool, called EPIP (analytical tool for **E**nvironmental **P**erformance in **I**ndustrial **P**rocesses) to quantify the environmental performance of industries in order to assist decision making in search of environmental improvements. The EPIP tool uses two aggregate analyzes, economic and environmental impacts, to measure the environmental performance of industrial processes through the analysis of the environmental aspects related to the process. The EPIP comprises three main variables, equivalent cost of the environmental aspect ( $C_{AA}$ ), equivalent total cost of the environmental aspects ( $C_{AA}T$ ) and the equivalent relative cost of the environmental aspect ( $CR\%$ ). The  $C_{AA}T$  is the most important variable of the EPIP because it measures the performance of each environmental aspect in relation to other eight variables, divided into two groups, economic and environmental, that are Loss Material Cost (CPM), Cost of Energy Consumed (CEC), Material Destination Cost (CDM), Located Management Cost (CGL), Cost of Research and Development (CPD), Cost of Externalities (CEx), environmental impact by Material Consumption and Emissions (ICEM) and the environmental impact of energy consumed (IEC). It should be noted only that despite provisions of tool, CEx was not used in the case studies in this study because it was not obtained a reliable and objective way to measure it, featuring a limitation of EPIP. After construction of the tool, it was tested in three different case studies, the first being for a manufacturing of plastic cups for yogurt package, the second one designed furniture manufacturing and the third a manufacturing Ceiling light fixtures. The results of EPIP were compared with four other analytical tools in order to check the behavior of this tool over the other studied in the literature review. With the tests in the three case studies, it was found that EPIP tool measured the environmental performance of the industries studied in greater detail analysis than the other studied tools.

Keywords: EPIP, environmental performance, industrial processes

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A atividade industrial consome grande quantidade de recursos naturais e energia, causando pressão ao meio ambiente (DUFLOU *et al.*, 2012). A qualidade ambiental ainda é degradada pelas descargas de resíduos sólidos e líquidos advindos das operações industriais (PIZER *et al.*, 2011; KUMAR e PAL, 2013). Este tipo de atividade, independente do seu porte, emite quantidades significativas de Gases do Efeito Estufa (SEN *et al.*, 2015). Estima-se que as atividades de manufatura consumiram 37% da energia mundial produzida em 2012 (IEA, 2013) e liberaram 18% de gases do efeito estufa para a atmosfera no ano de 2010 (UNEP, 2012). Ou seja, a atividade industrial contribui de forma considerável para os níveis de poluição mundial no meio ambiente, tanto pelo consumo de recursos e ineficiência energética, como pela geração e liberação de poluentes.

Na contramão da geração de poluição, cientistas, governos e sociedade passaram, nos últimos anos, a pressionar por ações da indústria para à redução e manutenção de seus impactos ambientais (IA). Desta forma, a atividade industrial passou a ter que considerar como estratégia de mercado, e até como forma de sobrevivência, as exigências de consumidores, decisores políticos e empresas parceiras ambientalmente conscientes (CARVALHO *et al.*, 2014), das normas internacionais e legislações mais restritivas, e da própria competição de mercado. Para combater estas exigências, as empresas têm explorado estratégias de gestão ambiental baseadas em instrumentos administrativos voluntários (HERVA e ROCA, 2013). Estes instrumentos podem ser divididos em ferramentas de processos, que visam estruturar os procedimentos para ações de melhoria ambiental, como o Sistema de Gestão Ambiental (SGA) e a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), e as ferramentas analíticas, que auxiliam à tomada de decisão através da mensuração ou cálculo do desempenho ambiental da empresa, como os métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida de produtos (AICV) e os índices de desempenho ambiental.

As ferramentas de processo seguem o ciclo de melhoria contínua PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), sendo que o SGA, reconhecido como a ferramenta de processo mais utilizada entre as empresas para a busca de melhorias ambientais (CAMPOS *et al.*, 2015; DARNALL *et al.*, 2008), já se encontra bem estabelecida entre organizações dos mais diferentes tipos e tamanhos. Apesar disso, na etapa de

planejamento do PDCA das ferramentas de processo é realizado um diagnóstico ambiental da empresa através do mapeamento e mensuração de aspectos e de seus impactos ambientais significativos, ou seja, é realizado o cálculo da condição ambiental e conseqüente Desempenho Ambiental (DA) da empresa (JASCH, 2000). Os aspectos e impactos ambientais devem ser analisados para posterior elaboração de propostas de ação em busca de melhoria ambiental (ABNT, 2004a). Este conjunto formado pela medição, análise e proposição de ações é entendido como a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) (ABNT, 2004b). Nesse contexto, as ferramentas analíticas podem ser utilizadas dentro das ferramentas de processos, para facilitar à tomada de decisão por ações em busca de redução dos impactos ambientais e melhoria do DA (HÖJER *et al.*, 2008).

A forma utilizada para avaliar o DA de uma empresa é pelo uso de indicadores e/ou índices (ABNT, 2004b). Estes indicadores ou índices podem ser relacionados matematicamente, compondo ferramentas analíticas que possibilitam medir este DA (PEROTTO *et al.*, 2008). Dentre as ferramentas analíticas existentes, àquelas que são baseadas na Avaliação de Impactos Ambientais são as mais utilizadas, sendo citadas em diversos estudos científicos, como em Morón *et al.* (2009), Deng *et al.* (2013), Silva e Amaral (2009), Herva e Roca (2013), Rigamonti *et al.* (2014), dentre outros.

Apesar disto, quando se fala em avaliar o desempenho ambiental de empresas, este desempenho se encontra diretamente relacionado ao desempenho econômico (SILVA e AMARAL, 2009). Desta forma, alguns autores têm citado ferramentas analíticas que utilizam a Contabilidade de Custos Ambientais (CCA) para avaliar o desempenho ambiental em empresas, ou até mesmo a agregação da contabilidade e de ferramentas de avaliação de impactos ambientais nesta avaliação (FINNVEDEN e MOBERG, 2005; HÖJER *et al.*, 2008; AHLROTH, 2014).

Uma consideração sobre as ferramentas analíticas é que elas utilizam diferentes fatores de desempenho ambiental, tornando difícil compreender e traçar conclusões sobre qual seria o foco da ação a ser planejada para a melhoria ambiental (AHLROTH *et al.*, 2011). Por exemplo, se este foco seria atuar na melhoria dos efluentes, ou de determinado resíduo, ou até mesmo no consumo e ineficiência do processamento dos recursos. Como forma de facilitar interpretação de resultados para ajudar os decisores da empresa, muitas destas ferramentas tem adotado formas de agregação de dados, seja através da normalização ou da

ponderação de dados, para melhor ordenar os resultados da análise pela ferramenta (AHLROTH *et al.*, 2011; AHLROTH, 2014; AHLROTH e FINNVEDEN, 2011). Além disso, muitas destas ferramentas foram elaboradas para aplicações voltadas a objetos específicos, tais como produtos e serviços, substâncias, empresas, indústrias, regiões ou nações e políticas, planos e projetos (FINNVEDEN e MOBERG, 2005), porém podendo ser aplicadas a mais de um objeto de estudo.

Porém, quando se foca no objeto indústria para estudo, Silva e Amaral (2009) e Hermann *et al.* (2007) citaram a falta de uma ferramenta analítica de ADA específica para a tomada de decisão na busca de melhorias ambientais neste tipo de atividade. Nesse contexto, surgiram alguns questionamentos, tais como: **Quais são as principais ferramentas analíticas existentes de Desempenho Ambiental para auxiliar na tomada de decisão em busca de melhorias ambientais que são utilizadas no objeto indústria? Como deve ser e o que deve compor uma ferramenta analítica para avaliar o Desempenho Ambiental com foco em processos industriais? Quais são as limitações de parâmetros e de aplicabilidade de uma ferramenta para Desempenho Ambiental com foco no objeto processos industriais?**

Estas questões são debatidas nos Capítulos seguintes desta Tese com o objetivo de se obter uma Ferramenta Analítica para mensurar e, conseqüentemente, avaliar o Desempenho Ambiental em processos industriais como forma de auxiliar a tomada de decisão em busca de melhorias ambientais.

## 1.1 PROBLEMÁTICA, JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA TESE

Para um melhor diagnóstico e avaliação ambiental de indústrias, diversos cientistas e profissionais do mercado recomendam a utilização de ferramentas analíticas, pois facilitam o entendimento e avaliação dos sistemas econômicos, tecnológicos e ambientais, fornecendo a informação adequada nos processos de tomada de decisão (NILSSON *et al.*, 2008). Na literatura, várias ferramentas analíticas estão disponíveis para avaliar impactos ambientais de processos industriais (CARVALHO *et al.*, 2014) e também para avaliar o desempenho ambiental destas atividades (SILVA e AMARAL, 2009), porém com grande diversidade de abordagens. Por exemplo, a AICV é tradicionalmente usada para o objeto produtos (FINNVEDEN *et al.*, 2009), enquanto a Análise de Custo-Benefício

(ACB) Ambiental tem foco em políticas, planos e projetos (ATKINSON e MOURATO, 2008). Apesar disso, a AICV pode ser utilizada para avaliar políticas, planos e projetos, bem como a ACB pode ser utilizada para avaliar produtos (FINNVEDEN e MOBERG, 2005), porém provavelmente com resultados distintos entre as ferramentas quando usadas para o mesmo objeto.

Desta forma, um problema em destaque é que, para um mesmo objeto de análise, ferramentas diferentes costumam apresentar resultados distintos (SILVA e AMARAL, 2009). E isto ocorre mesmo que algumas ferramentas tenham sido criadas para atender o mesmo objeto de análise. Isto porque ferramentas diferentes para avaliar desempenho ambiental usam dados, fatores e também formas de agregação diferentes, resultando em diferenças nos resultados obtidos por elas (AHLROTH *et al.*, 2011), gerando dúvidas sobre qual seria a mais indicada ferramenta para determinado objeto em estudo (CARVALHO *et al.*, 2014).

Neste contexto, conforme o foco de interesse, é útil a proposição de ferramentas para assistir decisores para identificar áreas com necessidade de melhorias dentro da atividade, bem como avaliar a evolução do desempenho da atividade (CARVALHO *et al.*, 2014). Além disso, como é realizada a mensuração do desempenho ambiental para indústrias na atualidade, pode-se verificar que, independente do porte e condição financeira da indústria, existem dificuldades para se medir e avaliar o DA e, principalmente, interpretar as respostas dos indicadores de desempenho ambiental. Ou seja, é uma necessidade existente a construção de ferramentas analíticas que auxiliem na tomada de decisão e que forneçam resultados de fácil interpretação e aplicáveis para a indústria (AHLROTH *et al.*, 2011).

Desta forma, considerando o foco desta Tese na avaliação de desempenho ambiental em processos industriais, é relevante o estudo de forma exaustiva dos mecanismos adotados, tanto no passado como na atualidade, para se avaliar o desempenho ambiental de processos industriais, o levantamento de quais os critérios essenciais para a ADA em indústrias, o estudo de como organizar estes critérios em uma ferramenta analítica e como fazer com que os resultados de saída fornecidos por esta ferramenta sejam compreensíveis para o auxílio da tomada de decisão.

## 1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESES DE TRABALHO

O objetivo principal desta Tese foi propor uma ferramenta analítica para avaliar o desempenho ambiental em processos industriais, chamada de EPIP - *analytical tool for Environmental Performance in Industrial Processes* (Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais). Para atingir este objetivo principal, foi necessário o estabelecimento de alguns objetivos específicos, que foram:

- a) Analisar a aplicabilidade, pontos fortes e fragilidades de ferramentas analíticas existentes de avaliação de desempenho ambiental que possam ser utilizadas em processos industriais.
- b) Levantar os critérios a serem atendidos para considerar uma ferramenta analítica indicada a avaliar o desempenho ambiental em indústrias.
- c) Desenvolver uma nova ferramenta analítica que atenda os critérios levantados no item b.
- d) Aplicar a ferramenta analítica formulada e as outras ferramentas estudadas em diferentes processos industriais e analisar a variação de respostas através da análise de sensibilidade.

Para cada objetivo específico da Tese, foi necessário o estabelecimento de uma hipótese, as quais seguem:

- a) As ferramentas analíticas analisadas trarão conceitos e ideias adaptáveis a nova ferramenta proposta.
- b) Existe um número de critérios que, se analisados de forma agrupada, fornecem uma análise mais aprofundada que as análises atuais do desempenho ambiental em indústrias.
- c) É possível construir uma ferramenta analítica que atenda um maior número de critérios para uma ADA em indústrias do que as ferramentas existentes.
- d) A aplicação de uma nova ferramenta analítica mais robusta gera resultados de classificação de desempenho ambiental de aspectos ambientais a serem melhorados mais consistentes do que outras ferramentas analíticas utilizadas neste estudo.

### 1.3 LIMITAÇÕES DA TESE

Esta Tese teve como meta propor uma ferramenta analítica para ADA em processos industriais. Neste contexto, este trabalho buscou apresentar a dificuldade de avaliação de desempenho ambiental por ferramentas analíticas para o objeto indústria. Desta forma, os limites apresentados no desenvolvimento desta Tese foram:

- a) Os critérios estabelecidos para compor uma ferramenta analítica mais aprofundada foram definidos pelo próprio autor desta Tese, com base na abordagem das ferramentas já existentes, e também, de estudos da literatura com análise das ferramentas analíticas, devido não haver um consenso na literatura sobre os critérios a serem abordados por uma ferramenta analítica para DA em processos industriais.
- b) Apesar dos custos de externalidades terem sido levantados como um dos critérios para uma ADA mais aprofundada, não foi proposto na ferramenta uma equação específica para mensurar este parâmetro, dado que a valoração de externalidades é complexo e impreciso, com diferentes abordagens na literatura.
- c) A ferramenta analítica proposta foi testada para três diferentes atividades industriais, sendo necessário aplicá-la em outros ramos de atividade para verificar a eficiência desta ferramenta em outros casos de processos industriais.
- d) A ferramenta analítica proposta (EPIP) tem como limitação do sistema de aplicação a indústria em estudo, não avaliando o desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço fornecido pela indústria.

### 1.4 ESCOPO DA TESE

A estrutura textual desta Tese está dividida por Capítulos, conforme segue:

- a) Capítulo 1: o início da tese envolve uma introdução ao tema de estudo, na busca de questionamentos e caminhos de estudo. Este capítulo ainda aborda as hipóteses e objetivos da tese, os limites definidos para o estudo e o escopo do projeto de Tese.

- b) Capítulo 2: aborda a revisão da literatura, tratando da avaliação do desempenho ambiental e as formas para se realizar esta avaliação, principalmente pela avaliação de impactos ambientais e os custos ambientais. Na sequência faz-se uma descrição das ferramentas analíticas utilizadas para ADA em processos industriais, os métodos de agregação de dados e a análise de sensibilidade de ferramentas analíticas.
- c) Capítulo 3: trata da metodologia utilizada na Tese, descrevendo os métodos científicos definidos para este estudo e, também, as etapas de trabalho desenvolvidas para atingir os objetivos propostos.
- d) Capítulo 4: envolve a definição dos critérios a serem abordados para uma ADA mais aprofundada, uma análise das ferramentas já estudadas no Capítulo 2, em relação ao atendimento aos critérios definidos no início deste Capítulo. Por fim, faz-se um detalhamento das ferramentas com maior número de critérios atendidos encontradas na literatura para avaliar o DA em processos industriais.
- e) Capítulo 5: apresenta a ferramenta analítica proposta (EPIP – Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais), com a discussão e justificativa científica para sua construção.
- f) Capítulo 6: apresenta os resultados obtidos pela aplicabilidade da ferramentas para três atividades industriais distintas, sendo a primeira atividade relacionada a Fabricação de copos de polipropileno de embalagens de iogurte, a segunda relacionada a Fabricação de móveis planejados, e a terceira relacionada a Fabricação de luminárias tipo Plafon.
- g) Capítulo 7: apresenta as conclusões da Tese, as contribuições científicas obtidas, e as expectativas de trabalhos futuros a serem desenvolvidos nesta área de estudo.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

A avaliação do desempenho ambiental, no caso deste estudo focado em indústrias, é um tema complexo, dado que depende da definição e seleção de indicadores, ou da utilização de índices, ou até mesmo da utilização de ferramentas analíticas focadas em avaliar o DA. Um grande problema é que estes indicadores, índices e até mesmo ferramentas, possuem abordagens diferentes, considerando dados e formas de agregação diferentes, resultando em avaliações de desempenho ambiental diferentes, quando comparadas em uma mesma situação de análise, ou seja, em uma mesma indústria. Por isso, este Capítulo tem como interesse abordar temas relevantes que caminham pelas formas de se mensurar o desempenho ambiental em indústrias, tais como: a Avaliação de Desempenho Ambiental, a Avaliação de Impactos Ambientais, os Custos Ambientais, as ferramentas analíticas existentes para medir o DA que podem ser utilizadas pela indústria, e os métodos utilizados para agregar valores para construção de novas ferramentas.

### 2.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL NAS INDÚSTRIAS

A avaliação do desempenho ambiental é um instrumento de gestão importante nos dias de hoje para as indústrias, pois auxilia na identificação de atividades no processo industrial com os impactos ambientais mais significativos, possibilitando entender estes impactos e traçar ações em busca de melhoria ao longo do tempo (BSI, 2015). Esta avaliação utiliza as etapas do ciclo PDCA, conforme FIGURA 1. Para implementá-la, pode-se utilizar a norma NBR ISO 14031 como guia.

Conforme a ABNT (2004b), as etapas da ADA podem ser interpretadas como segue. Primeiramente, a etapa de Planejamento da ADA envolve a seleção dos indicadores a serem utilizados para avaliar o processo industrial. Estes indicadores podem ser baseados em medições diretas (por exemplo, tonelada de resíduo produzido.mês<sup>-1</sup>), medições indiretas (por exemplo, tonelada de resíduo produzido.lote produzido<sup>-1</sup>), agregado (que envolve a junção de mais de um indicador afim de facilitar a interpretação dos resultados de desempenho), e a ponderada (que é obtido através da agregação e distribuição de pesos entre indicadores para diferenciá-los por significância). Após a definição dos indicadores a

serem utilizados, segue-se com a etapa de Implementação pela coleta de *Inputs* para quantificar os indicadores escolhidos pela indústria, a análise, avaliação e comunicação dos resultados obtidos. Na etapa final, que envolve a checagem e ação na ADA, os resultados dos indicadores obtidos são interpretados com foco na busca de ações que visam melhorar o desempenho ambiental da indústria.



FIGURA 1 - Estrutura geral do Ciclo PDCA utilizado na Avaliação de Desempenho Ambiental.  
Fonte: ABNT (2004b)

Os Indicadores de Desempenho Ambiental (IDA) podem ser divididos em duas categorias diferentes, conforme a ABNT (2004b). A primeira categoria destes IDAs está dividida em dois grupos:

- a) Indicadores de desempenho de gestão (IDG), que fornecem informações sobre as práticas de gestão que influenciam no desempenho ambiental;
- b) Indicadores de desempenho operacional (IDO), que fornecem informações sobre as operações do processo produtivo que interferem no desempenho ambiental.

A segunda categoria compreende os Indicadores de Condição Ambiental (ICA) que fornecem informações sobre a qualidade do meio ambiente local. Estes dados são coletados levando em conta padrões e regras ambientais estabelecidos por leis e normas (ABNT, 2004b).

A seleção e escolha dos indicadores a serem utilizados pela indústria para avaliar o desempenho ambiental ficam a cargo da própria organização (ABNT,

2004b). A norma traz uma lista com mais de 100 tipos de indicadores para ADA possíveis nas duas categorias de classificação (CAMPOS *et al.*, 2015). Além disso, vários outros tipos de indicadores foram levantados e sugeridos, tanto por guias reconhecidos como o GRI (*Global Reporting Initiatives*), que é dito como o guia de diretrizes para indicadores de sustentabilidade, dentre os quais se encontra o pilar ambiental, mais conhecido e utilizado internacionalmente (ROCA e SEARCY, 2012; HOURNEAUX Jr. *et al.*, 2014), como por diversos estudos que visaram a revisão para a seleção em indústrias de indicadores de desempenho ambiental como Herva *et al.* (2011), Hourneaux Jr. *et al.* (2014), Issa *et al.* (2015), Campos *et al.* (2015), dentre outros. Desta forma, uma grande dificuldade ainda encontrada pelas indústrias é a seleção e implementação de indicadores para ADA, tanto pela falta de uma abordagem mais estruturada de indicadores para este fim (ISSA *et al.*, 2015), como pela falta de critérios disponíveis para selecionar indicadores apropriados para este caso (NIEMEIJER e DE GROOT, 2008).

Neste contexto, o uso de ferramentas analíticas combinadas propicia análises robustas e respostas mais coerentes do desempenho ambiental da organização (HERVA e ROCA, 2013). Além disso, esta combinação na forma de ferramentas auxilia e facilita os tomadores de decisão em busca de melhoria ambiental, pois torna os resultados do DA mais simples de serem interpretados e facilita o monitoramento dos resultados (SILVA e AMARAL, 2009). Nas ferramentas analíticas para o DA pesquisadas na literatura, duas áreas são recorrentes em utilização, a avaliação de impactos ambientais e a contabilidade dos custos ambientais. Nos próximos dois tópicos estas duas áreas são detalhadas.

## 2.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

A Avaliação de Impactos Ambientais pode ser definida como um procedimento que visa identificar, descrever, avaliar e desenvolver meios para reduzir impactos potenciais causados no meio ambiente por uma determinada atividade (UNEP, 2008). A expressão “AIA” pode ser utilizada em diferentes contextos, envolvendo variações no tempo, tanto passado, presente e futuro, e na abrangência, local, como uma empresa ou um empreendimento, regional, como Cidades e Estados, e global, estendendo-se a níveis continentais (NETO *et al.*,

2013). Neste contexto, metodologias e ferramentas envolvendo a AIA podem ser classificadas em quatro focos de utilização diferentes, conforme QUADRO 1.

<b>Foco das ferramentas de AIA</b>	<b>Descrição</b>
Avaliação ambiental estratégica	Busca identificar conseqüências ambientais futuras de planos, políticas ou programas com alto nível de incerteza.
Avaliação de dano ou passivo ambiental	Identifica conseqüências ambientais presentes ou passadas, ou seja, já existentes, de ações ou atividades que ocasionem algum tipo de impacto ambiental.
Avaliação de produtos, serviços ou de uma organização	Busca identificar e avaliar os impactos decorrentes de produtos, serviços ou do processo da empresa através de diferentes ferramentas.
Previsão de impactos potenciais	Envolve a previsão de impactos ambientais potenciais advindos de projetos ou empreendimentos, caso estes sejam efetivamente implantados.

QUADRO 1 - Diferentes focos de aplicação de ferramentas de AIA.

Fonte: NETO *et al.* (2013).

Para fins deste estudo, o foco de interesse é o de Avaliação de Produtos, Serviços ou de uma Organização. Conforme visto no QUADRO 1, o interesse da AIA voltada a produtos, serviços ou empresas é o de identificar, mensurar e avaliar os impactos ambientais do objeto de interesse, auxiliando decisores por definição de ações com a finalidade de mitigação destes impactos ao longo do tempo.

A AIA, como já comentado no Capítulo 1, é considerada uma ferramenta de processo, e pode ser colocada como uma ferramenta com um procedimento de aplicação já bem estabelecido, com etapas bem definidas. (FINNVEDEN e MOBERG, 2005; MORÓN *et al.*, 2009), sendo as principais etapas a seleção, que envolve a avaliação inicial das prováveis causas e localização de impactos ambientais; o escopo, que envolve a delimitação dos assuntos de interesse a serem abordados; a análise de impactos, que corresponde a mensuração e comparação dos impactos conforme o aspecto ambiental correspondente; a gestão e mitigação do impacto, que corresponde a tomada de ação após a classificação dos impactos ambientais; a revisão das ações propostas; a aprovação dos resultados das decisões tomadas; e o monitoramento destes resultados (WESTON, 2000). Apesar disso, um problema a ser considerado encontra-se nas etapas de seleção, escopo e análise dos impactos, dado que existem diferentes ferramentas analíticas, cada qual com diferentes abordagens, vantagens e desvantagens (CARVALHO *et al.*, 2014;

AHLROTH, 2014), e também devido a dificuldade de quantificar de forma precisa e ampla os impactos ambientais (DENG *et al.*, 2014).

Desta forma, um primeiro passo correspondeu a classificar as ferramentas analíticas com relação a alguns aspectos que delimitam o seu foco de aplicação. Segundo Finnveden e Moberg (2005), estas ferramentas analíticas podem ser classificadas em relação a três aspectos, sendo eles: quanto ao impacto considerado; quanto ao objeto de estudo; e quanto a situação real ou de previsão.

- a) Quanto aos impactos considerados: Se a ferramenta que considera recursos consumidos (*Inputs*) ou impactos ambientais de emissões (*Outputs*), ou ambos, e se também incluem aspectos econômicos na análise;
- b) Quanto ao objeto de estudo: Se a ferramenta tem como foco avaliar políticas, planos, programas ou projetos, regiões ou nações, organizações ou companhias, produtos ou serviços, e substâncias;
- c) Quando a situação real ou prevista: Se a ferramenta é usada com fins descritivos, ou seja, para avaliar a situação real do objeto de estudo de interesse (como ele se encontra no momento), ou com fins de mudanças orientadas, ou seja, para avaliar o impacto de mudanças planejadas, comparando as mudanças e definindo a melhor delas.

Carvalho *et al.* (2014) classificou as ferramentas analíticas em três diferentes grupos, em relação aos tipos de análises realizadas por elas:

- a) Ferramentas de indicador único: permitem avaliar os impactos ambientais de apenas um único ponto de vista, ou seja, por um único indicador, como a Pegada Ecológica (WACKEMAGEL e REES, 1996) que mede o impacto pelo uso do solo, e o IPCC 2013 (IPCC, 2013) que utiliza apenas o indicador de aquecimento global;
- b) Ferramentas de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida de produtos (AICV): foram criadas para avaliar impactos ambientais de uma forma mais ampla, ou seja, utilizando um grupo de indicadores que avaliam diferentes tipos de impactos ambientais, ao longo de toda a cadeia produtiva em que um produto ou serviço se insere. Porém também podendo ser utilizados restritas a apenas um processo industrial. Alguns exemplos são o Eco-indicator 99, o IMPACT2002+, o CML e o ReCiPe.
- c) Ferramentas aplicadas a processos industriais: são utilizadas com o objetivo de avaliar os impactos ambientais de processos industriais, sendo que o

limite de análise encontra-se na fronteira da indústria. Alguns exemplos são a Matriz de Riscos Ambientais, a análise *Input-Output* e a Contabilidade de Fluxos Materiais.

Tendo em vista ao exposto anteriormente, este estudo apresenta, segundo classificação de Finnveden e Moberg (2005), tem como foco ferramentas que consideram ambos os impactos ambientais (*inputs e outputs*) e dados econômicos, que possuem como objeto de estudo as organizações, e que são descritivas, e segundo Carvalho *et al.* (2014), ferramentas aplicadas a processos industriais.

### 2.3 CONTABILIDADE DE CUSTOS AMBIENTAIS (CCA)

A Contabilidade de Custos Ambientais pode ser definida como uma metodologia para quantificar os custos ambientais de processos de produção (JASCH, 2009; PAPASPYROPOULOS *et al.*, 2012). Os custos ambientais podem envolver custos internos e externos relacionados a danos causados ao meio ambiente e também a ações para proteção deste meio (JASCH, 2003). Estes custos ambientais também podem ser relacionados a danos causados ao homem, ao ecossistema e aos recursos.

Em uma visão mais ampla, os custos ambientais podem ser relacionados a quantificação monetária do balanço material e energético (análise de entrada e saída) (LAMBERTON, 2005), considerando as entradas de insumos, matérias prima e energia, o processamento destas, e as saídas na forma de produtos, co-produtos, emissões e resíduos (JASCH, 2009), os custos de proteção ambiental (JASCH, 2009; PAPASPYROPOULOS *et al.*, 2012), e os custos externos ou externalidades (NGUYEN *et al.*, 2012; JASCH, 2009; HERBOHN, 2005; BEER e FRIEND, 2006). Devido a distinção de áreas de atuação de custos ambientais, pode-se organizá-los em categorias de custo. Desta forma, pôde-se, através da revisão de diferentes estudos (ABNT, 2013; JASCH, 2009; BEER e FRIEND, 2006), organizar os custos ambientais em 6 categorias de custos, conforme segue:

- a) Custos de entradas materiais e saídas (produtos ou não produtos);
- b) Custos de energia para processamento;
- c) Custos de gestão, controle, tratamento e disposição de resíduos e emissões;
- d) Custos de gestão ambiental e prevenção a poluição;
- e) Custo de investimentos ambientais (pesquisa e desenvolvimento);

- f) Custos intangíveis (externalidades), incluindo o não atendimento legal e as partes interessadas e os custos do impacto ambiental.

Os custos de entradas materiais e saídas (produtos ou não produtos) representam àqueles custos levantados através do balanço material no processo produtivo. Ou seja, são todos os materiais que fazem parte do processo industrial, sejam estes materiais classificados como matérias prima ou insumos, tanto agregados ao produto como aqueles utilizados para fazer o processo funcionar (por exemplo, combustíveis, lubrificantes, água, dentre outros) (SILVA e AMARAL, 2009). Estes materiais devem ser contabilizados em unidades físicas (quantidades) e também em unidades monetárias, para posterior monetarização de todos os custos, podendo estes custos serem distribuídos por aspectos ambientais, por etapas do processo produtivo ou também como centros de quantidade, conforme estabelecido pela NBR ISO 14051 (ABNT, 2013).

Os custos de energia envolvem o levantamento da energia gasta para realizar um processo produtivo, dividindo este consumo de energia entre a energia realmente agregada ao produto e a energia desperdiçada no processamento (AHLROTH *et al.*, 2011). O consumo de energia pode ser distribuído de forma semelhante ao consumo de materiais, ou seja, por aspectos ambientais do processo, por etapas de processamento ou por centros de quantidade.

Os custos de gestão, controle, tratamento e disposição de resíduos e emissões compreendem o levantamento dos gastos que a empresa tem com a gestão de resíduos, sejam estes sólidos, líquidos ou gasosos. Estes custos podem envolver tanto atividades de reuso e reciclagem, como de tratamento e/ou disposição dos resíduos, interna ou externa (SILVA e AMARAL, 2009). Eles podem ser distribuídos por tipos de resíduos para gestão ou por aspectos ambientais.

Os custos de gestão ambiental e prevenção a poluição envolvem tanto os custos globais, ou seja, aqueles do processo total da indústria, como aqueles custos setorizados, ou seja, aplicados a determinadas partes do processo da indústria. Estes custos podem compreender os de implementação e manutenção de sistemas de gestão ambiental ou de outras metodologias para gestão ambiental, os custos obrigatórios para a empresa, tais como taxas ambientais e de licenciamento ambiental, e também os custos setorizados, tais como treinamentos de funcionários para uma área específica da empresa, instalação de softwares controladores, dentre outros custos (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2010).

Os custos de investimentos ambientais (pesquisa e desenvolvimento) podem ser ditos como aqueles valores que são gastos para a busca de melhorias em situações específicas da empresa. Por exemplo, quando se deseja estudar o produto da empresa para avaliar mudanças de composição, tipos e quantidades materiais, ou quando se deseja estudar o funcionamento de processos específicos dentro do ambiente de trabalho, com vistas à mudança do processo através do uso de maquinários mais modernos ou de técnicas mais eficientes de produção (SILALERTRUKSA *et al.*, 2012). A diferença principal entre os custos com investimentos ambientais e os custos de gestão ambiental e prevenção a poluição é que, para o primeiro tipo de custo (investimentos), tem-se como objetivo modificar processo e/ou produto através de sua modernização, normalmente pensando em novos processos ou novos produtos, já o segundo tipo de custo (gestão ambiental e prevenção a poluição) apresenta como objetivo principal controlar as atividades de rotina da empresa e, na medida do possível, buscar melhorias no exercício destas atividades, sem muitas vezes alterar o projeto do produto ou a estrutura de processo. Vale ressaltar que, tanto os custos de gestão ambiental, como os custos de investimentos resultam em valores negativos, ou seja, aspectos ambientais que estejam relacionados a estes custos, terão uma subtração destes custos em relação aos custos com materiais, energia, gestão, controle, tratamento e disposição, e externalidades. Isto ocorre, pois os custos de gestão ambiental e prevenção a poluição e de investimentos são considerados como valores que já estão sendo aplicados para a busca da melhoria de determinado aspecto ambiental, ou seja, demonstram que a empresa já está tomando ações para melhorá-los.

Já os custos intangíveis (externalidades) são relacionados a condições não valoráveis diretamente, tais como os custos da não prevenção do uso de água e energia, a diferença entre o uso de materiais renováveis e não renováveis, os riscos presentes para empresas que dispõe irregularmente seus resíduos e emissões, ou que não possuem condição regular de licença ambiental, e aquelas empresas que poluem o ambiente além dos limites legais e de padrões de seus *stakeholders* (EDENS e HEINS, 2013). As principais formas para valorá-los envolvem o uso da Análise de Custo-Benefício (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2010), o método de Transferência de Benefício (KARA *et al.*, 2007), o método Ecotax 2002, o método Ecovalue 08, o método Eco-cost 99 e o método EPS2000 (AHLROTH, 2014).

Apesar da existência de diferentes modelos para o cálculo destes custos, a valoração deles é um processo complicado, sendo que estes mais diferentes métodos citados no parágrafo anterior apresentam como principal limitação a subjetividade da análise. De acordo com Ahlroth *et al.* (2011), não existe clareza na forma de valorar estes custos, cabendo uma discussão em relação a colocação ou não deste parâmetro em análises de custos. Ou seja, no caso de análises com parâmetros mais objetivos de resultados, a introdução dos custos de externalidades, devido a subjetividade, podem influenciar negativamente nas respostas de modelos.

## 2.4 FERRAMENTAS ANALÍTICAS DE DESEMPENHO AMBIENTAL

Para este sub-título, foram consideradas como ferramentas analíticas de interesse para este estudo àquelas que podem ser utilizadas com escopo que abrange, segundo classificação de Finnveden e Moberg (2005), a análise de impactos ambientais e/ou a análise de dados econômicos, o objeto de estudo organizações (indústrias), e que são descritivas, e segundo Carvalho *et al.* (2014), ferramentas aplicadas a processos industriais. Nesse contexto, pode-se dizer que as principais ferramentas encontradas na literatura que podem utilizar esta delimitação são apresentadas no QUADRO 2.

A **MFCA** (ABNT, 2013) auxilia as organizações na compreensão das potenciais consequências ambientais e financeiras no uso de materiais e energia devido as suas práticas de trabalho, e na obtenção de oportunidades para melhorias tanto ambientais quanto financeiras através da visualização da distribuição dos custos ao longo de todo o processo. Esta ferramenta utiliza o fluxo material e energético na forma de representações financeiras. Ou seja, toda a análise de desempenho ambiental de um processo industrial é realizada através da contabilidade detalhada de gastos com entradas, tais como materiais, energia, água e demais componentes, e saídas como produtos primários, subprodutos, resíduos, efluentes e emissões, bem como os custos com mão de obra, taxas e impostos, e depreciação de equipamentos. As entradas de materiais no processo são classificadas como *positive products* e as saídas como *negative products* (FAKOYA e POLL, 2012), sendo que todos os itens levantados são transformados em unidades monetárias, para possibilitar uma visualização dos custos embutidos nos produtos e na perda de material (HYRŠLOVÁ *et al.* , 2011).

Nº	Identificação	Referência*	Descrição
1	Material Flow Cost Accounting (MFCA)	CHOMPU-INWAI <i>et al.</i> (2015), CHRIST e BURRITT (2015), SCHMIDT (2015)	Modelo de contabilidade de custos em fluxo material através do uso do balanço de massa e balanço de energia em um processo industrial.
2	Environmental Management Accounting (EMA)	JASCH (2003), BEER e FRIEND (2006), CHRIST e BURRITT (2015),	Ferramenta de contabilidade tradicional agregada ao balanço de massa.
3	Métodos AICV (avaliação do impacto do ciclo de vida)	CARVALHO <i>et al.</i> (2014), ELDUQUE <i>et al.</i> (2015), HERMANN <i>et al.</i> (2007), KIKUCHI <i>et al.</i> (2008),	Ferramenta de avaliação de impactos ambientais para o ciclo de vida de um produto através do uso de múltiplas categorias de impacto.
4	ACCV (Análise de Custo do Ciclo de Vida)	ONG <i>et al.</i> (2012)	Ferramenta de cálculo dos custos do ciclo de vida de um produto.
6	ACB (Análise de Custo Benefício)	MOLINOS-SENANTE <i>et al.</i> (2010)	Ferramenta de avaliação dos custos e benefícios de plano de projeto.
7	Análise de Significância de Aspectos e Impactos Ambientais (ASAIA) – FMEA para Risco	ZAMBRANO e MARTINS (2007), KANIA <i>et al.</i> (2014)	Ferramenta de análise de modo e efeito de falha para o cálculo de risco ambiental para severidade, abrangência, frequência e detecção.
8	Análise de Significância de Aspectos e Impactos Ambientais (ASAIA) – Ferramenta Matriz de Risco Ambiental	SLATER e JONES (1999)	Ferramenta de análise de risco ambiental através da utilização de pesos de severidade, frequência e abrangência de aspectos e impactos ambientais.
9	Análise de Significância de Aspectos e Impactos Ambientais (ASAIA) – Ferramenta Cloquel-Ballester	CLOQUELL-BALLESTER <i>et al.</i> (2007)	Ferramenta de análise de significância de AIA pela ponderação de sinal, magnitude, acumulação, duração, reversibilidade, sinergismo, mitigação, periodicidade, relação causa-efeito e extensão espacial.
10	RIAM (Matriz Rápida de Avaliação de Impactos)	PASTAKIA e JENSEN (1998)	Ferramenta de análise de risco ambiental por de matriz de avaliação com ponderação de impactos para magnitude, permanência, reversibilidade e cumulatividade.
11	Pegada Hídrica**	CHAPAGAIN e ORR (2009)	Ferramenta de análise do uso e consumo de água em nações, regiões ou organizações.
12	Pegada Ecológica**	HERVA <i>et al.</i> (2012)	Ferramenta de impacto ambiental pelo uso do solo no consumo de recursos e saída de emissões.
13	Energia Cumulativa**	FRISCHKNECHT <i>et al.</i> (2003)	Ferramenta para analisar o balanço de entrada e saída de energia de processos industriais.
14	Análise Exergética**	MOYA <i>et al.</i> (2013)	Ferramenta de análise do balanço de exergia (energia disponível)
15	Análise Emergética**	ODUM (1996)	Ferramenta de análise de entrada e saída do uso de SEJ (joules de energia solar) para avaliação de desempenho de processos.

QUADRO 2 - Ferramentas analíticas para avaliação de desempenho ambiental que podem ser aplicadas à indústria, levantadas na pesquisa da literatura. \* Referência de estudos que utilizaram a ferramenta analítica aplicada para avaliar o desempenho de processos industriais. \*\* Ferramentas que são de indicador único, porém encontram-se na relação de ferramentas para avaliar o desempenho ambiental de indústrias, pois foram utilizadas de forma combinada com outras ferramentas.

FONTE: O Autor (2014).

A **EMA** (JASCH, 2003) corresponde a uma abordagem combinada da contabilidade financeira tradicional e do balanço de massa afim de desagregar a representação dos custos com foco no aumento da eficiência do uso de materiais e redução de impactos ambientais, riscos ambientais e de custos com a proteção do meio ambiente. Desta forma, esta ferramenta contabiliza os custos de disposição de resíduos e tratamento de emissões, os custos de prevenção e gestão ambiental, os custos de perdas materiais e os custos de processamento das perdas materiais, tais como de depreciação de equipamentos e com mão-de-obra (SILVA e AMARAL, 2009).

A **Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida de produtos**, ferramenta baseada na Avaliação de Impactos Ambientais embutida na metodologia de ACV, tem como propósito analisar os resultados obtidos na fase anterior da ACV, chamada de Análise de Inventário (ICV), e relacioná-los às categorias e aos indicadores dos potenciais impactos gerados. Durante esta fase é realizada uma avaliação dos impactos potenciais associados às entradas e saídas do sistema. A AICV caracteriza-se como um método para mensurar os impactos ambientais através da identificação e descrição, quantitativa e qualitativa, em relação a energia e materiais, bem como as emissões e os resíduos gerados para o meio-ambiente (LIU *et al.*, 2010). De acordo com Finkbeiner *et al.* (2006), a avaliação é feita a partir da visão sistêmica e da perspectiva do deslocamento de uma carga ambiental entre estágios do ciclo de vida identificando pontos negativos e a possibilidade de se evitá-los. Isto permite a estimativa dos impactos ambientais cumulativos resultantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, muitas vezes incluindo impactos não considerados em análises mais tradicionais (GIANNETTI *et al.*, 2008).

A análise da origem dos materiais e tipos de energia utilizadas, a disposição final dos produtos fabricados, os subprodutos e resíduos dos processos, bem como as consequências das emissões para o meio ambiente pela produção de um bem ou serviço é de fundamental importância para que o processo seja gerenciado em prol da sustentabilidade, sendo a AICV uma ferramenta que permite o desenvolvimento de forma sistemática desse tipo de análise e, portanto, a base de apoio à tomada de decisão dos gestores (MOURAD *et al.*, 2002; STANO, 2008; JESWANI *et al.*, 2010).

A **Análise de Custos do Ciclo de Vida (ACCV)** (HÖJER *et al.*, 2008; FINNVEDEN e MOBERG, 2005; ONG *et al.*, 2012) pode ser definida como uma ferramenta econômica para avaliar os custos de um item (produto ou serviço) ao

longo de sua vida útil. A ACCV envolve o levantamento dos custos de capital, que contabiliza a área utilizada para produção, a construção civil da planta industrial e os equipamentos e instrumentos requeridos nesta planta, os custos de operação, contabilizado através do uso de mão-de-obra, o uso de insumos, água e energia e os gastos com tratamento de emissões, os custos de manutenção, contabilizado pelos custos de manutenção de equipamentos, instrumentos e da própria instalação da planta industrial, os custos de matéria prima, contabilizado pela aquisição de matérias prima para produção do produto de interesse em análise, os valores recuperados, contabilizado pelos valores econômicos de sobras de componentes e ativos da planta industrial após corrida a vida útil da análise, e os créditos de co-produtos, contabilizados pela venda de co-produtos que são gerados ao longo do processo de fabricação do produto principal (ONG *et al.*, 2012). É uma ferramenta voltada para produtos e serviços, a serem avaliados por um período de tempo pré-estabelecido (vida útil de avaliação) (FINNVEDEN e MOBERG, 2005), porém pode ser aplicada como uma ferramenta para avaliar o desempenho de uma empresa.

A **Análise de Custo-Benefício (ACB)** é uma ferramenta analítica utilizada para avaliar o custo benefício de planos e projetos (FINNVEDEN e MOBERG, 2005). Na área ambiental, a ACB é utilizada para valorar economicamente externalidades, que correspondem aos chamados custos sociais ou externos, ou seja, àqueles que são considerados sem valor de mercado (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2010).

O **ASAIA** corresponde ao levantamento dos aspectos ambientais de uma organização e a análise do impacto ambiental através de sua mensuração de significância deste impacto, normalmente de uma forma quali-quantitativa. Os aspectos ambientais podem ser ditos como os processos de uma empresa, bem como seus produtos e serviços, os quais apresentam uma interação com o meio ambiente e geram impactos. Já o impacto ambiental refere-se às mudanças neste meio devido a atividades, produtos ou serviços de uma organização (ABNT, 2004a). A identificação dos aspectos e impactos ambientais dentro de uma organização pode ser descrita como o ponto-chave para o diagnóstico ambiental da empresa e a avaliação de seu desempenho ambiental. Na ASAIA, a mensuração dos impactos ambientais é realizada pela utilização de fatores que buscam representar o potencial do impacto ambiental. Estes fatores, bem como a sua classificação e ponderação, variam conforme o modelo adotado para avaliar a significância de aspectos e impactos, como pôde ser visto no QUADRO 2. Estes métodos utilizam fatores que

buscam representar a condição do nível de impacto de determinado aspecto ambiental relacionado ao processo industrial, sendo que os fatores variam em escalas de classificação qualitativas, tal como Alto, Médio ou Baixo, e esta classificação é revertida para um valor. Por exemplo, 5 para Alto, 3 para Médio e 1 para Baixo. O resultado da significância é obtido pela soma ou pela multiplicação de todos os fatores, para cada impacto analisado, conforme definido pelo método utilizado.

O método da **Pegada Hídrica** corresponde a um indicador que corresponde a avaliação do consumo de água doce para produzir bens e serviços para uma dada população ou uma atividade (HERVA *et al.*, 2011). Pode-se dizer que o indicador de pegada hídrica nada mais é do que uma especificidade da Pegada Ecológica.

O método de **Pegada Ecológica** (WACKERNAGEL e REES, 1996) determina o espaço requerido para suportar o funcionamento de uma determinada atividade através da contabilização de área necessária para produzir recursos para abastecer a atividade e a área necessária para absorver os resíduos produzidos por esta atividade. Ou seja, a pegada ecológica avalia o impacto ambiental através da quantidade de área consumida, ou de uso do solo, em hectares equivalentes globais (gha). Um de seus focos consiste em avaliar a relação entre área consumida por determinada atividade e a biocapacidade desta área, afim de se verificar o nível de sustentabilidade da área em estudo. A biocapacidade corresponde à quantidade de recursos e assimilação de emissões possíveis por uma determinada área. O método da pegada ecológica possibilita avaliar o impacto ambiental de sistemas como pessoas, empresas, regiões e de países, e avaliar o desempenho ambiental pelas mudanças no nível de biocapacidade do sistema em estudo.

O método da **Demanda Cumulativa de Energia** (NUCCI *et al.*, 2014) corresponde a uma tematização da avaliação do impacto do ciclo de vida para energia. Ou seja, através deste método, são quantificados os impactos ambientais de processos ou produtos, através da utilização de sete categorias de impacto, as quais incluem a energia não renovável de combustíveis fósseis, energia não renovável nuclear, energia não renovável de biomassa, energia renovável de biomassa, energia renovável solar, eólica e geotérmica e energia renovável da água.

A **Análise Exergética** caracteriza-se pela avaliação da magnitude da potência mecânica máxima disponível em um sistema e também a parcela perdida durante processos físico-químicos (KOTAS, 1995). Já o termo Exergia é definido

como a quantidade máxima de trabalho mecânico internamente reversível, disponível em fluxos materiais e de energia para seu deslocamento de um estado de desequilíbrio, seja físico ou químico, para um estado padrão (BEJAN, 1988; KOTAS, 1995; ROSEN e DINCER, 1999). OMETTO (2005) comentou que esta análise utiliza os princípios da conservação de massa e energia atrelados a Segunda Lei da Termodinâmica, podendo ser aplicado tanto na análise de sistemas energéticos, como de processos produtivos e no ciclo de vida de produtos. Para realizar a Análise Exergética afim de valorar impactos ambientais e medir o desempenho ambiental de um processo industrial, é quantificada a exergia química específica de cada substância e a quantidade em massa de cada substância utilizada neste processo, obtendo-se o valor de perda de energia total que ocorreu pelas emissões geradas na realização do processo industrial e que poderiam ser convertidas em trabalho mecânico (OMETTO, 2005).

A **Análise Emergética** (ODUM, 1996) pode ser definida como uma análise de energia pela quantificação de valores utilizados de recursos econômicos e da natureza através de uma base comum chamada de joule de energia solar (sej). A Emergia é definida como a energia solar disponível utilizada na realização de uma atividade, tal como um serviço, processo ou produto, seja seu uso direto ou indireto, podendo também ser considerada como a memória de energia ou a energia total incorporada nesta atividade (ODUM, 1996). Para realizar esta análise, os recursos que abastecem a realização do serviço, processo ou produto são todos transformados em uma unidade comum (sej), pelo uso da transformidade ( $\text{sej}\cdot\text{J}^{-1}$ ). Depois os valores obtidos são somados para a obtenção do sej total do sistema. A medida do desempenho ambiental pela Análise Emergética é obtida através da quantificação do total de joule de energia solar utilizado na realização da atividade, podendo ser utilizado alguns outros indicadores presentes na ferramenta.

Na revisão da literatura também foram encontradas ferramentas analíticas que utilizavam a combinação de duas ou mais das ferramentas do QUADRO 2. Estas combinações normalmente ocorriam através da utilização de métodos multicritérios de apoio a decisão (MCAD), tais como AHP, Lógica Fuzzy e ELECTRE. As ferramentas combinadas citadas por estudos que as utilizaram para avaliação do desempenho ambiental industrial, atendendo ao escopo já definido no início deste sub-título, são apresentadas no QUADRO 3.

Nº	Identificação	Referência*
1	Modelo de Cercal - Modelo de priorização de resíduos na indústria (Combinação Análise de Custos, Análise de Risco e Facilidade de Minimização)	CERCAL (2000), TIMOFIECSYK (2001), SOLYON (2009)
2	MECAIA - Modelo econômico de controle de avaliação de impactos ambientais (Combinação <i>Activated-Based Costing</i> e Balanço Material e Energético)	KRAEMER (2002)
3	MAICAPI - Modelo para avaliação de impactos e custos ambientais em processos industriais (Combinação EMA e Análise de Risco Ambiental por escores de frequência e severidade)	SILVA e AMARAL (2009)
4	Combinação Pegada Ecológica e <i>Energy and Material Flow Analysis</i> (EMFA)	HERVA <i>et al.</i> (2012)
5	ECEC ( <i>Ecological Cumulative Exergy Consumption</i> ) – Combinação Análise Emergética e ACCV	YANG <i>et al.</i> (2015)
6	Combinação MFCA e AICV	BIERER <i>et al.</i> (2015)
7	EIO-LCA ( <i>Economic Input-Output – Life Cycle Analysis</i> )	Green Design Initiative (2002), HEIJUNGS <i>et al.</i> (2013)

QUADRO 3 - Ferramentas analíticas combinadas para análise de desempenho ambiental em processos industriais.

Fonte: O Autor (2014)

O **Modelo de Cercal** (2000) apresenta uma análise de fluxos materiais por balanço de massa, em que as quantidades e custos são mensurados nos processos industriais para avaliar o desempenho econômico de resíduos, além de uma análise de risco dos resíduos para avaliar o desempenho na gestão de riscos, e uma análise de facilidade de minimização de resíduos para avaliar àqueles de maior grau de capacidade de minimização por mudanças em materiais, processos ou maquinário.

O modelo **MECAIA** (KRAEMER, 2002) foi desenvolvido para ter sua aplicação realizada junto a implementação de um SGA baseado no BSC (*Balanced Score Card*) Ambiental. Este modelo utiliza o balanço de massa, o consumo setorizado de energia, e os custos relativos ao uso de materiais, uso de energia, custos operacionais, custos de mão de obra, custos de manutenção e também os de investimentos em melhorias ambientais, para um processo fabril. Para isso, são mapeadas todas as etapas de processo da empresa, com suas respectivas entradas e saídas de quantidades materiais e de energia por etapa de processo. Na sequência, são levantados os custos com mão-de-obra, depreciação mecânica de máquinas, energia elétrica, material de consumo e de manutenção, transporte interno, utilização de vapor e utilização de ar comprimido aplicados para cada etapa do processo da empresa. Também são levantados os gastos econômicos no investimento para melhorias ambientais. Todos os valores levantados são

cadastrados em uma planilha de dados coletados. A somatória de todos estes custos produz o resultado de desempenho ambiental para cada aspecto ambiental. Desta forma, os aspectos ambientais de pior desempenho ambiental são aqueles que possuem os maiores custos.

O **MAICAPI** (SILVA e AMARAL, 2006) é uma metodologia utilizada para avaliação de impactos e custos ambientais em processos industriais. Nesta metodologia, existe o modelo de mensuração do desempenho ambiental e econômico adotado. Este modelo utiliza-se de duas avaliações para medir o desempenho ambiental, sendo estas a avaliação ambiental e a avaliação econômica. Na primeira avaliação, para cada aspecto ambiental, é mensurada a gravidade (classificada com valores/pesos de 1 à 4) do impacto e a frequência de ocorrência (classificada com valores/pesos de 1 à 5). Os valores de gravidade e frequência de ocorrência são multiplicados, obtendo-se a pontuação do efeito ambiental. A segunda avaliação envolve a mensuração dos custos de operação dos processos, os custos de gestão dos resíduos, sejam estes sólidos, líquidos ou gasosos, e os custos de medidas de prevenção ambiental adotadas pela empresa. Estes custos são somados para obter o valor econômico de determinado aspecto. Este modelo não faz a integração das respostas da avaliação ambiental e da avaliação econômica, cabendo aos gestores esta interpretação e avaliação.

A combinação **Pegada Ecológica e EMFA (*Energy and Material Flow Analysis*)** (HERVA *et al.*, 2012) utiliza-se de duas ferramentas de análise ambiental afim de avaliar o desempenho ambiental de um processo industrial. A ferramenta possui como característica a transformação dos dados desagregados de fluxos materiais e energéticos em uma unidade de medida única para fins de avaliação (em gha, global hectare). Desta forma, os resultados obtidos podem ser utilizados para o auxílio na tomada de decisão, podendo estes resultados serem distribuídos para análise em relação a cada tipo consumo de recursos e para tipo de emissão de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, como uma análise desagregada.

O **ECEC** (YANG *et al.*, 2015) é uma ferramenta ainda em desenvolvimento que, até o momento possui respostas de saída agregadas, afim de comparar diferentes processos em relação a produtos com funções semelhantes. Ou seja, ainda há a necessidade de estudos futuros em relação a análise distribuída por fluxos materiais (YANG *et al.*, 2015), dado que a ferramenta tem um foco inicial para analisar o ciclo de vida em busca de melhorias.

A combinação **MFCA e AICV** (BIERER *et al.*, 2015) caracteriza-se como uma ferramenta em desenvolvimento e que tem como principal objetivo a simulação conjunta da MFCA e AICV para avaliar os efeitos econômico e ecológico do ciclo de vida ampliado de produtos e/ou sistemas de produção no contexto de sustentabilidade para auxiliar a tomada de decisão. Sua característica é de fracionar o processo industrial em estudo em fluxos materiais, porém, sua proposta inicial baseia-se em análises separadas, obtendo duas respostas de saída, uma para a MFCA e outra para a AICV, cabendo aos decisores interpretar as respostas em busca de melhorias.

A **EIO-LCA** (GREEN DESIGN INITIATIVE, 2002) é uma ferramenta que combina os fluxos de entrada e saída econômicos e a categorização de impactos ambientais da AICV. Seu principal objetivo é transformar as etapas do ciclo de vida em estudo em saídas monetárias, para serem comparadas em relação aos gastos, sendo sua contabilidade de entradas e saídas organizada em matrizes ou tabelas. Desta forma, sua aplicação visa comparar o desempenho econômico-ambiental de produtos diferentes, conforme a unidade funcional definida para o cálculo.

## 2.5 AGREGAÇÃO POR NORMALIZAÇÃO E PONDERAÇÃO DE DADOS

As ferramentas analíticas precisam produzir resultados em uma forma compreensível e de fácil interpretação, quando se fala em auxiliar tomadores de decisão de empresas a definir por planos de ação em busca de melhorias ambientais (AHLROTH *et al.*, 2011). Apesar disso, sabe-se que diferentes ações realizadas por empresas podem gerar variados impactos no meio ambiente, sendo estes impactos medidos por diversas ferramentas, as quais normalmente utilizam análises com resultados extensivos e diversificados (AHLROTH, 2014). Ou seja, não é adequado e aplicável se ter uma ferramenta analítica em que seus resultados sejam complexos e de difícil interpretação, quando o público alvo para utilização da ferramenta são tomadores de decisão que se encontram nas mais diferentes empresas. Desta forma, é necessário que os dados de saída, ou indicadores de saída, presentes na ferramenta analítica que se deseja utilizar possam ser agrupados, afim de produzir respostas de saída da ferramenta analítica mais simplificadas e, conseqüentemente, mais compreensíveis para a tomada de decisão.

Um grande problema a ser resolvido para possibilitar a agregação de dados encontra-se na variedade de unidades de medida presentes entre os dados de saída das ferramentas analíticas. Por exemplo, dois indicadores comuns utilizados como resposta de saída de ferramentas analíticas na AIA são kg equivalente de CO<sub>2</sub>, para aquecimento global, e kg equivalente de SO<sub>2</sub>, para acidificação do solo. Como agregar estes dois indicadores em um único indicador de saída para ser interpretado? Para isso, existem diferentes formas de agregação de dados, podendo ocorrer através da utilização da normalização de dados, dos métodos de ponderação, tais como os métodos multicritérios de apoio a decisão, e métodos de valoração, normalmente relacionados a valoração econômica (AHLROTH *et al.*, 2011). Nos próximos parágrafos do texto, são detalhados os métodos de normalização e de ponderação de dados. Os métodos de valoração econômica não são detalhados neste tópico, pois já foram descritos no item 2.3 deste capítulo.

A normalização pode ser definida como um procedimento que converte dados caracterizados (indicadores dimensionais) em unidades adimensionais ou idênticas através da relação do dado caracterizado com um banco de dados externo ou de benchmarking (normalização externa) ou com dados de diferentes alternativas produzidas (normalização interna) (HEIJUNGS *et al.*, 2007). Na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a normalização é uma forma de calcular a magnitude dos resultados de indicadores de saída relativamente ao indicador de referência (dado caracterizado), podendo ser realizada através de três diferentes metodologias. A primeira metodologia obtém a normalização pelos dados totais de entradas e saídas de uma área pré definida, como o globo terrestre, uma região, um país ou um local de interesse. A segunda metodologia utiliza a mesma ideia de dados totais para uma área, porém estes dados são ajustados para uma base per capita ou outra similar. Por fim, a terceira metodologia utiliza dados de entrada e saída de um cenário de referência definido. Pode-se dizer que a primeira e segunda metodologias são ditas como a normalização externa e a terceira como a normalização interna.

A normalização externa relativa a área de referência (área em que ocorre o impacto ambiental) pode ser dita como a forma mais utilizada de normalização em estudos de avaliação de impactos ambientais, principalmente pela ACV de produtos (ROGERS e SEAGERS, 2009), sendo que sua fórmula geral de cálculo é apresentada na Equação (1). Nesta equação,  $N_i$  corresponde ao resultado

normalizado do indicador de categoria  $i$ ,  $C_i$  o resultado do indicador de categoria  $i$  obtido após a implementação da ferramenta analítica de avaliação de impactos ambientais, e  $R_i$  o valor do indicador de categoria para o sistema de referência, também chamado de fator de normalização (KIM *et al.*, 2013).

$$N_i = \frac{C_i}{R_i} \quad (1)$$

Pode-se dizer que a normalização, tanto interna como externa, possui como principal vantagem a possibilidade de agregar resultados dentro de um indicador geral de resposta de saída (HEIJUNGS *et al.*, 2007). Esta agregação facilita a comparação de resultados e o histórico de desempenho ambiental através da avaliação de impactos ambientais. Porém, percebe-se como grande desvantagem o risco do dado normalizado enfatizar para mais ou para menos determinada categoria de impacto, distorcendo o resultado final do indicador geral (SEPPALA *et al.*, 2001). Por exemplo, se a área a ser utilizada para a normalização possui altas emissões para aquecimento global, possivelmente o fator de normalização para aquecimento global desta área será alto, e conseqüentemente o resultado do indicador de aquecimento global pode ser mascarado (ROGERS e SEAGER, 2009). Nestes casos de maior ou menor consideração de determinada categoria de impacto devido a distorções de fatores de normalização provocadas por interferências da área de normalização, pode-se utilizar a ponderação das categorias de impacto, por exemplo, através de métodos multicritérios (DOMINGUES *et al.*, 2015).

A ponderação de dados nas ferramentas de análise de sistemas ambientais, segundo Ahlroth *et al.* (2011), Rowley *et al.* (2012) e Finnveden (1999), pode ocorrer através de três grupos de métodos diferentes, conforme QUADRO 4. Vale ressaltar que para Ahlroth *et al.* (2011), Finnveden *et al.* (2009) e Rowley *et al.* (2012), a família de métodos de procuração possui, além do método de Escores *Ad-hoc*, o método de indicadores em unidades físicas, tais como TMR (material total requerido), energia requerida e pegada ecológica. Apesar disto, este método não foi considerado como método de ponderação, pois pode-se dizer que ele apresenta-se limitado em escopo por apenas um número restrito de tipos de impactos ambientais, tais como o uso do solo ou o consumo de recursos (CARVALHO *et al.*, 2014) e não

possui efeitos de ponderação entre categorias, sendo considerado como método de caracterização e não de ponderação (FINNVEDEN, 1999).

Família de métodos	Tipos de métodos
Métodos de procuração	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escores <i>Ad-hoc</i></li> </ul>
Método de distância-alvo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de distância-alvo</li> </ul>
Método de ponderação por julgamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Ad-hoc</i> por avaliação de especialistas ou de <i>stakeholders</i></li> <li>• Análise multicritério</li> </ul>

QUADRO 4 - Famílias de métodos e os tipos de métodos de ponderação de dados utilizados por ferramentas de avaliação de impactos ambientais.

Fonte: Ahlroth *et al.* (2011).

O método de procuração por Escores *Ad-hoc* pode ser dito como a forma mais simples de ponderação de dados por métodos não monetários (AHLROTH, 2014). Isto porque este método utiliza para avaliar os impactos ambientais uma escala de valores, afim de classificar a severidade, a abrangência e a frequência de ocorrência deste aspecto (CLOQUELL-BALLESTER *et al.*, 2007). Ou seja, estes métodos são equivalentes aos métodos de análise de significância de aspectos e impactos ambientais, como nas ferramentas de Pastakia e Jensen (1998), Slater e Jones (1999), Cloquell-Ballester *et al.* (2007) e Zambrano e Martins (2007). Pode-se dizer que a ponderação por Escores *Ad-hoc* é simples de ser implementada na avaliação de impactos ambientais, porém pode produzir uma classificação subjetiva, dado que é realizada pela empresa que está implementando o método. Ou seja, o método pode tornar-se vulnerável a erros à medida que a empresa precisa julgar para classificar na análise da significância dos impactos ambientais.

O método de distância-alvo consiste em avaliar a capacidade do meio ambiente receptor sustentar uma mudança provocada por um impacto ambiental (SOARES *et al.*, 2006). Pode-se dizer também que este método tem relação com a obtenção de pontuações derivadas de metas externas, ou seja, de condições alvo do meio ambiente (ROWLEY *et al.*, 2012), tais como um alvo de nível crítico ou de nível sustentável (FINNVEDEN, 1999). A ponderação deste método ocorre da relação entre o nível de determinada emissão em uma área geográfica e o nível considerado (valor alvo) para aquela área (SOARES *et al.*, 2006). Desta forma, o fator de ponderação por distância-alvo segue a Equação (2), sendo  $w_i$  o fator de ponderação da categoria de impacto  $i$ ,  $A_i$  a situação atual da categoria de impacto  $i$ , e  $T_i$  o alvo referência para a categoria de impacto  $i$ .

$$w_i = \frac{A_i}{T_i} \quad (2)$$

Um ponto a se considerar neste método é que sua resposta não fornece qualquer informação de relação entre as categorias de impacto. Ou seja, diferentes alvos não são ponderados uns contra os outros (FINNVEDEN *et al.*, 2002). Desta forma, pode ocorrer de impactos globais serem considerados de menor importância do que impactos locais/regionais. Assim, o método distância-alvo é mais adequado para avaliar a importância de uma determinada categoria de impacto, ao invés de avaliar a importância relativa entre categorias de impacto (SOARES *et al.*, 2006).

Por fim, os métodos de ponderação por julgamento podem ser aplicados de duas diferentes formas: *Ad-hoc* por especialista e Análise multicritério. No método *Ad-hoc* por especialistas, pessoas são convidadas para atribuir pesos as categorias de impacto ambiental. As pessoas que participam da pesquisa podem ser especialistas, leigos ou *stakeholders*, a coleta de informações pode ocorrer através do uso de questionários, entrevistas ou debates em grupo, e os resultados da ponderação obtida por ocorrer por consenso do grupo ou pelo uso da análise estatística (ROWLEY *et al.*, 2012).

Já a ponderação pela análise multicritério é considerada a mais utilizada na avaliação de impactos ambientais, pois possibilita enfatizar valores de escolha (SOARES *et al.*, 2006), sendo de fácil adaptação a diferentes situações e condições do ambiente de avaliação. Esta análise agrupa um conjunto de métodos, chamados de métodos multicritérios de apoio a decisão, que foram criados para trabalhar com problemas caracterizados por múltiplos objetivos (AHLROTH *et al.*, 2011). Devido a importância da análise multicritério como mecanismo de ponderação de valores, seus métodos são mais detalhados no item 2.6.

## 2.6 MÉTODOS MULTICRITÉRIO PARA APOIO A DECISÃO (MCAD)

Muitas vezes, existem situações na gestão ambiental que variam conforme a decisão tomada pela empresa. Por exemplo, pode-se distinguir os materiais e energia escolhidos para abastecer um processo de uma empresa nas classes renovável ou não renovável. Outro exemplo é que na gestão dos resíduos, a empresa pode optar por destinar seus resíduos para aterros, ou procurar alternativas

para reciclá-los ou reduzi-los. Estas decisões tomadas pela empresa refletem em diferentes níveis de impacto ambiental, porém, possuem dificuldades de uma valoração exata de importância entre categorias de impactos ambientais, conforme a situação analisada. Neste contexto, a utilização de métodos multicritérios de apoio à decisão (MCAD) servem para obter elementos de respostas às ações de um decisor ao longo de um processo qualquer (GOMES *et al.*, 2004).

Os métodos multicritérios de apoio à decisão (MCAD) surgiram com a finalidade de fornecer ao agente decisor todo o suporte necessário no processo de decisão, deixando claros os elementos de decisão e também as consequências de cada decisão (CAMPOS, 2011). Os MCAD mais comuns para utilização vem de linhas de pesquisa das Escolas Americana e da Francesa, sendo estes métodos descritos através do QUADRO 5.

O método mais utilizado no meio acadêmico e empresarial é o AHP (LOPES, 2008). Além disso, considerando o fluxo de decisão estruturado por Leite e Freitas (2012) (FIGURA 2), percebe-se que para a condição de critérios/alternativas comparáveis e com organização hierárquica ou que se enquadrem na Escala de Saaty, o método mais indicado é o AHP.

<b>Método</b>	<b>Descrição</b>
<i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP)	Este método utiliza a comparação paritária de critérios, considerando quais são os critérios de maior importância e qual a proporção desta importância (GOMES, 2009)
<i>Analytic Network Process</i> (ANP)	Este método corresponde a uma extensão do AHP e baseia-se na análise em rede para obter a prioridade relativa de diversas alternativas em uma decisão (YANG e TZENG, 2011). Nele não se utiliza a hipótese de independência entre alternativas, como é feito no AHP (MAJOR e BELDERRAIN, 2008).
ELECTRE ( <i>EL</i> imination <i>Et</i> <i>Choix Traduisant la RE</i> alité)	Este método está baseado nos conceitos de concordância e discordância. Na concordância é mensurada a vantagem de uma determinada alternativa perante as outras. Já na discordância, mede-se a desvantagem de uma alternativa em relação as demais (OLSON, 1996). Ou seja, este método possibilita a ordenação das alternativas, porém ele não fornece o desempenho global das alternativas (SALOMON <i>et al.</i> , 1999).
PROMETHEE ( <i>Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations</i> )	Este método busca construir uma relação de sobreclassificação de valores (VINCKE, 1992), sendo que o decisor deve estabelecer os critérios e seus pesos de importância (ALMEIDA e COSTA, 2002).

QUADRO 5 - Principais Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão e breve descrição.  
Fonte: Adaptado pelo Autor de Leite e Freitas (2012).

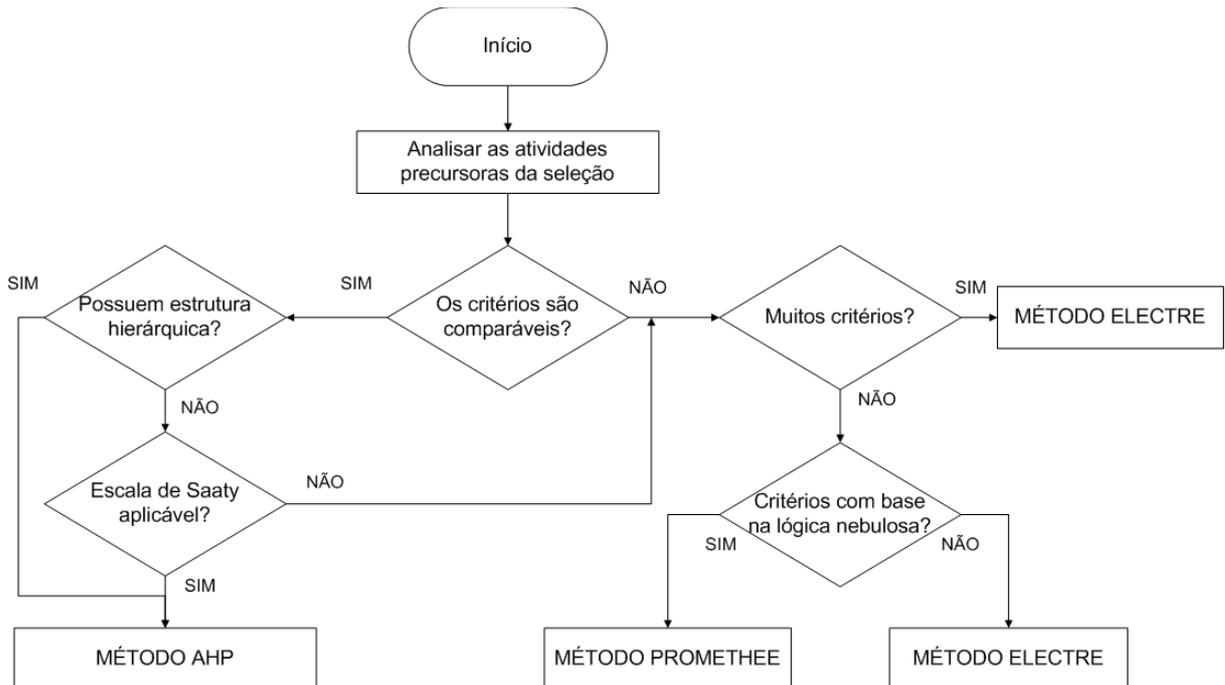


FIGURA 2 - Fluxo de decisão de escolha de MCAD mais adequado para determinadas condições. Fonte: (LEITE e FREITAS, 2012).

### 2.6.1 Método AHP (Análise Hierárquica de Processo)

O método AHP trabalha na decomposição da complexidade e na divisão do problema de decisão em fatores, sendo que estes podem ser fracionados a níveis ainda menores, estabelecendo as relações entre estes fatores (MARINS *et al.*, 2009). A Análise Hierárquica de Processo pode ser dividida em três etapas para sua realização, sendo a Construção de hierarquias, a Definição de prioridades e a Consistência lógica (COSTA, 2002).

A **Construção de hierarquias** envolve a estruturação de níveis hierárquicos, o que facilita a melhor compreensão e avaliação do mesmo. Nesta etapa, a meta da decisão, os critérios e as alternativas devem ser estruturados na forma de hierarquia (MARINS *et al.*, 2009), sendo o primeiro nível o da meta, o segundo os critérios e terceiro as alternativas, conforme FIGURA 3 (VILAS BOAS, 2006). Esta organização hierárquica possibilita ao decisor uma visão geral do sistema, de seus componentes e suas interações (BORNIA e WERNKE, 2001).

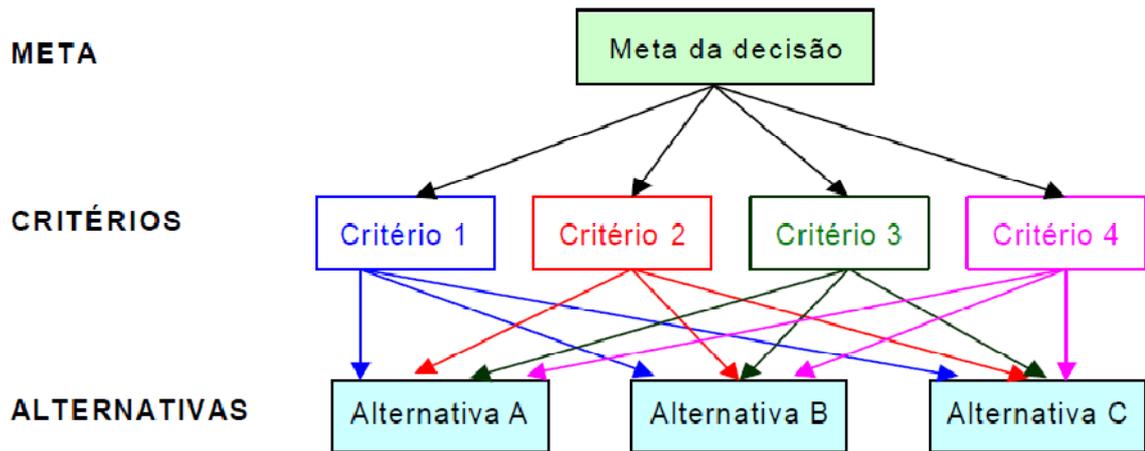


FIGURA 3 - Modelo de organização hierárquica realizada na etapa de construção de hierarquias do AHP.

Fonte: (VILAS BOAS, 2006)

Na segunda etapa, o da **Definição de prioridades**, ocorre os julgamentos paritários dos elementos para um nível hierárquico. Estes julgamentos são realizados comparando os pares em relação a um nível de importância, seguindo a Escala de Saaty, conforme QUADRO 6.

A partir dos julgamentos realizados para os elementos é possível construir a matriz quadrada de julgamentos  $A_{n,n}$ , sendo que  $n$  corresponde ao número de elementos, conforme FIGURA 4.

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos elementos são de igual importância.	Ambos elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões.

QUADRO 6 - Escala numérica de Saaty.

Fonte: SAATY (2000)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & \\ \vdots & \vdots & 1 & \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

FIGURA 4 - Modelo de matriz quadrada de julgamentos dos elementos em análise.  
Fonte: Katayama *et al.* (2005).

Após a construção da matriz quadrada de julgamentos, é realizada a normalização desta matriz. Isto ocorre pela soma dos elementos de cada coluna da matriz quadrada de julgamentos e posterior divisão de cada valor alocado na coluna pelo valor da soma da coluna correspondente. Na sequência, é realizado o cálculo das prioridades médias locais (PML), o qual ocorre pela obtenção das médias das linhas da matriz normalizada. Por fim, é realizado o cálculo das prioridades globais (PG), que corresponde a obtenção de um vetor de prioridades que armazena a prioridade de cada alternativa em relação a meta (MARINS *et al.*, 2009).

A última etapa de implementação da AHP refere-se a **Consistência lógica**. Nesta etapa, é calculada a Razão de Consistência dos julgamentos, denotada por  $RC = IC/IR$ , onde  $IR$  é o Índice de Consistência Randômico obtido para uma matriz recíproca de ordem  $n$ , com elementos não-negativos e gerada randomicamente. O Índice de Consistência ( $IC$ ) é dado por  $IC = (\lambda_{\text{máx}} - n)/(n-1)$ , onde  $\lambda_{\text{máx}}$  é o maior autovalor da matriz de julgamentos (TREVIZANO e FREITAS, 2005). Para que os julgamentos sejam considerados consistentes o valor de  $RC$  deve ser menor ou igual a 0,10 (SAATY, 2000).

## 2.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A Análise de Sensibilidade (AS) busca estimar a influência que determinadas variáveis de entrada têm em relação a variáveis de saída em um modelo matemático (MAY *et al.*, 2003; ONG *et al.*, 2012). Outra interpretação é que a AS busca determinar o nível de correlação entre estas variáveis de entrada e as variáveis de saída (HAMBY, 1994; FRUGOLI *et al.*, 2015). Desta forma, os métodos possíveis de serem utilizados na AS podem ser divididos em três diferentes grupos, conforme Frey e Patil (2002):

- a) Métodos Matemáticos: Avaliam a sensibilidade da variação de uma resposta de saída do modelo para uma variação definida do parâmetro de entrada. Normalmente são utilizadas para os casos em que são analisados um número limitado de parâmetros de entrada. Podem ser citados a Análise de Sensibilidade Local, a Análise de Sensibilidade Diferencial e o Índice de Sensibilidade.
- b) Métodos Estatísticos: Avaliam a sensibilidade da variação de várias entradas em relação a distribuição de várias saídas. Estes métodos permitem identificar os efeitos das interações de múltiplas entradas, e podem ser utilizados para modelos, em que o número de entradas é alto, tais como modelos matriciais. Exemplos dos métodos estatísticos são os Coeficientes de Correlação, a Análise de Regressão, a Análise de Variância, a Árvore de Classificação e Regressão e o Índice Sobol.
- c) Métodos Gráficos: Avaliam a sensibilidade através de formas gráficas, tabelas ou superfícies. Estes métodos podem ser utilizados como métodos complementares aos métodos matemáticos ou estatísticos, devido possibilitarem visualizar o comportamento de variação de um grupo de saídas em relação a um grupo de entradas. Exemplos destes métodos são o Gráfico de Dispersão e a Análise de Sensibilidade Condicional.

Quando se busca comparar o resultado de diferentes métodos em relação a uma situação de análise, pode-se utilizar o Coeficiente de Correlação para quantificar o nível de correlação entre variáveis de entrada pré-definidas e as respostas de saída de cada ferramenta (HAMBY, 1994; FREY e PATIL, 2002).

O nível de correlação entre variáveis de entrada e saída de uma ferramenta analítica pode ser quantificado por diferentes métodos, tais como o coeficiente de correlação de Pearson, utilizado quando os dados no modelo seguem uma distribuição normal (SALTELLI, 1990), e o coeficiente de correlação de Spearman, utilizado para medidas não paramétricas, ou seja, apropriado para os casos em que os dados da ferramenta não seguem uma distribuição normal de probabilidades (SALTELLI, 1990; FRUGOLI *et al.*, 2015). Para a condição de dados não paramétricos, o coeficiente de correlação de Spearman pode ser calculado, conforme Equação (3).

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i}{n^3 - n} \quad (3)$$

Nesta Equação (3),  $r_s$  é o coeficiente de correlação de Spearman entre as variáveis de entrada e saída da ferramenta,  $d_i$  é a diferença entre os postos das variáveis de entrada e saída, conforme ordenação da menor para a maior  $i$ , e  $n$  o número total de pares de dados das variáveis. Os valores do coeficiente de correlação de Spearman pode variar de -1 até +1, sendo -1 para uma correlação negativa ou inversa e +1 para uma correlação positiva ou direta. Assim, para  $r_s \geq 0,7$  a correlação é considerada alta ou forte, para  $0,4 \leq r_s < 0,7$  a correlação é considerada média, e para  $r_s < 0,4$  a correlação é baixa ou fraca (FRUGOLI *et al.*, 2015).

Observa-se que, quando se utiliza o coeficiente de correlação de Spearman, é necessário realizar o teste de significância de correlação. Neste teste, são consideradas duas hipóteses, sendo a hipótese nula, em que  $r_s = 0$ , e a hipótese alternativa, em que  $r_s \neq 0$ . Para se testar estas hipóteses, é necessário calcular o  $t_0$ , conforme Equação (4), e compará-lo com o valor de  $t(gl)$ . Observa-se que  $gl = n - 2$ , para o  $\alpha$  escolhido na tabela de distribuição t de Student, obtendo-se através desta tabela o valor de  $t(gl)$ . Para estes estudo, foi utilizado  $\alpha = 0,05$ , conforme recomendação de Zar (1999).

$$t_0 = r_s \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r_s^2}} \quad (4)$$

Desta forma, se  $t_0 > t(gl)$ , ou se  $t_0 < -t(gl)$ , rejeita-se a hipótese nula, indicando que aquele determinado parâmetro influencia a resposta de saída da ferramenta. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade, considerando que não a influência do parâmetro de entrada analisado em relação a saída da ferramenta.

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

O Capítulo 3 tem por objetivo explicitar a metodologia de construção e aplicação da EPIP (Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais). No caso da elaboração de formulações matemáticas (modelos), faz-se necessário o atendimento a alguns estágios de desenvolvimento da ferramenta. Christofolletti (1999) definiu os seguintes estágios para a construção de modelos matemáticos que, quando adaptados ao objeto de interesse (proposição da EPIP), são: (1) a Especificação do Problema, (2) Estudo e detalhamento da literatura em relação a ferramentas correlatas a que está sendo proposta, (3) Construção do equacionamento matemático da ferramenta proposta, (4) Aplicação em três diferentes indústrias parceiras (Estudos de Caso), e (5) a Análise de Sensibilidade e a Análise Final da EPIP pós aplicação. Neste contexto, este capítulo buscou abordar o detalhamento das etapas de construção da EPIP, da simulação da ferramenta em estudos de caso, da análise de sensibilidade da ferramenta e da análise final após aplicação.

### 3.1 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DA EPIP

O processo de proposição da EPIP seguiu os cinco estágios adaptados de Christofolletti (1999), sendo seu detalhamento apresentado no fluxograma da FIGURA 5.

As etapas de Especificação do Problema (1º Estágio) e Estudo da Literatura (2º Estágio) foram realizadas através da pesquisa em bases científicas como a *web of science* e *science direct*, com o propósito de delimitar o Problema, definido como “Propor uma ferramenta analítica completa para avaliar o desempenho ambiental em processos industriais para auxiliar a tomada de decisão em busca de melhorias ambientais”, e de encontrar o que já foi produzido cientificamente nesta área de interesse. Este detalhamento do 1º e parte do 2º estágios já foi realizado nos Capítulos 1 e 2 desta Tese. Desta forma, os estágios 2º ao 5º são detalhados nos itens 3.1.1 à 3.1.4 deste Capítulo.

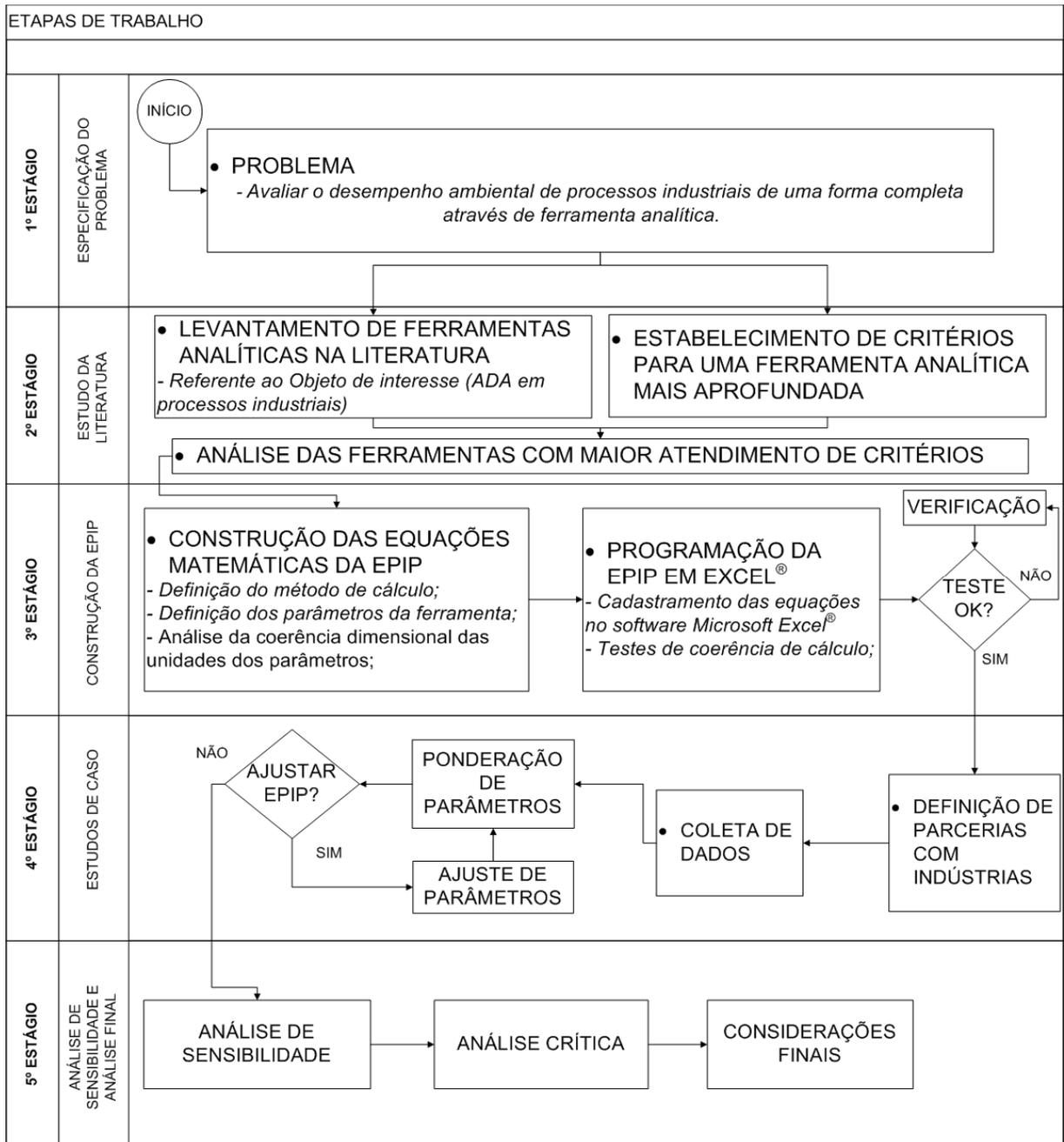


FIGURA 5 - Fluxograma das etapas de trabalho para a construção da EPIP (Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais).

Fonte: O Autor (2015)

### 3.1.1 2º Estágio - Estudo da Literatura

O estudo da literatura foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foi realizada a pesquisa bibliográfica em bases científicas, conforme já mencionado, para levantar quais eram as ferramentas analíticas de desempenho ambiental existentes que já tinham sido utilizadas para avaliar este desempenho em processos industriais, e como estas ferramentas estavam estruturadas.

Após o levantamento das ferramentas analíticas, foi realizada uma proposição dos critérios a serem considerados para avaliar o desempenho ambiental em um processo industrial. Esta proposição foi obtida através da investigação de duas diferentes fontes:

- a) Levantamento dos critérios considerados em cada uma das ferramentas analíticas já levantadas na revisão da literatura;
- b) Levantamento dos critérios considerados pela norma ISO 14.031:2004 (ABNT, 2004b), e pelo *Global Reporting Initiative* (GRI, 2015).

Nota-se que a definição da norma NBR ISO 14.031 e das diretrizes da GRI se deram, pois estas duas referências são consideradas as mais utilizadas mundialmente para obtenção de indicadores de desempenho ambiental (SCIPIONI *et al.*, 2008; HOURNEAUX Jr. *et al.*, 2014), indicadores estes que servem de base para as ferramentas analíticas focadas em desempenho ambiental.

A análise dos critérios levantados das ferramentas analíticas e da norma NBR ISO 14.031 e das diretrizes da GRI, possibilitou a construção de uma lista de nove critérios, os quais representam àqueles considerados essenciais para serem avaliados por uma ferramenta analítica de desempenho ambiental com foco no objeto processos industriais.

Na sequência, foi realizada a análise de todas as ferramentas levantadas na literatura e apresentadas nos QUADROS 2 e 3, com relação ao número de critérios propostos atendidos. Após esta análise, foram definidas as ferramentas existentes com maior abrangência de critérios, sendo estas ferramentas selecionadas para realização de comparação de resultados de simulação com a ferramenta EPIP, proposta nesta Tese.

### 3.1.2 3º Estágio - Construção da EPIP

O processo de construção do equacionamento matemático da EPIP levou em consideração as ferramentas com maior número de critérios abordados obtidas da análise realizada e apresentada no Capítulo 4, bem como os nove critérios considerados essenciais para proposição de uma ferramenta mais aprofundada de avaliação de desempenho ambiental em processos industriais.

Além disso, outros dois pontos considerados para esta construção da ferramenta, foram a busca de um equacionamento matemático que priorizasse

*Inputs* acessíveis para serem obtidos pelas indústrias e a obtenção de respostas de saídas agregadas, afim de facilitar a interpretação e tornar mais objetivo a tomada de decisão pelos aplicadores da ferramenta.

Neste contexto, o primeiro passo para a elaboração da EPIP foi a definição do método de cálculo a ser utilizado para organização dos parâmetros. Foi verificado pela revisão da literatura que o método de cálculo predominante entre as ferramentas para ADA em processos industriais foi o de equacionamento algébrico, como pode ser visto em ferramentas como AICV, Análise de Risco Ambiental e Contabilidade Ambiental (CARVALHO *et al.*, 2014; HÖJER *et al.*, 2011; FINNVEDEN e MOBERG, 2005). Algumas abordagens também utilizam métodos estocásticos como Cadeia de Markov e Análise de Monte Carlo, para avaliar o desempenho ambiental através de dados de incerteza (SHOKRAVI *et al.*, 2014). Desta forma, foi adotado como o método de cálculo para a EPIP o método de sistema de equações algébricas, com organização matricial, devido ao maior número de dados a serem analisados.

Em um segundo passo, foram definidos os parâmetros principais para compor a EPIP. A avaliação de desempenho ambiental tem como característica uma análise detalhada da atividade em estudo, afim de encontrar de forma específica e pontual quais os itens da atividade são os mais críticos em relação ao desempenho ambiental. Neste contexto, foi definido como organização de dados para análise pela ferramenta o formato de aspectos ambientais, conforme a NBR ISO 14001 (ABNT, 2004a). Além disso, foi considerado para o cálculo a ser realizado pela EPIP os fluxos materiais e energéticos, os custos ambientais e também a avaliação de impactos ambientais.

Os custos ambientais considerados abrangeram os seis tipos de custos ambientais levantados na revisão da literatura, possibilitando a construção de seis variáveis de custos, as quais definiram a chamada análise econômica da EPIP. Já na avaliação de impactos ambientais, foram definidas duas variáveis, a de análise de impactos por materiais, e a de análise por impactos com energia, definindo a chamada análise ambiental da EPIP.

As equações de quantificação dos seis custos ambientais propostos foram construídas pelo balanço material e de energia em relação a cada aspecto ambiental. Já as equações de quantificação das duas variáveis da análise ambiental

foram construídas através da análise crítica dos seis métodos de Análise do Impacto do Ciclo de Vida mais utilizados reportados na literatura.

Na análise ambiental, as variáveis foram construídas considerando os indicadores de categorias de impacto, os fatores de caracterização de impacto, os fatores de normalização da categoria de impacto, e os fatores de ponderação das categorias de impacto ou das categorias de danos ambientais. As categorias de impacto da análise ambiental foram selecionadas, considerando os impactos potenciais existentes para uma dada indústria, sendo eles relacionados ao consumo de recursos naturais, e também pelas emissões sólidas, líquidas e gasosas derivadas da ineficiência de processamento de materiais e energia.

Além disso, como forma de ponderar as categorias afim de ajustar a simulação as condições ambientais locais em que a indústria se encontra, foi utilizado o método multicritério AHP para quantificar os valores dos fatores de ponderação de danos para aplicação nos estudos de caso do Capítulo 6. O primeiro passo da ponderação pelo AHP foi a definição do número de categorias de danos a serem analisadas. No segundo passo, foi realizada a análise comparativa de importância, ou seja, os julgamentos de importância entre categorias de danos, conforme a escala de Saaty (SAATY, 2000). Foi escolhida a ponderação por fatores de danos por considerar um conhecimento limitado das condições de meio ambiente de entorno para as empresas utilizadas nos estudos de caso. Ressalta-se que pode ser utilizada a ponderação por categorias de impacto, desde que se conheça com detalhes a importância de cada categoria de impacto em relação a área de estudo.

No terceiro passo, foi realizada a análise de consistência dimensional das variáveis elaboradas para composição da EPIP. Esta análise foi realizada pela avaliação de cada variável em relação às unidades de medida de entradas, às operações matemáticas realizadas para o cálculo da variável e à unidade de medida de saída, considerando que operações de soma e subtração podem ser realizadas apenas para elementos com igual dimensão de medida.

Por fim, após os ajustes das variáveis para obtenção da consistência dimensional, foram realizados o cadastramento das equações construídas para a ferramenta no software Microsoft Excel<sup>®</sup> e a organização da interface usuário-ferramenta em relação a inserção dos *Inputs* e a obtenção dos resultados de simulação.

### 3.1.3 4º Estágio - Estudos de Caso e Análise de Sensibilidade

No quarto estágio de construção da EPIP, foi realizado o levantamento de atividades industriais com possibilidade e disponibilidade de aplicação da ferramenta em Curitiba e Região Metropolitana. Este levantamento levou em consideração os critérios a serem atendidos:

- a) Pessoal de referência/Contato já existente na empresa, seja por conhecimento próprio ou indicação;
- b) Pré-disposição e interesse das empresas contatadas;
- c) Dados existentes para entrada no modelo, dado que a empresa precisa ter uma organização mínima de dados para que seja possível utilizar a EPIP;
- d) Facilidade de obtenção dos dados e disponibilização destes para os testes;
- e) Acesso a visitas a empresa para análise das condições de campo e confirmação de coerência dos dados obtidos nos registros da empresa, bem como obtenção de dados normalmente não presentes em registros da empresa, como modelo e potência de máquinas, formas de segregação e misturas de resíduos, volumes de reciclo de efluente, dentre outros dados.

As atividades industriais consideradas viáveis para realização da aplicação da EPIP, conforme os critérios anteriores, foram:

- I. Fabricação de copos plásticos de polipropileno para acondicionamento de lácteos fermentados (iogurte).
- II. Fabricação de móveis planejados em MDF.
- III. Fabricação de luminárias tipo Plafon.

A coleta dos dados nestas indústrias foi realizada através da utilização de um formulário base a ser preenchido através do banco de registros da empresa e das visitas de campo, afim de se construir o inventário de dados da indústria.

Após o preenchimento dos dados nos formulários, estes foram transpostos para o Microsoft Excel® para realização dos testes e análise dos resultados de saída. Além disso, estes dados coletados em campo foram cadastrados em outros três arquivos do Microsoft Excel® que continham os cadastros das ferramentas ASAIA, MFCA e Modelo de Cercal. Os cadastros destas ferramentas foram realizadas pelo próprio autor desta Tese, conforme estudo das ferramentas. A ferramenta AICV não foi cadastrada em um novo arquivo do Microsoft Excel®, pois foi utilizado o próprio cadastro da AICV realizado na EPIP.

Com todos os dados cadastrados nas ferramentas, foram realizadas as simulações para obtenção dos resultados da classificação dos aspectos ambientais, sendo os maiores valores referentes aos aspectos de pior desempenho ambiental.

Com os resultados obtidos para cada estudo de caso, foi possível realizar a comparação dos resultados das ferramentas e analisar as diferenças de respostas entre elas através da utilização do Coeficiente de Correlação de Spearman. Com estes resultados, foi possível traçar conclusões sobre o desempenho e amplitude da EPIP em relação as outras ferramentas.

#### 3.1.4 5º Estágio - Análise Final (Pós Aplicação)

No último estágio fez-se a análise dos resultados obtidos pela EPIP em relação aos resultados obtidos pelas outras ferramentas de comparação (MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal). De acordo com os resultados obtidos, foi possível avaliar a diferença entre as ferramentas, bem como os motivos para diferença de resultados entre elas, traçando as conclusões sobre o desempenho da EPIP em relação as outras ferramentas.

A comparação e avaliação das diferenças de resultados foi realizada pela comparação da sequência de classificação dos aspectos ambientais de cada ferramenta e também a sensibilidade das respostas de saídas obtidas através da correlação com parâmetros de entrada que envolvem os critérios definidos como essenciais para uma avaliação de desempenho ambiental robusta, conforme é visto no Capítulo 4.

## CAPÍTULO 4 - CRITÉRIOS PARA O DESEMPENHO AMBIENTAL EM PROCESSOS INDUSTRIAIS E ANÁLISE CRÍTICA DE FERRAMENTAS ANALÍTICAS

Neste Capítulo, inicialmente foi realizado o estudo da literatura para a definição dos critérios de atendimento a serem abordados por uma ferramenta analítica de desempenho ambiental em processos industriais, afim de considerá-la como uma ferramenta mais aprofundada, mais robusta.

Primeiramente, vale ressaltar que em relação a estes critérios de atendimento, não há uma definição universal entre órgãos normativos, organizações internacionais, e pesquisadores, sobre os critérios a se considerar para avaliar o DA de forma quantitativa de um processo industrial, mas sim diferentes abordagens para realizar esta avaliação.

A ISO 14031:2004, considerada como a norma mais adotada para avaliar o desempenho ambiental de empresas através de múltiplos indicadores (SCIPIONI *et al.*, 2008), considera como principais critérios para determinar aspectos ambientais significativos e, conseqüentemente, avaliar o DA, o uso de material e energia, as emissões liberadas, os riscos e possibilidade de incidentes, a condição do meio ambiente e o atendimento a requisitos legais e outros regulamentos exigidos por partes interessadas (ABNT, 2004b).

A *Global Reporting Initiative* (GRI), diretriz internacional mais amplamente utilizada pelas empresas para divulgar o nível de sustentabilidade delas (MARIMON *et al.*, 2012; ALLAZANI e WAN-HUSSIN, 2013; HOURNEAUX Jr. *et al.*, 2014), compondo este nível a avaliação de desempenho ambiental através de múltiplos indicadores, considera como principais critérios para avaliar o DA o uso de material e energia, as emissões liberadas e seus destinos, o impacto ambiental gerado, o atendimento a requisitos legais, a qualidade de produtos e serviços e os custos de ações já tomadas para prevenção a poluição (GRI, 2015).

Em estudos que se basearam na utilização de ferramentas analíticas, foi verificado o uso por diversos autores da Avaliação de Impactos Ambientais para avaliar o Desempenho Ambiental de indústrias (ZOBEL *et al.*, 2002; NUCCI *et al.*, 2014; ELDUQUE *et al.*, 2015; HERVA e ROCA, 2013). Outros também citaram o uso da análise de risco ambiental como forma de mensurar este DA (CLOQUEL-BALLESTER *et al.*, 2007). Vale ressaltar que esta análise de risco ambiental pode

ser realizada através da análise de impactos ambientais que já estão ocorrendo, ou seja, avalia-se o risco potencial ao ambiente, ao homem e ao uso de recursos, normalmente realizada por ferramentas de AICV, ou através da análise de impactos ambientais potenciais, que poderão ocorrer devido a possibilidade de acidentes ambientais, tais como vazamentos, explosão, derramamentos, dentre outros. Como o segundo tipo de análise de risco ambiental corresponde a uma previsão de eventos, ou seja, possíveis eventos futuros, e o desempenho ambiental envolve uma avaliação do passado e do presente, será considerado que a análise de risco ambiental para desempenho ambiental está envolvida na avaliação de impactos ambientais. Os custos ambientais também foram utilizados em alguns trabalhos, tais como em SILVA e AMARAL (2009), dado que é recomendado considerar os custos ambientais na ADA (ABNT, 2004b; GRI 2015).

Neste contexto, foi considerado neste estudo que uma ferramenta analítica mais robusta para avaliar o DA em um processo industrial deve atender aos seguintes critérios:

- I. Considerar quantitativo de *inputs-outputs* de materiais (balanço material);
- II. Considerar quantitativo de *inputs-outputs* de energia (balanço de energia);
- III. Considerar quantitativo de emissões liberadas (sólidas, líquidas ou gasosas) e destinos;
- IV. Considerar a Avaliação de Impactos Ambientais;
- V. Considerar Custos Ambientais (Material, Energia e Emissões);
- VI. Considerar os Custos de Externalidades;
- VII. Considerar o atendimento legal e aos requisitos de *stakeholders*;
- VIII. Considerar a condição do meio ambiente de entorno. (Multicritério no modelo)
- IX. Considerar medidas já tomadas de prevenção a poluição (Custos de Investimento e/ou de adoção de ferramentas de processo para gestão ambiental, ou Redução de impacto ambiental por medidas tomadas).

Com a definição dos critérios, foi realizada a análise de atendimento dos critérios pelas ferramentas levantadas nos QUADROS 2 e 3 (Capítulo 2). Desta forma, foi possível elaborar um quadro comparativo destas ferramentas em relação ao atendimento aos critérios, dividindo as ferramentas em 2 grupos (Grupo 1 - Ferramentas Analíticas Não Combinadas; Grupo 2 - Ferramentas Analíticas Combinadas), conforme QUADRO 7.

<b>Grupo 1</b> <b>Ferramentas Não Combinadas</b>	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	$\Sigma$ (Marcações)
<i>MFCA</i>	X	X	X		X				X	5
EMA	X	X	X		X					4
<i>Métodos AICV</i>	X	X	X	X					X	5
ACCV					X				X	2
ACB					X				X	2
ASAIA (FMEA, RIAM, Matriz de Risco)				X			X		X	3
Pegada Hídrica				X					X	2
Pegada Ecológica				X					X	2
Energia Cumulativa		X		X					X	3
Análise Exergética		X		X					X	3
Análise Emergética	X	X		X		X			X	5
<b>Grupo 2</b> <b>Ferramentas Combinadas</b>										
<i>Modelo de Cercal</i>	X		X	X	X		X		X	6
MECAIA	X		X		X				X	4
MAICAPI				X	X				X	3
Combinação Pegada Ecológica e EMFA	X	X	X	X					X	5
ECEC ( <i>Ecological Cumulative Exergy Consumption</i> )	X	X	X	X	X				X	6
Combinação MFCA e AICV	X	X	X	X	X				X	6
EIO-LCA ( <i>Economic Input-Output – Life Cycle Analysis</i> )	X	X	X	X	X				X	6

QUADRO 7 - Atendimento dos modelos estudados aos critérios de importância para o estabelecimento de um novo modelo matemático de desempenho ambiental.

Fonte: O Autor (2015)

O resultado da avaliação do atendimento aos critérios para o Grupo 1 mostrou que as ferramentas que obtiveram um número de critérios atendidos maior ou igual a cinco critérios foram a MFCA, a Análise emergética e a AICV. Apesar disso, vale ressaltar e considerar os métodos de ASAIA, pois são os mais utilizados entre as empresas para valorar e classificar por criticidade ambiental (CLOQUELL-BALLESTER *et al.*, 2007). Já para as Ferramentas Analíticas Combinadas (Grupo 2), as que obtiveram o maior número de critérios atendidos (seis critérios) foram o Modelo de Cercal, o qual integra de forma adaptada ao modelo a Contabilidade Ambiental e a Análise de Risco Ambiental, o ECEC (*Ecological Cumulative Exergy Consumption*), a combinação MFCA e AICV e o EIO-LCA (*Economic Input-Output – Life Cycle Analysis*), sendo estas três últimas ferramentas mais focadas na análise do ciclo de vida, possuindo respostas de saída agregadas por etapas da cadeia de suprimentos, ou por produtos.

Desta forma, as ferramentas MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal foram selecionadas para maior detalhamento, as quais possuem esta descrição nos subtítulos 4.1 à 4.4, respectivamente, bem como para utilização na comparação dos resultados com a ferramenta EPIP proposta nesta Tese. A ferramenta Análise

emergética não foi utilizada para comparação com a EPIP, por não apresentar uma relação clara dela com as outras ferramentas, causando rejeição no uso da análise emergética (YANG *et al.*, 2015). Já as ferramentas ECEC, MFCA e AICV, e EIO-LCA, não foram utilizadas para comparação com a EPIP, pois estas combinações de ferramentas ainda estão em desenvolvimento, não sendo apresentadas de forma clara pelos autores das pesquisas as formas de quantificação por estas ferramentas.

#### 4.1 MFCA – MATERIAL FLOW COST ACCOUNTING

A MFCA utiliza o balanço material e balanço de energia, em conjunto com os valores de custos, para realizar a contabilidade ambiental de uma empresa (ABNT, 2013). A contabilidade dos custos dos fluxos visa detectar todos os fluxos de materiais através dos centros de custos das empresas e reavaliar os custos de produção e as quantidades percentuais adicionadas nas várias fases da fabricação (NAÇÕES UNIDAS, 2001). Segundo Trappey *et al.* (2013), a MFCA pode ser aproximada a um sistema de informação especializado em traçar todas as entradas de fluxos materiais e mensurar todas as saídas, possibilitando a empresa minimizar seu impacto ambiental e reduzir os custos.

A aplicação da MFCA pode contribuir na gestão de custos das empresas e proporcionar vantagens como a redução da geração de resíduos que leva proporcionalmente para a redução do consumo e custo com materiais, o aumento da eficiência nas operações de processamento e tratamento de resíduos e uma melhor prática da gestão ambiental na empresa, possibilitando a redução do impacto ambiental na indústria de transformação (KOKUBO, 2010; SCHMIDT, 2015).

Para iniciar a implementação da ferramenta, uma fronteira deve ser definida contendo um processo, múltiplos processos, toda uma instalação, ou uma cadeia de suprimentos (ABNT, 2013). Também é necessário a especificação de um período de tempo para a obtenção de dados significativos podendo ser, por exemplo, um mês ou um ano ou o tempo necessário para o fabrico de um lote de produção (SCHMIDT, 2013). Além disso, a identificação dos centros de quantidades deve ser estimada para configurar o modelo de fluxo de material (SYGULLA *et al.*, 2011; HYRŠLOVÁ *et al.*, 2011).

A fase seguinte de implementação da ferramenta é a montagem do inventário de dados através do levantamento das entradas e saídas de material de

um centro de quantidade, bem como os custos de consumo energético, os custos de gestão dos resíduos e o custo do sistema. Os valores que envolvem material, energia, sistema e gestão de resíduos são identificados em unidades físicas e em valores monetários (ABNT, 2013).

O centro de quantidade (CQ) é uma parte ou partes selecionadas de um processo para o qual entradas e saídas são quantificadas em unidades físicas e monetárias. (ABNT, 2013). O CQ é caracterizado por uma entrada de material/energia, uma transformação e uma saída material/energia, considerando também aqueles materiais já existentes dentro do CQ. As entradas de materiais no processo são classificadas como *positive products* e as saídas como *negative products* (FAKOYA e POLL, 2012).

Com os valores levantados do inventário de dados, é possível realizar os cálculos dos indicadores de valor agregado aos produtos no centro de quantidade  $i$  ( $VP_i$ ) e do valor agregado as perdas como resíduos no centro de quantidade  $i$  ( $VR_i$ ), conforme Equações (5) e (7), adaptadas de Schmidt (2015). Também é possível obter o valor agregado no produtos total ( $VP$ ) e o valor total agregado as perdas ( $VR$ ), conforme Equações (6) e (8), adaptadas de Schmidt (2015).

$$VP_i = \sum_j P_{ij} \cdot QP_{ij} + ap_i \cdot (pe \cdot E_i + S_i) \quad (5)$$

$$VP = \sum_i VP_i \quad (6)$$

$$VR_i = \sum_k R_{ik} \cdot QR_{ik} + GR_i + ar_i \cdot (pe \cdot E_i + S_i) \quad (7)$$

$$VR = \sum_i VR_i \quad (8)$$

Na Equação (5)  $P_{ij}$  refere-se ao preço do produto  $j$  no CQ  $i$  (em  $\$.kg^{-1}$ ),  $QP_{ij}$  a quantidade do produto  $j$  no centro de CQ  $i$  (em kg) e  $ap_i$  a razão entre a massa de material total dos produtos  $j$  de saída (kg) e a massa do material total de entrada (em kg) no CQ  $i$ . Na Equação (7),  $R_{ik}$  refere-se ao preço de perda de material do resíduo  $k$  no CQ  $i$  (em  $\$.kg^{-1}$ ),  $QR_{ik}$  a quantidade de material que compõe o resíduo  $k$  no CQ

$i$  (em kg), e  $ar_i$  a razão entre a massa de material total perdida dos resíduos  $k$  (em kg) e do material total de entrada (kg) no CQ  $i$ . Além disso,  $S_i$  é o custo de sistema, tal como mão de obra, no CQ  $i$  (em \$),  $pe$  o preço unitário da energia elétrica (em \$.kWh<sup>-1</sup>),  $E_i$  o consumo de energia elétrica no CQ  $i$  (em kWh), e  $GR_i$  o custo de gestão dos resíduos no CQ  $i$  (em \$).

Como forma de exemplificar a implementação da MFCA, pode ser verificado através da análise da FIGURA 6 o cálculo realizado em função do material, energia, resíduos e sistema. Neste exemplo, considerou-se que ocorre a entrada no CQ de 95 kg de um material, porém já existe dentro do CQ 15 kg deste material. Após o processamento foi obtido 70 kg de produto, 30 kg de resíduo e 10 kg de sobra de material que permanece no CQ.

Quando estes dados são relacionados com os custos para que o processo ocorra, faz-se a contabilidade de custos ambientais. Neste caso, a quantidade inicial de material (95 kg) correspondia a um custo de R\$ 950,00. Na etapa de processamento no CQ, ocorreram os custos de energia, de sistema e de gestão dos resíduos, nos valores de R\$ 50,00 , R\$ 800,00 e R\$ 80,00, respectivamente. Além disso, já existia uma quantidade material no CQ no valor de R\$ 150,00, sendo usado apenas 5 kg dele para transformação em produto e perdas.

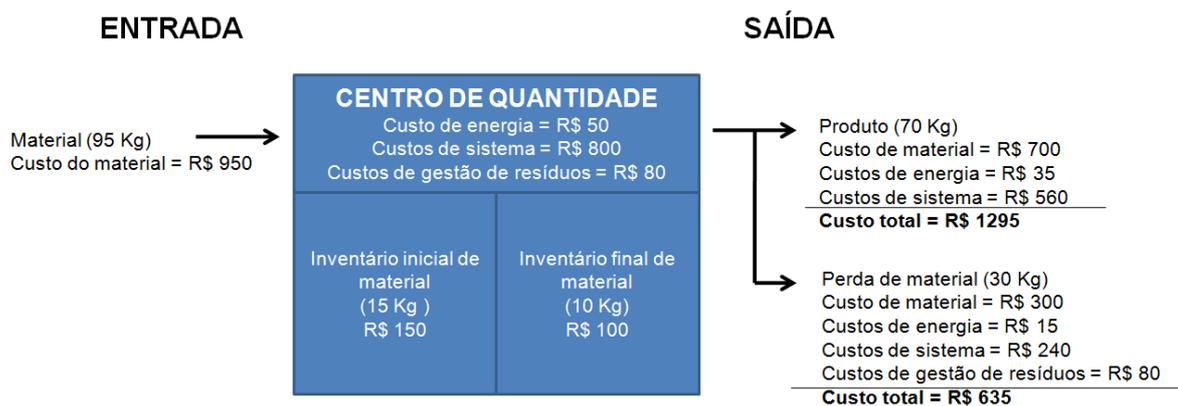


FIGURA 6 - Exemplo de contabilidade de custo material para um CQ hipotético.  
Fonte: Adaptado da ABNT (2013).

No balanço de produto os custos obtidos foram de R\$ 700,00 para materiais, correspondente aos 70 kg, R\$ 35,00 do custo de energia, correspondente a 70 % do custo de energia no CQ, e R\$ 560,00 dos custos do sistema, também na mesma

relação da energia no CQ. O balanço de perda de material teve R\$ 300,00 de custos materiais, dado os 30 kg de massa de perda, R\$ 15,00 de custos de energia, referente à 30 % dos custos de energia no CQ, os custos de sistema de R\$ 240,00, na mesma relação de percentagem da energia no CQ, e o custo de gestão de R\$ 80,00, alocado 100 % do valor presente deste custo do CQ dado que só na massa de perda que existirá gestão de resíduos.

Os custos totais de produto e perda de material foram de R\$ 1295,00 e R\$ 635,00, respectivamente. Ou seja, se for reduzido a perda material, parte de valor será realocado no produto, aumentando o rendimento de transformação matéria prima-produto. Desta forma, a ferramenta considera que, se os restos forem otimizados e reduzidos, o impacto ambiental do processo será reduzido, e a empresa também obterá uma redução de custos ambientais pelo aumento do rendimento do processo.

#### 4.1.1 Vantagens da MFCA

A ferramenta MFCA, devido ao vínculo econômico ambiental, torna-se atrativa para a obtenção de resultados ambientais positivos dentro das organizações. Este formato de análise econômico ambiental traz vantagens para esta ferramenta, os quais podem ser citadas:

- a) **Análise baseada em quantidades e custos:** Quando se considera qualquer empresa que possui uma gestão mínima de dados, normalmente o controle ocorre nas receitas e despesas da empresa e nas quantidades de materiais, insumos e energia que entram e saem do processo produtivo. Desta forma, pode-se verificar que a forma mais simples de obter dados para alimentação de um modelo em empresas é por esta relação de custos e quantidades.
- b) **Resposta global:** As respostas de simulação com a MFCA surgem na forma de custos, sendo que fica dividido os que realmente geraram o produto e aqueles que foram desperdiçados ao longo do processo de transformação. Este tipo de resposta deixa mais simples a interpretação dos resultados, tornando seu uso mais acessível pelas empresas.
- c) **Simulação de diferentes perfis:** Este modelo permite, além da simulação real da condição da empresa, a realização de testes hipotéticos sobre os

pontos críticos encontrados de baixo rendimento, afim de verificar e analisar formas de melhorar a relação matéria-produto-perda material.

#### 4.1.2 Desvantagens da MFCA

Em contrapartida, o uso da MFCA exige cuidados, principalmente devido a possibilidade da empresa priorizar mais o econômico do que o ambiental no seu uso, descaracterizando a importância ambiental da ferramenta. Neste contexto, percebe-se como principais desvantagens da ferramenta:

- a) **Análise econômica versus ambiental:** A simulação com este modelo busca um equilíbrio entre ganhos econômicos e redução de impactos ambientais nas empresas, porém isto não pode ser garantido ao longo da simulação. Ou seja, a empresa pode usar o modelo apenas para obter benefícios econômicos, e acabar aumentando seu impacto ambiental, agindo de forma inversa a sua premissa. A sua lógica de análise encontra-se no fato de que, quanto mais otimizado estiver a relação de transformação matéria prima-produto, menor o impacto ambiental. Só que nele podem ocorrer situações com as perdas de material, por exemplo, de geração de um resíduo, em que o destino para aterro industrial seja mais viável economicamente do que sua reciclagem. Ou então casos em que o tratamento e lançamento de efluentes seja mais viável economicamente do que seu tratamento, mais acurado, seguido de reciclo.
- b) **Variação de custos conforme a solução ambiental:** Dado que o modelo é proposto para aplicação em qualquer tipo empresarial, e para qualquer local do planeta, a variação de valores de soluções ambientais, conforme as regiões do Planeta, podem fazer com que ações não desejáveis sejam verificados como mais adequadas pelo modelo, tais como destino de resíduos para aterro, lançamento de efluentes em rios pós tratamento ou lançamento de emissões atmosféricas com tratamento simplificado.
- c) **Ausência de parâmetros ambientais:** A falta de parâmetros de análise ambiental, tais como o risco ambiental e a responsabilidade legal das empresas, pode fazer com que o CCFM torne-se um modelo manipulável para a obtenção de respostas conforme o interesse, no caso comumente o econômico, acabando por descaracterizar o enfoque principal de aplicação

deste modelo, que corresponde a busca de um equilíbrio econômico-ambiental.

#### 4.2 MÉTODOS AICV (AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA)

Os métodos de AICV podem ser entendidos como aqueles criados para avaliar impactos de processos ambientais no contexto da Análise do Ciclo de Vida de produtos (ACV), podendo também ser utilizados com fronteiras mais restritas, como por exemplo a de um processo industrial (CARVALHO *et al.*, 2014). Estes métodos são usados para quantificar os impactos ambientais potenciais contidos no ciclo de vida do sistema em estudo através da categorização dos impactos ambientais (SOARES *et al.*, 2006; MIMOSO *et al.*, 2015), tornando-se ferramentas comuns para auxiliar nos processos de tomada de decisão na avaliação ambiental de processos industriais (MIMOSO *et al.*, 2015).

A quantificação dos impactos ambientais potenciais pelos métodos de AICV ocorrem através da transformação dos dados do inventário do ciclo de vida em categorias de impacto ambiental, através do uso de indicadores de categoria (ABNT, 2009). O resultado por categorias de impacto podem ainda ser agrupados em categorias de danos ambientais, sendo normalmente utilizados os grupos de Danos a Saúde Humana, Danos a Qualidade do Ecossistema e Danos pelo consumo de Recursos. Este agrupamento por danos ambientais pode ser realizado através da utilização de fatores de normalização de categorias de impacto e organização das categorias nas classes de danos ou pelo uso de sub-índices com unidade de medida igual, tais como a DALY (*Disability Adjusted Life Years*) usada para Danos a Saúde Humana, PDF.m<sup>2</sup>.yr (*Potentially Disappeared Fraction of plant species*) para Danos a Qualidade do Ecossistema, e MJ *Surplus* para Danos pelo consumo de Recursos (CARVALHO *et al.*, 2014). Além disso, o resultado por categorias de danos podem ser agregados para a obtenção de um índice único, tanto pela soma dos valores das categorias de danos normalizados, como pela utilização de fatores de ponderação (HERMANN *et al.*, 2007; FINNVEDEN *et al.*, 2009), conforme FIGURA 7. Esta agregação é possível pois, após a normalização das categorias de impacto, os resultados obtidos são adimensionais. Apesar disso, é importante que a agregação das categorias de impacto seja realizada com cautela, pois a utilização de fatores de ponderação normalmente introduz subjetividade na análise, o que pode distorcer os

resultados e levar a direcionamentos inadequados para tomadores de decisão (ROWLEY *et al.*, 2012).

O cálculo geral e mais amplo realizado através dos métodos de AICV pode ser resumido através da Equação (9), adaptado de Carvalho *et al.* (2014) e Prado-Lopez *et al.* (2014), sendo  $In(n)$  o indicador único de impacto ambiental do aspecto ambiental  $n$  (adimensional),  $Q(n)$  a quantidade total do aspecto ambiental  $n$ ,  $S_i$  o fator de caracterização da categoria de impacto  $i$  (em Unidade equivalente de categoria/ Unidade de quantidade do aspecto ambiental),  $R_i$  o fator de normalização de cada categoria de impacto  $i$  (em Unidade equivalente de categoria), e  $Wf_i$  o fator de ponderação de impactos ambientais da categoria de impacto  $i$  (adimensional).

$$In(n) = Q(n) \cdot \sum_{i=1}^k \frac{S_i}{R_i} \cdot Wf_i \quad (9)$$

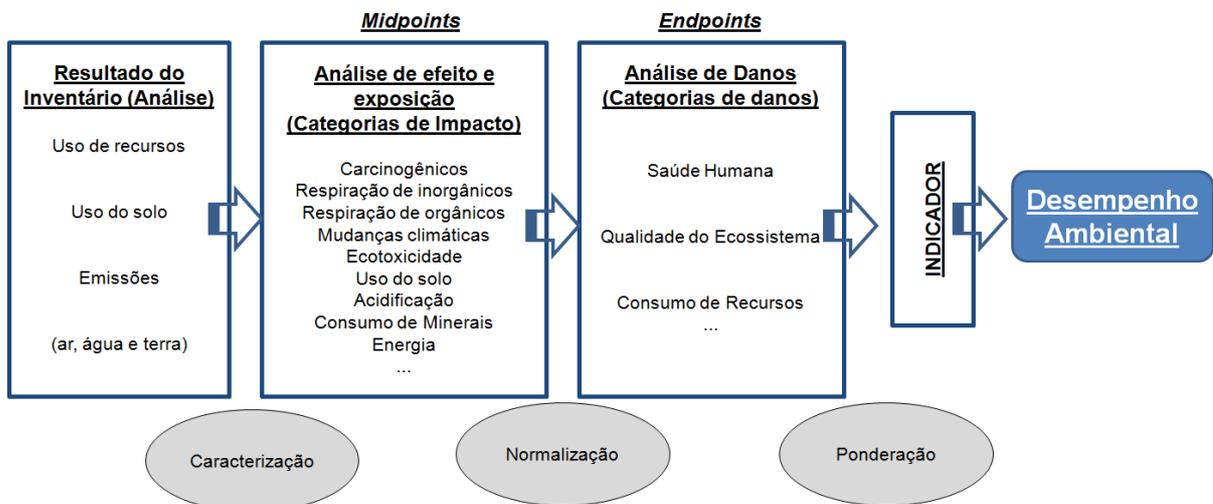


FIGURA 7 - Representação da caracterização, avaliação de danos, normalização e ponderação em um método de AICV.

Fonte: O Autor (2015)

Existem diversos métodos de AICV disponíveis na literatura para analisar a significância de impactos ambientais potenciais e auxiliar na tomada de decisão. Estes métodos possuem diferenças nas categorias de impactos consideradas e nos correspondentes indicadores de categorias, nos métodos de normalização e nos fatores e métodos de ponderação (REAP *et al.*, 2008). Diversos esforços tem sido realizados pela comunidade científica para identificar os métodos mais adequados conforme a situação de análise (CARVALHO *et al.*, 2014; DOMINGUES *et al.*, 2015;

SLAPNIK *et al.*, 2015; KIKUCHI e HIRAO, 2008), se para indústria, para produtos, para políticas, e também se estendidos para todo o ciclo de vida ou para partes dele. Conforme levantamento realizado por Carvalho *et al.* (2014), foram mapeados 13 métodos de AICV utilizados em 1118 diferentes estudos para avaliar impactos ambientais no contexto do ciclo de vida entre os anos de 1997 e 2011, sendo eles o CML, o Eco-indicator, o Ecological Scarcity 2006, o EDIP, o EPD, o EPS, o IMPACT2002+, o LCA Nets, o LIME, o Lucas, o MEEuP, o ReCiPe e o TRACI. Em uma filtragem deste levantamento, foi verificado que, em relação a flexibilidade dos métodos, que corresponde ao número de saídas possíveis de agregação de resultados (indicadores, sub-índices, que são as categorias de danos, e índice único), os considerados mais flexíveis foram o ReCiPe e o LIME. Já em relação ao grau de diversidade de categorias de impacto compondo o método, os que possuem maior número de categorias de impacto foram o Ecological Scarcity 2006 e o CML 2001. Por fim, em relação ao número de utilizações dos métodos por diferentes estudos, foi verificado que os três métodos de AICV mais utilizados foram o Eco-indicator (incluindo Eco-indicator 95 e Eco-indicator 99), o IMPACT 2002+ e o CML (incluindo o CML 92 e o CML 2001).

Cada um destes métodos possui um grupo de categorias de impacto, para realização do cálculo do impacto ambiental em relação a um produto ou mesmo partes de um processo. Estes métodos possuem algumas categorias de impactos em comum entre si, e outras diferentes e, às vezes, exclusiva do método. A abordagem mais ampla de categorias de impacto foi mapeada por Carvalho *et al.* (2014), que obteve um número total de 167 categorias de impacto organizadas em 64 grupos de categorias de impacto, dado que estes grupos correspondem a junção de duas ou mais categorias de impacto por se tratarem do mesmo assunto de análise e utilizarem o mesmo indicador de categoria.

Considerando o foco de aplicação da AICV para avaliar impactos ambientais em processos industriais, deve-se analisar os grupos de categorias de impacto, afim de se organizar estes grupos de categorias em um método específico para o foco de interesse. Este detalhamento de agrupamento de métodos é apresentado no item 5.7 do Capítulo 5 desta Tese.

#### 4.2.1 Vantagens dos Métodos AICV

A AICV corresponde a um conjunto de métodos abrangentes para utilização na análise do ciclo de vida de produtos, podendo estes métodos serem utilizados para obtenção de respostas desagregadas a níveis de fluxos materiais e energéticos em um limite de processo industrial. Desta forma, percebe-se como principais vantagens dos métodos de AICV as seguintes:

- a) **Análise baseada em variados indicadores de impactos:** Devido os métodos de AICV utilizarem uma grande diversidade de indicadores de categorias de impactos ambientais, abrangendo tanto os dados a saúde humana, como a qualidade do ecossistema e o consumo de recursos, sua análise torna-se aprofundada, melhorando a medida do desempenho ambiental para o objetivo aplicado.
- b) **Normalização e Ponderação:** Alguns métodos de AICV possuem capacidade de normalização e ponderação dos resultados dos indicadores de categorias de impacto. Isto possibilita a agregação dos resultados destes indicadores em um único índice, facilitando o seu uso como ferramenta de auxílio a tomada a decisão.

#### 4.2.2 Desvantagens dos Métodos AICV

Os métodos de AICV apresentam também algumas dificuldades, principalmente relacionadas aos procedimentos adotados na construção de índice único, conforme segue:

- a) **Incertezas na Ponderação:** Os métodos existentes de AICV que utilizam a ponderação entre categorias de danos, normalmente apresentam valores pré-definidos conforme o conhecimento dos criadores do método, em relação a importância dos danos. Por exemplo, nos métodos Eco-indicator 99 e ReCiPe, foram adotados o peso 400 para as categorias de danos Saúde Humana e Qualidade do Ecossistema, e um peso 200 para a categoria de danos pelo consumo de recursos (PRÉ CONSULTANTS, 2015). Já o método IMPACT 2002+ considera o peso igual a 1 para todas as categorias de danos (HUMBERT *et al.*, 2014). Desta forma, a ponderação

utilizada pode gerar interferências no resultado final da simulação, não refletindo uma resposta adequada para o caso estudado.

- b) **Normalização das categorias de impacto:** Os fatores de normalização das categorias de impacto são obtidos em relação a um sistema de referência, tal como o valor de determinado indicador de categoria para o Planeta em um determinado ano, ou para uma área específica para um determinado ano (HEIJUNGS *et al.*, 2007). Este fator pode também ser representado pelo total de emissão de uma indústria, região, nação ou conjunto de nações, em relação a um determinado tempo (ROGERS e SEAGER, 2009). Desta forma, devido à variação destes valores, tanto no espaço como no tempo, acabam por produzir subjetividade nos resultados da AICV.

#### 4.3 ANÁLISE DE SIGNIFICÂNCIA DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS (ASAIA)

Os métodos de ASAIA servem para quantificar a significância de aspectos e impactos ambientais e ranqueá-las em busca de indicações de pontos a serem melhorados. A avaliação de significância de impactos ambientais é ainda considerada uma das etapas mais complexas devido à subjetividade dos métodos e muitas vezes dos dados (LAWRENCE, 2007). Comumente, o principal método utilizado para realizar este tipo de análise é o de avaliação por julgamentos, apesar de já existirem métodos mais objetivos na literatura (WOOD *et al.*, 2006). Alguns critérios comuns presentes na ASAIA são: temporalidade, situação operacional, requisito legal aplicável, atendimento à clientes, severidade, abrangência e ocorrência do impacto ambiental (SEIFFERT, 2011).

A avaliação da significância pode ser realizada através da utilização de uma planilha de preenchimento de dados de aspectos e impactos ambientais através de levantamento e julgamentos, conforme modelo da TABELA 1.

TABELA 1 - Modelo de formulário de ASAIA para avaliação de significância. Obs: Te (Temporalidade); SOp (Situação Operacional); RL (Requisitos Legais); AC (Atendimento à Clientes); S (Severidade); O (Ocorrência); D (Detecção); A (Abrangência), Sig (Significância)

Atividade	Aspecto Ambiental (AA)	Impacto Ambiental (IA)	Te	SOp	RL	AC	S	O	D	A	Sig (=S.O.D.A)
-----------	------------------------	------------------------	----	-----	----	----	---	---	---	---	----------------

Fonte: Adaptado de Seiffert (2011), Silva e Amaral (2009), Pastakia (1999), Cloquell-Ballester *et al.*, (2007), Zambrano e Martins (2007).

As colunas presentes na TABELA 1 devem ser preenchidas conforme sequência, de acordo com Seiffert (2011):

- a) Atividades: Levantamento e identificação das atividades relacionadas a determinado aspecto ambiental.
- b) Aspecto Ambiental: Identificação do aspecto ambiental levantado.
- c) Impacto Ambiental: Classificação do impacto ambiental em relação aos meios envolvidos, tais como solo, água e o ar.
- d) Te (Temporalidade): Classificação dos aspectos ambientais em relação a temporalidade, se Passada (P), Atual (A) ou Futura (F).
- e) SOp (Situação Operacional): Classificação dos aspectos ambientais em relação a sua situação, se Normal (N), Anormal (A) ou Emergencial (E).
- f) RL (Atendimento a Requisitos Legais): Classificação dos requisitos legais aplicáveis em legislação aplicável e não atendida (1) ou legislação não existente ou existente e atendida (0).
- g) AC (Atendimento a clientes): Classificação do atendimento pela existência de registro de reclamações (1) ou pelo não registro de reclamação (0).

Já as colunas “S, O, D e A” da TABELA 1 devem ser analisadas da seguinte forma:

- *S - Severidade*: Refere-se ao potencial de dano gerado por um determinado impacto ambiental.
  - 1 – Baixo: Pouco significativo e de fácil reversibilidade em curto espaço de tempo;
  - 2 – Moderada: Danos consideráveis e reversíveis em um tempo razoável;
  - 3 – Alto: Danos intensos e com efeitos irreversíveis a médio prazo e, até mesmo, longo prazo;
- *O - Ocorrência*: Refere-se a quantidade de vezes que um determinado impacto ambiental acontece por um tempo pré-definido.
  - 1 – Baixo: Impacto ambiental ocorre uma vez ao ano ou menos;
  - 2 – Moderada: Impacto ambiental ocorre mensalmente;
  - 3 – Alto: Impacto ambiental ocorre diariamente;
- *D - Detecção*: Refere-se a capacidade de detecção de determinado aspecto ambiental e seu conseqüente impacto.

- 1 – Fácil: Impacto ambiental detectado de forma visual;
- 2 – Moderada: Impacto ambiental detectado através da utilização de instrumentos de medidas simples, tais hidrômetros ou medidores de consumo de energia;
- 3 – Difícil: Impacto ambiental detectado através do uso de sensores específicos ou equipamentos de medição sofisticados.

➤ *A - Abrangência:* Refere-se a região de influência direta de um determinado impacto ambiental.

- 1 – Pontual: Impacto ambiental ocorre apenas no ponto onde ocorre a atividade;
- 2 – Local: Impacto ambiental ocorre dentro dos limites da empresa;
- 3 – Global: Impacto ambiental extrapola os limites da empresa;

Por fim, o “Sig” – Resultado da Significância – é obtido através do produto dos resultados obtidos no “S, O, D e A”, sendo que quanto maior o resultado de “Sig”, maior será a significância de determinado aspectos ambiental no processo da empresa analisada. Alguns outros métodos utilizam a soma dos fatores “S, O, D e A” para obtenção do resultado de “Sig”.

#### 4.3.1 Vantagens dos métodos ASAIA

Os métodos de ASAIA apresentam como principal ponto positivo:

- a) **Simplicidade e Facilidade na Análise:** As análises quantitativas presentes nos métodos são simples de serem realizadas, tornando-se acessíveis a qualquer empresa que deseja utilizá-las, pois depende apenas do levantamento dos aspectos ambientais da empresa e a realização de julgamentos em relação aos impactos decorrentes destes aspectos.

#### 4.3.2 Desvantagens dos métodos ASAIA

Em contrapartida, existem algumas fragilidades destes métodos, sendo que a principal pode ser dita como:

- a) **Classificação na análise quantitativa:** A classificação é subjetiva e realizada por julgamentos realizados por gestores e especialistas da empresa que está implementando o método. Ou seja, o método pode tornar-

se vulnerável a erros, principalmente relacionado a redução e simplificação da análise de significância de impactos ambientais por julgamentos. As incertezas nesta análise acabam por impactar diretamente nas decisões tomadas para melhorias ambientais.

#### 4.4 MODELO DE CERCAL (2000)

O modelo matemático proposto por CERCAL (2000) é caracterizado pela obtenção de resíduos prioritários a serem minimizados através da aplicação do balanço de massa de materiais/compostos químicos, considerando para a geração de resíduos o sistema entrada-transformação-saída, conforme FIGURA 8.

Ou seja, dado que em cada processo de natureza industrial tem-se a entrada de algum material/insumo, sendo que nele ocorre alguma interferência/transformação para modificação do material, seja esta mudança em forma, tamanho, característica física e/ou química, composição, dentre outras variáveis, e posterior saída do produto/sub-produto acabado, o modelo proposto pelo referido autor analisa o que foi perdido de material, ou seja, gerado de resíduo, em cada transformação ao longo de todo o processo de uma empresa.

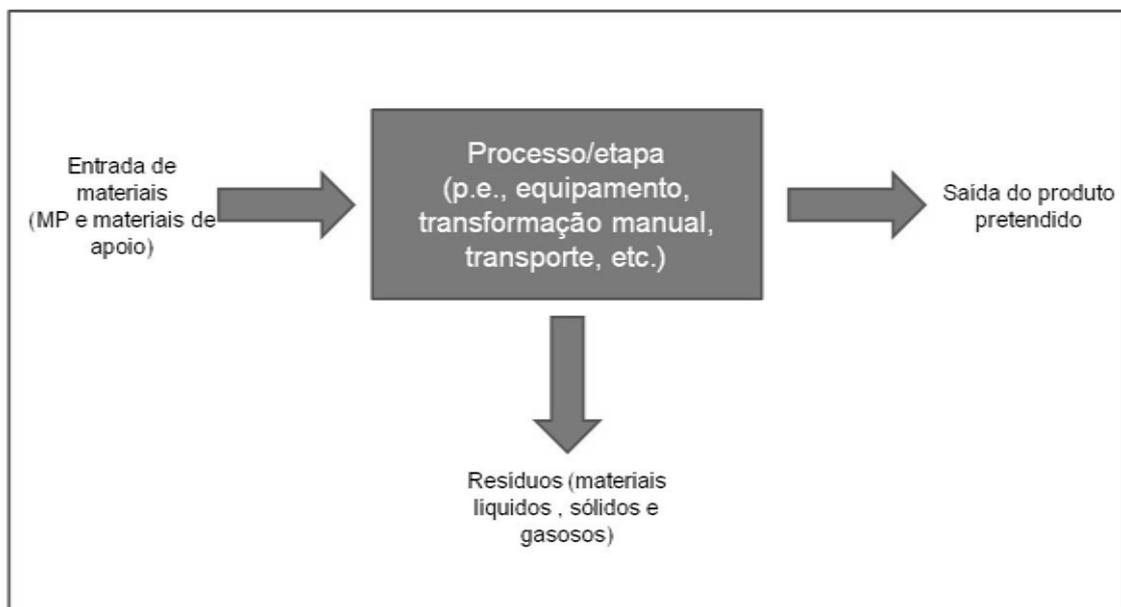


FIGURA 8 - Balanço de materiais conforme modelo de Cercal.  
Fonte: Adaptado de Cercal (2000)

Para isso, o método matemático concentrou-se em três análises principais para priorização dos resíduos a serem minimizados: *Análise do resíduo por Valor*, *Análise do resíduo por Risco* e *Análise do resíduo por Facilidade de Minimização*.

Cada análise fornece um resultado específico e independente dos outros, cabendo aos responsáveis da empresa avaliar as respostas e selecionar os resíduos prioritários àquela organização.

A lista de variáveis para as três análises deste modelo encontram-se na listagem a seguir, conforme Cercal (2000).

### LISTAGEM DE VARIÁVEIS DO MODELO DE CERCAL

$W_{Total}$	Quantidade total do resíduo
$p$	Número de produtos analisados simultaneamente
$e$	Número de equipamentos onde o resíduo é gerado
$m$	Número de materiais que compõem o resíduo
$d$	Número de destinações finais dadas ao resíduo
$\Pi$	Classificação do resíduo conforme a periculosidade
$\Omega$	Relação do resíduo com o processo
$\$^+_i$	Valor unitário do material genérico “i”
$\Delta\$^{\%}_i$	Alteração percentual admissível para o valor do material genérico “i”
$X_{ijk}$	Percentual do material genérico “i” na composição do resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”
$Y_{hjk}$	Percentual do total de resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”, que sofre a disposição genérica “h”
$Z_{jk}$	Percentual do total de resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”
$W_k$	Percentual do total do resíduo gerado para o produto genérico “k”
$\$^-_{Bhjk}$	Custo unitário de beneficiamento do resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”, que sofre a disposição genérica “h”
$\$^-_{Thjk}$	Custo unitário de transporte do resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”, que sofre a disposição genérica “h”
$\$^-_{TDhjk}$	Custo unitário de tratamento e disposição do resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”, que sofre a disposição genérica “h”
$\$^-_{GPhjk}$	Custo unitário de geração e permanência do resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”, que sofre a disposição genérica “h”
$\$^+_{Rhjk}$	Retorno obtido por destinar o resíduo gerado no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”, à disposição genérica “h”
$D^{S/N}_{\$^+}$	Calcula $\$^+$ ?
$D^{S/N}_{\$^-}$	Calcula $\$^-$ ?

$D^{S/N}_{\$T^-}$	Calcula $\$T^-$ ?
$D^{S/N}_{\$TD^-}$	Calcula $\$TD^-$ ?
$D^{S/N}_{\$GP^-}$	Calcula $\$GP^-$ ?
$D^{S/N}_{\$R^+}$	Calcula $\$R^+$ ?
$\$^+$	Valor unitário do resíduo, ponderado entre todos os equipamentos onde o mesmo é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise
$\Delta\$\%$	Alteração percentual admissível para o valor unitário do resíduo, ponderada entre todos os equipamentos onde o mesmo é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise.
$\$B^-$	Custo unitário de beneficiamento do resíduo ponderado conforme as disposições dadas ao mesmo, entre todos os equipamentos onde é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise.
$\$T^-$	Custo unitário de transporte do resíduo ponderado conforme as disposições dadas ao mesmo, entre todos os equipamentos onde é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise.
$\$TD^-$	Custo unitário de tratamento e disposição do resíduo ponderado conforme as disposições dadas ao mesmo, entre todos os equipamentos onde é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise.
$\$GP^-$	Custo unitário de geração e permanência do resíduo ponderado conforme as disposições dadas ao mesmo, entre todos os equipamentos onde é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise.
$\$R^+$	Retorno obtido ponderado conforme as disposições do resíduo, entre todos os equipamentos onde é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise
$\$'$	Valor unitário do resíduo não corrigido
$\xi$	Índice de priorização hierárquica de minimização de resíduos (IPHMR)
$\xi_B$	Base do IPHMR, ponderada entre todos os equipamentos onde o resíduo é gerado e para todos os produtos considerados para análise
$\xi_{Bh}$	Base do IPHMR da classe a que pertence a disposição genérica "h"
$K_{jk}$	Fator de constância do resíduo gerado no equipamento genérico "j", para o produto genérico "k"
$K$	Constância do resíduo ponderada entre todos os equipamentos onde o mesmo é gerado, e para todos os produtos considerados para a análise
$\delta^+$	Fator de correção para valores positivos do resíduo
$\delta^-$	Fator de correção para valores negativos do resíduo
$\$$	Valor unitário do resíduo corrigido
$\$_{Total}$	Valor total do resíduo corrigido
$Q$	Número de perguntas para análise por riscos cuja resposta é "Em potencial"
$Q_{jk}$	Peso da pergunta da análise por riscos no equipamento genérico "j", para o produto genérico "k"
$R$	Risco global do resíduo

$f$	Número de perguntas da análise por facilidade de minimização
$F_{jk}$	Peso da pergunta da análise por facilidade de minimização do resíduo no equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”
$CM_{jk}$	Custo para minimizar a geração do resíduo proveniente do equipamento genérico “j”, para o produto genérico “k”
$F$	Facilidade de Minimização global do Resíduo

#### 4.4.1 Análise do Resíduo por Valor (ARV)

Esta análise considera o levantamento dos custos dos resíduos gerados durante um processo de transformação de matéria. Segundo Cercal (2000, pg. 37), a modelagem matemática neste item considera:

*“as quantidades do resíduo geradas; os locais e situações em que ocorre o resíduo; as diversas composições em que aparece o resíduo; o valor dos materiais (substâncias) presentes no resíduo e o grau de alteração (admitido para o cálculo) que pode sofrer o valor de cada material presente no resíduo quando são considerados os aspectos ambientais; os custos globais representados pelo gerenciamento a que o resíduo é submetido; e as destinações finais que são dadas ao resíduo. Estas considerações podem ser feitas para uma situação real (o resíduo já existe e já está sendo destinado para fins específicos) ou para efeito de simulação e tomada de decisões”. (CERCAL, 2000, P.37).*

As variáveis do modelo de Cercal e o equacionamento matemático para o cálculo de valor de cada resíduo seguem TABELA 2.

Conforme as equações da TABELA 2, o cálculo da ARV considera um balanço de massa, semelhante ao mostrado na FIGURA 8, para levantar os custos e lucros relativos ao resíduo gerado em cada etapa do processo de produção, bem como o tipo de transporte, destino ou reaproveitamento utilizado pela organização. Quando o  $\$_{Total}$  apresenta um resultado positivo, isto significa que o resíduo gera despesa a empresa, sendo necessário verificar qual dos resíduos analisados apresenta o maior valor positivo, ou seja, àquele de maior prioridade de minimização pela ARV. Já quando o  $\$_{Total}$  tem um resultado negativo, significa que aquele determinado resíduo gera um lucro para a empresa, ou seja, é um resíduo de menor prioridade de minimização, conforme a ARV.

TABELA 2 - Equacionamento matemático do modelo de Cercal para o cálculo da Análise de Resíduo por Valor (ARV).

<b>Análise de Resíduo por Valor (ARV)</b>		
Descrição	Equação	Nº
<b>Valor Unitário do Resíduo (VUR)</b>	$\$^+ = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \left( \sum_{h=1}^d Y_{hjk} \cdot D_{\$^+}^{S/N} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^m \$^+_i \cdot X_{ijk} \right) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(10)
<b>Variação do VUR</b>	$\Delta \$^{\%} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{i=1}^m (\Delta \$^{\%}_i \cdot X_{ijk}) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(11)
<b>Custo Unitário do Resíduo no beneficiamento</b>	$\$^-_B = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{h=1}^m (Y_{hjk} \cdot D_{\$^-_B}^{-S/N} \cdot \$^-_{Bhjk}) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(12)
<b>Custo Unitário do Resíduo no transporte</b>	$\$^-_T = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{h=1}^d (Y_{hjk} \cdot D_{\$^-_T}^{-S/N} \cdot \$^-_{Thjk}) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(13)
<b>Custo Unitário do Resíduo no tratamento e disposição</b>	$\$^-_{TD} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{h=1}^d (Y_{hjk} \cdot D_{\$^-_{TD}}^{-S/N} \cdot \$^-_{TDhjk}) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(14)
<b>Custo Unitário do Resíduo na geração e permanência</b>	$\$^-_{GP} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{h=1}^d (Y_{hjk} \cdot D_{\$^-_{GP}}^{-S/N} \cdot \$^-_{GPhjk}) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(15)
<b>Retorno de valor de destino do resíduo</b>	$\$^+_R = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{h=1}^d (Y_{hjk} \cdot D_{\$^+_R}^{+S/N} \cdot \$^+_{Rhjk}) \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(16)
<b>Base do Índice de Priorização Hierárquica de Minimização de Resíduos (IPHMR)</b>	$\xi_B = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{h=1}^d \xi_{Bh} \cdot Y_{hjk} \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(17)
<b>IPHMR</b>	$\xi = \xi_B \cdot \Delta \$^{\%}$	(18)
<b>VUR do resíduo não corrigido</b>	$\$' = \$^+ + \$^-_B + \$^-_T + \$^-_{TD} + \$^-_{GP} - \$^+_R$	(19)
<b>Constância do resíduo</b>	$K = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e K_{jk} \cdot Z_{jk} \cdot W_k$	(20)
<b>Relação resíduo-processo</b>	$\Omega = cte$	(21)
<b>Fator de correção para valores positivos do resíduo</b>	$\delta^+ = \frac{(1 + \xi)}{(K \cdot \Omega)} \quad \xi \neq -1$	(22)
<b>Fator de correção para valores negativos do resíduo</b>	$\delta^- = (1 - \xi) \cdot K \cdot \Omega \quad \xi \neq +1$	(23)
<b>VUR do resíduo corrigido</b>	Se $\$' > 0 \Leftrightarrow \$ = \$' \cdot \delta^+$ Se $\$' < 0 \Leftrightarrow \$ = \$' \cdot \delta^-$ Se $\$' = 0 \Leftrightarrow \$ = 0$	(24)
<b>Valor total do resíduo</b>	$\$_{Total} = W_{Total} \cdot \$$	(25)

Fonte: Adaptado pelo Autor de Cercal (2000)

#### 4.4.2 Análise do Resíduo por Risco (ARR)

A ARR se utiliza de quatro questões a serem aplicadas a empresa, afim de avaliar seu risco relativo à saúde humana, seja pelos funcionários da empresa, pela comunidade presente na área de influência direta ou por outras pessoas mais afastadas do empreendimento.

a) Questões (CERCAL, 2000):

- 1- Existem dados reais ou estimados referentes às quantidades de geração e/ou destinação do resíduo?
- 2- Qual a relação com a ocorrência de danos à saúde humana?
- 3- Qual a relação com a ocorrência de reclamações de moradores vizinhos?
- 4- Qual a relação com a ocorrência de penalidades aplicadas por instituições públicas?

b) Respostas possíveis:

- 1- À primeira pergunta as respostas possíveis são “SIM” ou “NÃO”.
- 2- Para as perguntas subsequentes as respostas “JÁ OCORREU”, “EM POTENCIAL”, e “ISENTO”.

O modelo de Cercal considera que àqueles resíduos que apresentarem ao menos uma resposta “SIM” e “JÁ OCORREU”, já são classificados como essencialmente prioritários para minimização. Àqueles que não atenderem o critério anterior, utilizam-se da equação 17 (TABELA 3), considerando para o cálculo: a) Questões com resposta “ISENTO” atribui-se peso “0”; b) Questões com resposta “EM POTENCIAL” podem ter peso “1”, “2” ou “4”, para às questões penalidades aplicadas, reclamações de vizinhos e danos à saúde, respectivamente.

Os maiores valores de R indicam os resíduos com maior risco. Desta forma, estes resíduos seriam caracterizados como os de maior prioridade de minimização. Vale ressaltar que aqueles resíduos que foram classificados como essencialmente prioritários são os de maior interesse de minimização, seguido daqueles com maior valor de R.

TABELA 3 - Equação matemática para cálculo da análise de resíduo por risco.

<b>Análise de Resíduo por Risco (ARR)</b>		
Descrição	Equação	Nº
<b>ARR</b>	$R = \left( \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{q=1}^q Q_{jk} \cdot Z_{jk} \cdot W_k \right) \div \Pi$	(26)

Fonte: Adaptado pelo Autor de Cercal (2000)

#### 4.4.3 Análise do Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM)

A ARFM, segundo Cercal (2000), considera o produto entre as variáveis Facilidade de Minimização (F) e o Custo de Minimização (CM). A variável (F)

compõe-se de 12 Questões com pesos atribuídos e respostas possíveis “SIM” ou “NÃO”. Já a variável (CM) possui quatro possibilidades para a resposta dada as questões da variável anterior. Os parâmetros considerados para obtenção do valor de (F) e (CM) seguem TABELA 4.

TABELA 4 - Questionamentos para análise do resíduo por facilidade de minimização.

Questões da variável (F)	Peso (F <sub>jk</sub> )
Parar equipamento?	1
Parar processo?	2
Parar unidade?	3
Modificar equipamento?	2
Modificar processo?	4
Modificar unidade?	6
Implantar equipamento?	4
Implantar processo?	8
Implantar unidade?	12
Tecnologia disponível?	-10,1
Mão de obra disponível?	-7,1
Recursos disponíveis?	-15,1
Possibilidades da variável Custo de Minimização (CM)	Peso (CM <sub>JK</sub> )
Muito alto	4
Alto	3
Baixo	2
Muito baixo	1

Fonte: Adaptado pelo Autor de Cercal (2000)

Desta forma, o cálculo da ARFM segue equações da TABELA 5. Quanto menor o valor obtido pelo cálculo de F, há maior facilidade para minimizar o resíduo na empresa. O contrário refere-se a resíduos de maior dificuldade de minimização ou inviáveis.

TABELA 5 - Equações matemáticas para o cálculo da análise de resíduo por facilidade de minimização.

Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM)		
Descrição	Equação	Nº
ARFM	$F = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \left( \sum_{f=1}^f F_{jk} \cdot CM_{jk} \right) \cdot Z_{jk} \cdot W_k \quad \text{se } \sum F_{jk} > 0$	(27)
	$F = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \left( \sum_{f=1}^f F_{jk} \div CM_{jk} \right) \cdot Z_{jk} \cdot W_k \quad \text{se } \sum F_{jk} < 0$	(28)

Fonte: Adaptado de Cercal (2000)

#### 4.4.4 Ponderação do ARV, ARR E ARFM

Na proposta do modelo de Cercal (2000), o autor optou pela não agregação dos três indicadores de saída (ARV, ARR e ARFM), por considerar que não havia uma relação lógica aceitável para agrupar os indicadores em um índice único. O principal problema da não agregação dos indicadores era a dificuldade na interpretação dos resultados para o auxílio na tomada de decisão. Neste contexto, Timofiecsyk (2001) propôs um índice global de resposta do modelo de Cercal, através da ponderação dos três indicadores, chamado de Análise de Resíduo Global (ARG). Desta forma, foi possível construir a Equação (29), que apresenta a resposta do modelo após a agregação dos indicadores, sendo  $P_{ARV}$  o fator de ponderação da Análise de Resíduo por Valor,  $P_{ARR}$  o fator de ponderação da Análise de Resíduo por Risco e  $P_{ARFM}$  o fator de ponderação da Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização. Conforme Timofiecsyk (2001), os valores adotados para a ponderação da ARV, ARR e ARFM foram 3, 2 e 1, respectivamente.

$$ARG = P_{ARV} \cdot ARV + P_{ARR} \cdot ARR + P_{ARFM} \cdot ARFM \quad (29)$$

#### 4.4.5 Vantagens do Modelo de Cercal

O modelo de Cercal (2000) apresenta algumas vantagens interessantes, tanto relativas a sua abordagem da problemática de análise, como também os parâmetros considerados para a simulação, sendo mapeadas as seguintes vantagens do modelo:

- a) **Análises consideradas no modelo:** A consideração pelo modelo não apenas da análise de custos, mas também a análise de riscos e de facilidade de minimização, faz com que os resultados das simulações possam ser mais coerentes em um balanço econômico versus ambiental. Ou seja, os itens de risco e facilidade de minimização fazem com que a melhoria do desempenho ambiental com resíduos seja buscada, porém com equilíbrio econômico.
- b) **Detalhamento dos parâmetros do modelo:** O detalhamento de dados nos parâmetros de entrada possibilita uma resposta mais objetiva e acurada de

simulação, pois acaba por constituir um modelo complexo de considerável similaridade com a problemática real.

#### 4.4.6 Desvantagens do Modelo de Cercal

O modelo de Cercal (2000), apesar de considerado pioneiro na modelagem de priorização de resíduos industriais para minimização, apresenta dificuldades de implementação e praticidade em indústrias devido as seguintes características:

- a) **Resultado de simulação:** O modelo, conforme adaptação de Timofiecsyk (2001), fornece uma resposta global, porém com ponderação de forma subjetiva, definida pelo próprio usuário do modelo. Isto pode tornar a resposta do modelo tendenciosa e/ou não adequada. Porém, quando se opta pela utilização das respostas dos indicadores de saída do modelo de forma não agregada, conforme recomendação de Cercal (2000), é gerada dificuldade na interpretação dos resultados e no uso do modelo para auxílio na tomada de decisão pelas indústrias.
- b) **Dados de entrada:** A forma e disposição inicial do modelo e seu referido equacionamento matemático dificultam a obtenção de dados dos resíduos para alimentação do modelo, pois conforme o autor o levantamento das informações deve ser realizado para cada material, para cada equipamento, e para cada produto.
- c) **Análises de Risco e Facilidade de Minimização:** As análises de resíduo por risco e por facilidade de minimização se utilizam de Questões e Respostas, as quais podem ser caracterizadas como subjetivas e distorcer a resposta dos resíduos realmente prioritários de minimização.

## CAPÍTULO 5 - A EPIP

Este capítulo apresenta de forma detalhada a construção da ferramenta analítica proposta chamada de EPIP (Ferramenta Analítica de Desempenho Ambiental em Processos Industriais).

Desta forma, partindo da análise das ferramentas analíticas realizada no Capítulo 4, foi elaborada a FIGURA 9 para representar o encaixe de abordagem dos nove critérios estabelecidos para uma avaliação de desempenho ambiental adequada pela EPIP em relação as quatro outras ferramentas consideradas no detalhamento de ferramentas (MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal).

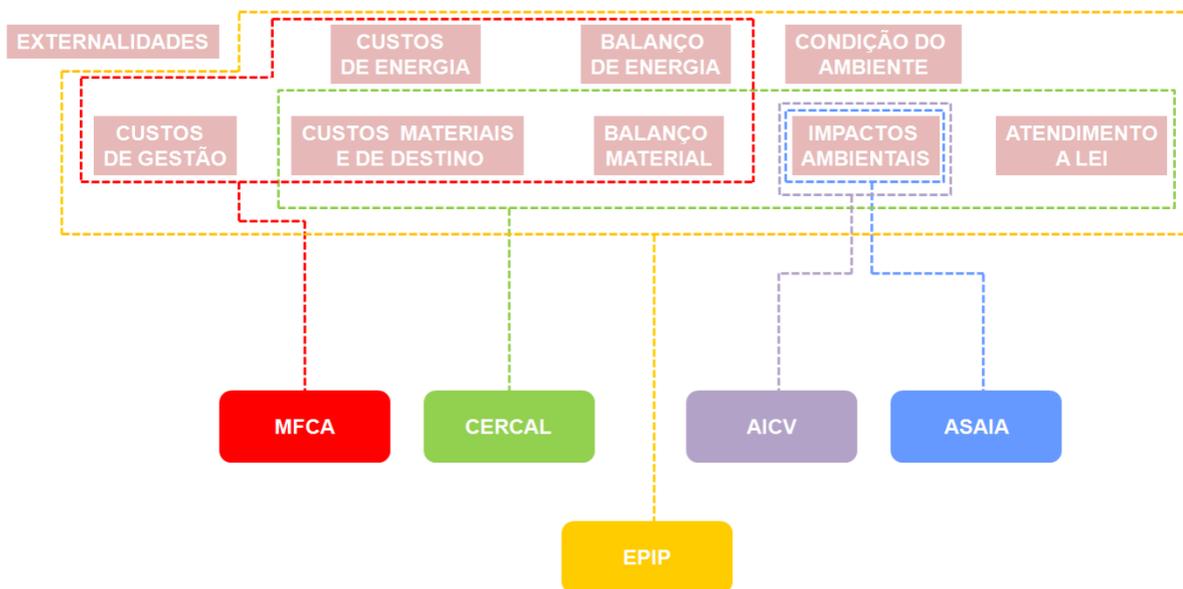


FIGURA 9 - Áreas de abordagem para o cálculo do desempenho ambiental pelas 4 ferramentas estudadas em detalhes e também pela ferramenta EPIP.

Fonte: O Autor (2015)

Nesse contexto, foi definido a construção de nove variáveis para composição da EPIP, para atender aos nove critérios estabelecidos, sendo estas variáveis compostas por dados de quantidades e tipos de materiais e resíduos, quantidade de energia utilizada, os custos ambientais de entradas e saídas do processo industrial, e indicadores de categorias impactos ambientais, conforme métodos AICV.

Primeiramente, é importante destacar que foi criada uma variável relacionada aos custos de externalidades, pela consideração que estes custos são importantes e podem influenciar o resultado do desempenho ambiental de uma indústria. Apesar disso, esta variável não foi utilizada para fins de simulação nos

estudos de caso, devido à subjetividade de valoração destes custos, conforme já descrito no item 2.3 (Capítulo 2), e por não ter sido desenvolvido uma forma de mensuração adequada e objetiva desta variável.

É também importante destacar que, a partir desta etapa do trabalho, a palavra **Resíduo** é considerada equivalente a sobras geradas ao longo do processo industrial em estudo, sejam estas sólidas, líquidas ou gasosas.

As variáveis definidas podem ser divididas em dois grupos, sendo o grupo de análise econômica e o grupo de avaliação de impactos ambientais. Os dois grupos são multiplicados para manter o equilíbrio de peso econômico-ambiental, dado que a escala decimal é diferente entre os resultados da análise ambiental e da análise econômica.

Desta forma, entre as variáveis do grupo econômico, tem-se o Custo de Perda de Material (*CPM*), o Custo de Energia Consumida (*CEC*), o Custo de Destino Material (*CDM*), o Custo de Gestão Localizada (*CGL*), o Custo de Pesquisa e Desenvolvimento (*CPD*) e o Custo de Externalidades (*CEX*). Além disso, tem-se a variável de Custo de Gestão Global (*CGG*) que surge na equação de somatória dos resultados de desempenho ambiental de todos os aspectos ambientais e serve para ser utilizado quando se deseja comparar o DA do processo industrial em estudo com o desempenho de outro processo correlato.

Para o grupo de avaliação de impactos ambientais, tem-se a Análise de Impactos por Consumo e Emissões Materiais (*AICEM*) e a Análise de Impactos por Consumo Energético (*AICE*). Além disso, para cada categoria de dano presente no grupo AIA, existe uma ponderação através do método multicritério AHP, o qual possibilita ponderar uma determinada categoria em relação às outras, afim de representar um ajuste das condições ambientais em que a indústria está inserida.

Como considerações preliminares referentes a organização da ferramenta, seguem três observações. Primeiramente, os dados principais considerados para compor os *Inputs* da EPIP foram baseados no balanço material, balanço energético e balanço de custos, para tornar a ferramenta com um perfil mais aplicável nas indústrias, as quais são objeto principal deste estudo. Estes balanços foram selecionados devido aos seguintes fatores:

- a) As exigências dos órgãos ambientais frente as empresas, o qual exige que estas mantenham controle da gestão de resíduos através de certificados de transporte e destinação de resíduos, certificados de tratamento ou

reaproveitamento externo a empresa, laudos de efluentes e automonitoramento de emissões atmosféricas.

- b) O consumo de matérias prima e insumos das empresas são frequentemente controlados pelo setor financeiro/contabilidade da indústria, bem como o consumo energético e o gasto financeiro com resíduos. Além disso, os gastos com obrigаторiedades da lei, tais como licença, taxas, planos e estudos, os gastos com treinamentos, comunicação e conscientização, e também os de investimentos, tanto em gestão como em Pesquisa e Desenvolvimento, são controlados pelo setor financeiro/contábil da indústria.

Em segundo, devido os custos refletirem de forma direta o impacto econômico da indústria e, apenas de forma indireta o impacto ambiental, como por exemplo com a perda de material, uso energético e destino de resíduos, foi incorporado a AIA baseada na AICV para balancear o econômico-ambiental.

Por fim, em terceiro, vale ressaltar que o índice “*n*” presente em cada fator principal refere-se ao número do aspecto ambiental levantado. O aspecto ambiental, segundo a NBR ISO 14.001 (ABNT, 2004a) pode ser definido como um elemento de atividades, produtos ou serviços de uma empresa qualquer que gera impacto ambiental, seja este impacto ocasionado pelo consumo de recursos naturais ou pela liberação de resíduos (materiais não agregados ao produto). As oito variáveis construídas para compor o equacionamento matemático da EPIP estão detalhados nos itens 4.1 à 4.8. A variável *CEx* não foi abordada neste detalhamento, pelas razões já discutidas anteriormente.

## 5.1 EQUAÇÕES PRINCIPAIS DA EPIP

A EPIP pode ser organizada por três equações principais. A primeira equação é o cálculo do Custo do Aspecto Ambiental ( $C_{AA}(n)$ ) (Equação (30)).

$$C_{AA}(n) = [CPM(n) + CEC(n) + CDM(n) - CGL(n) - CPD(n) + CEx(n)] \cdot [ICEM(n) + IEC(n)] \quad (30)$$

Nesta equação,  $CPM(n)$  corresponde a variável de Custo de Perda Material para cada aspecto ambiental  $n$ ,  $CEC(n)$  a variável de Custo de Energia Consumida

para cada aspecto ambiental  $n$ ,  $CDM(n)$  o Custo de Destino Material para cada aspecto ambiental  $n$ ,  $CGL(n)$  o Custo de Gestão Localizada para cada aspecto ambiental  $n$ ,  $CPD(n)$  o Custo de Pesquisa e Desenvolvimento para cada aspecto ambiental  $n$ ,  $CEx(n)$  o Custo de Externalidades para cada aspecto ambiental  $n$ ,  $ICEM(n)$  o Impacto ambiental do consumo e/ou emissão de material para o meio ambiente para cada aspecto  $n$  e  $IEC(n)$  o Impacto ambiental do consumo de determinado tipo de energia para cada aspecto ambiental  $n$ . Nota-se que as variáveis  $CGL(n)$  e  $CPD(n)$  apresentam sinal negativo, pois considera-se que estes custos representam esforços já realizados pela empresa para a melhoria de um determinado número de aspectos ambientais, reduzindo conseqüentemente o valor do desempenho ambiental dos aspectos relacionados a estes custos. Este sinal negativo é aplicado quando o  $CGL(n)$  e  $CPD(n)$  retornaram em melhorias para os referidos aspectos ambientais. Caso estes custos não tenham dado retorno para melhoria do aspecto ambiental, o sinal destes custos de gestão localizada e de pesquisa e desenvolvimento pode ser alterado para positivo, indicando um aumento da necessidade de melhoria destes aspectos ambientais.

Para todas as variáveis de custos, a unidade de medida é a unidade monetária \$. As variáveis de impacto ambiental possuem resultados adimensionais. Desta forma, a unidade de medida criada e adotada para o resultado da variável  $C_{AA}(n)$  foi a  $\$_{eq}$  (Unidade Monetária Equivalente). Esta unidade foi criada, pois o valor do custo do aspecto ambiental não corresponde a um resultado monetário real, dado que os valores monetários obtidos para cada variável de custo são transformados através da multiplicação delas com os valores de impactos ambientais. Assim, o valor do custo do aspecto ambiental em  $\$_{eq}$ , apesar de não ser o valor econômico real gasto, é considerado o valor mais adequado para representar o equilíbrio econômico-ambiental

A segunda equação corresponde ao cálculo do Custo Total dos Aspectos ambientais  $C_{AA}T$ , conforme Equação (31). O  $C_{AA}T$  representa a somatória de  $n=1$  até  $n=i$ , dos Custos de Aspecto Ambiental  $C_{AA}(n)$ , mais o Custo de Gestão Global ( $CGG$ ), que refere-se aos gastos da indústria com ações de gestão ambiental que tenham impacto em toda a empresa, sendo  $i$  o número total de aspectos ambientais levantados no processo industrial em análise. Por fim, a terceira equação representa

o Custo Relativo  $CR\%(n)$  de cada aspecto ambiental  $n$ , que é obtido da razão entre o  $C_{AA}(n)$  e o  $C_{AA}T - CGG$  (Equação (32)).

$$C_{AA}T = \sum_{n=1}^i C_{AA}(n) + CGG \quad (31)$$

$$CR\%(n) = \frac{C_{AA}(n)}{C_{AA}T - CGG} \quad (32)$$

Na sequência, são detalhadas as equações que calculam cada variável presente nos Custo de Aspecto Ambiental ( $C_{AA}(n)$ ).

## 5.2 CUSTO DE PERDA MATERIAL ( $CPM(n)$ )

A variável de Custo de Perda Material ( $CPM(n)$ ), corresponde a quantificação em custos da quantidade de matéria perdida para cada aspecto ambiental  $n$  (em R\$). Para mensurá-la, foi construída a Equação (33), onde  $MP_{1 \times m}(n)$  é a matriz-linha de quantidade mássica de cada material perdido  $m$  como resíduo (em kg) para o aspecto ambiental  $n$ , sendo que o resíduo pode ser sólido, líquido ou gasoso, e  $CM_{m \times 1}(n)$  a matriz-coluna de custo unitário de cada material  $m$  no resíduo (em R\$.kg<sup>-1</sup>). Vale ressaltar que a soma das massas de cada material perdido que compõe o aspecto ambiental resulta na massa de *Output*, também chamada de massa de saída ( $M_{OUT}(n)$ ).

$$CPM(n) = MP_{1 \times m}(n) \cdot CM_{m \times 1}(n) \quad (33)$$

A FIGURA 10 apresenta a Equação (33) em formato aberto para melhor visualização de suas variáveis, correspondente ao cálculo do custo de perda material para um aspecto ambiental  $n=1$ .

$$CPM(1) = [MP_{11}(1) \quad MP_{12}(1) \quad \dots \quad MP_{1m}(1)] \cdot \begin{bmatrix} CM_{11}(1) \\ CM_{21}(1) \\ \vdots \\ CM_{m1}(1) \end{bmatrix}$$

FIGURA 10 - Equação (33) aberta para o cálculo do CPM para um aspecto ambiental  $n=1$ .  
Fonte: O Autor (2014).

### 5.3 CUSTO DE ENERGIA CONSUMIDA ( $CEC(n)$ )

A variável de Custo de Energia Consumida,  $CEC(n)$ , corresponde a um balanço de custos de uso energético no processamento do aspecto ambiental  $n$ , seja este aspecto produto ou resíduo. Na Equação (34)  $EG(n)$  é a energia gasta para o processamento do aspecto ambiental  $n$  (em kW.h),  $CE(n)$  é o custo unitário da energia (em R\$.kWh<sup>-1</sup>), e  $PE(n)$  é a percentagem (em %) da massa de material do aspecto ambiental  $n$ , ou seja, massa de *Output* (saída) que compõe este aspecto ambiental ( $M_{OUT}(n)$ ) em relação a massa de entrada de matéria prima e insumos processados, ou massa de *Input* ( $M_{IN}(n)$ ).

$$CEC(n) = EG(n) \cdot CE(n) \cdot PE(n) = EG(n) \cdot CE(n) \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{M_{IN}(n)} \quad (34)$$

### 5.4 CUSTO DE DESTINO MATERIAL ( $CDM(n)$ )

A variável de Custo de Destino Material,  $CDM(n)$ , corresponde a um balanço de custos de destino dos materiais no aspecto ambiental  $n$ . Conforme a hierarquia de resíduos de Crittenden e Kolaczowski (1995) e as formas de destinação de resíduos de Cercal (2000), foram consideradas as formas de destinação de resíduos da TABELA 6, da mais adequada para a mais inadequada.

Com isso, foi construída a Equação (35), onde  $CDM(n)$  representa o custo de destino material (em R\$),  $M_{OUT}(n)$  a quantidade total de material no aspecto ambiental  $n$  (kg) a ser destinado, que na verdade corresponde a massa de saída deste aspecto ambiental,  $D_{i,d}^{\%}(n)$  a matriz-linha de percentagem da quantidade total

de material no aspecto ambiental  $n$  que segue para o destino  $d$  (em %) e  $CD_{d,1}(n)$  a matriz-coluna de custo unitário de destinação do material no aspecto ambiental  $n$  para cada destinação  $d$  (em R\$.kg<sup>-1</sup>).

TABELA 6 - Destinos materiais  $d$  considerados no cálculo dos Custos de Destino Material.

Nº ( $d$ )	Descrição de destino $d$
1	Reuso do resíduo na fonte
2	Reuso do resíduo na própria empresa de geração
3	Reciclagem do resíduo na própria empresa de geração
4	Reuso do resíduo em outra empresa (com transporte entre empresas), pela venda, doação ou pagamento.
5	Reciclagem do resíduo em outra empresa (com transporte entre empresas), pela venda, doação ou pagamento.
6	Tratamento do resíduo na própria empresa de geração, com disposição dos restos de tratamento na mesma empresa.
7	Tratamento do resíduo na própria empresa de geração, com disposição dos restos de tratamento em uma empresa externa (com transporte entre empresas).
8	Transporte, tratamento e disposição externa do resíduo.
9	Transporte e disposição externa do resíduo, sem tratamento.
10	Disposição inadequada do resíduo (fora dos requisitos legais vigentes).

Fonte: O Autor (2014)

$$CDM(n) = M_{OUT}(n) \cdot D_{1,d}^{\%}(n) \cdot CD_{d,1}(n) \quad (35)$$

Um exemplo da Equação (35) no formato aberto pode ser visualizado através da FIGURA 11, a qual corresponde ao cálculo do custo de destino de uma quantidade de material qualquer presente no aspecto ambiental  $n=1$ .

$$CDM(1) = M_{OUT}(1) \cdot \begin{bmatrix} D_{11}(1) & D_{12}(1) & \dots & D_{1,10}(1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} CD_{11}(1) \\ CD_{21}(1) \\ \vdots \\ CD_{10,1}(1) \end{bmatrix}$$

FIGURA 11 - Equação (35) aberta para o cálculo do custo de destino material para um aspecto ambiental  $n=1$ .

Fonte: O Autor (2014)

## 5.5 CUSTO DE GESTÃO LOCALIZADA ( $CGL(n)$ )

A variável de Custo de Gestão Localizada,  $CGL(n)$ , corresponde a um levantamento dos gastos já realizados pela indústria no período de tempo entre

avaliações de desempenho ambiental através da EPIP, tais como gastos com treinamento, comunicação e conscientização, manutenção de maquinários, investimento em equipamentos de controle, e outros gastos que demonstram a tomada de ação da indústria em relação a um número determinado de aspectos ambientais. Observa-se que caso os gastos realizados pela indústria com gestão abranjam todos os aspectos ambientais, tais como implementação de sistemas de gestão ambiental, auditorias ambientais, dentre outras, estes são contabilizados apenas na variável de Custo de Gestão Global ( $CGG$ ), conforme descrito no item 4.1. Neste contexto, a Equação (36) representa o cálculo do Custo de Gestão Localizada, sendo  $CTGL_{GAA}$  a soma dos Custos Totais de Gestão Localizada (em R\$) que abrange um número específico de aspectos ambientais igual a  $N$ , sendo este número inferior ao número total de aspectos ambientais levantados na indústria,  $M_{OUT}(n)$  a quantidade em massa de saída do aspecto ambiental  $n$ , e  $N$  o número (em unidades) de aspectos ambientais que compõe este grupo que foi beneficiado com os gastos em gestão, sendo  $1 \leq N < i$ . Vale aqui lembrar que  $i$ , conforme descrito no final do item 4.1, corresponde ao número total de Aspectos Ambientais levantados no processo industrial em análise.

$$CGL(n) = CTGL_{GAA} \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{\sum_{n=1}^N M_{OUT}(n)} \quad (36)$$

## 5.6 CUSTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO ( $CPD(n)$ )

A variável de Custo de Pesquisa e Desenvolvimento ( $CPD(n)$ ) corresponde a um levantamento dos investimentos realizados pela indústria no período de tempo entre avaliações de desempenho ambiental através da EPIP para melhorar um determinado número de aspectos ambientais. Estes investimentos incluem estudos para melhoria do produto, tais como troca de materiais, redesenho do produto ou mesmo o projeto de novos produtos para substituição, ou para melhoria de processo, tais como a troca de maquinários por equipamentos mais modernos ou a reformulação e/ou redução de etapas de produção. Pode-se dizer que a diferença que existe entre esta variável de  $CPD(n)$  e a variável de  $CGL(n)$  é que a primeira

envolve investimentos de maior custo, que normalmente demandam de um projeto paralelo com uma equipe responsável, e que comumente gera mudanças significativas na forma de produzir, já a segunda corresponde a gastos para que a indústria controle suas atividades e mantenha ou melhore seu desempenho ambiental, porém sem grandes mudanças na forma de produção.

Desta forma, a Equação (37) representa o cálculo do  $CPD(n)$ , sendo que corresponde ao Custo de Pesquisa e Desenvolvimento investido que abrange um número específico de aspectos ambientais, sendo este número inferior ao número total de aspectos ambientais levantados na indústria,  $M_{OUT}(n)$  a quantidade em massa de saída do aspecto ambiental  $n$ , e  $P$  o número (em unidades) de aspectos ambientais que compõe este grupo que foi beneficiado com os gastos com pesquisa e desenvolvimento, sendo  $1 \leq P < i$ . Ressalta-se aqui que tanto o número de aspectos ambientais ( $N$ ) como o próprio tipo dos aspectos ambientais beneficiados por gastos em gestão não necessariamente serão iguais ao número ( $P$ ) e tipos de aspectos ambientais beneficiados com investimentos de P&D.

$$CPD(n) = CPD_{GAA} \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{\sum_{n=1}^P M_{OUT}(n)} \quad (37)$$

## 5.7 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA (AICV)

A AICV foi introduzida na análise da EPIP como forma de ajustar o peso de impactos ambientais na valoração econômica, afim de se obter um melhor equilíbrio econômico-ambiental. Esta introdução foi proposta através de duas variáveis, sendo elas a variável de Impactos Ambientais de Consumo e Emissão de Materiais ( $ICEM(n)$ ) e a variável de Impactos Ambientais de Energia Consumida ( $IEC(n)$ ). Os impactos ambientais foram organizados para estas duas variáveis através de categorias de Danos Ambientais, sendo estes danos obtidos da adaptação de cinco métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, sendo eles: IMPACT 2002+ vQ2.22 (JOLLIET *et al.*, 2003; HUMBERT *et al.*, 2015), EDIP 2003 (HAUSCHILD e POTTING, 2005) e ReCiPe (LCIA-RECIPE, 2014), Pegada Hídrica (PFISTER *et al.*, 2009) e Demanda Cumulativa de Energia (DCE) (FRISCHKNECHT *et al.*, 2003).

Estes métodos foram selecionados devido a seguinte análise:

- a) Conforme Carvalho *et al.* (2014), os métodos mais utilizados de AICV entre os anos de 2005 e 2011 foram o Eco-indicator 99, o IMPACT 2002+, o CML, o EDIP, o EPD e o ReCiPe.
- b) O método IMPACT 2002+ corresponde a uma combinação dos métodos IMPACT 2002, Eco-indicator 99, CML e IPCC (JOLLIET *et al.*, 2003).
- c) O método ReCiPe é considerado uma evolução dos métodos CML 2001 e Eco-indicator 99 (GOEDKOOPE *et al.*, 2011).
- d) O método EDIP possui categorias de impacto relacionadas a resíduos não presentes nos outros métodos.
- e) O método EPS não possui evolução recente de atualização e obtém seu resultado ponderado na forma de valores monetários (ANGELAKOGLU e GAIDAJIS, 2015), que já é abordado por outros fatores previstos na EPIP.
- f) O uso de energia e uso de água são fatores críticos ambientais na atualidade para as indústrias, devendo ser abordados de forma completa na AICV. Desta forma, foram selecionados dois métodos específicos para estas análises, a Pegada Hídrica e a Demanda Cumulativa de Energia, por serem considerados adequados para avaliar o consumo destes recursos em um nível industrial (ANGELAKOGLU e GAIDAJIS, 2015).

Após a seleção destes cinco métodos para composição da AICV na EPIP, estes métodos foram analisados para verificar as sobreposições de categorias de impacto e a aplicabilidade para indústrias das categorias de impacto. Foi considerado como o método referência o IMPACT 2002+, por ser considerado um método combinado que abrange outros métodos selecionados para composição da AICV. Neste contexto, o resumo desta análise, com a obtenção das categorias de impacto finais consideradas para composição na  $ICEM(n)$  e  $IEC(n)$  são apresentadas na FIGURA 12.

#### 5.7.1 Impactos Ambientais de Consumo e Emissão de Materiais ( $ICEM(n)$ )

A variável de Impactos Ambientais de Consumo e Emissão de Materiais ( $ICEM(n)$ ) corresponde a um cálculo dos impactos ambientais para cada aspecto ambiental em relação a sua massa de *Output*. Os impactos ambientais foram

organizados na Equação (38) através de categorias de Danos Ambientais, sendo estes danos obtidos da adaptação dos métodos IMPACT 2002+ vQ2.22 (JOLLIET *et al.*, 2003; HUMBERT *et al.*, 2015), EDIP 2003 (HAUSCHILD e POTTING, 2005), ReCiPe (LCIA-RECIPE, 2014) e Pegada Hídrica (PFISTER *et al.*, 2009), conforme a FIGURA 12.

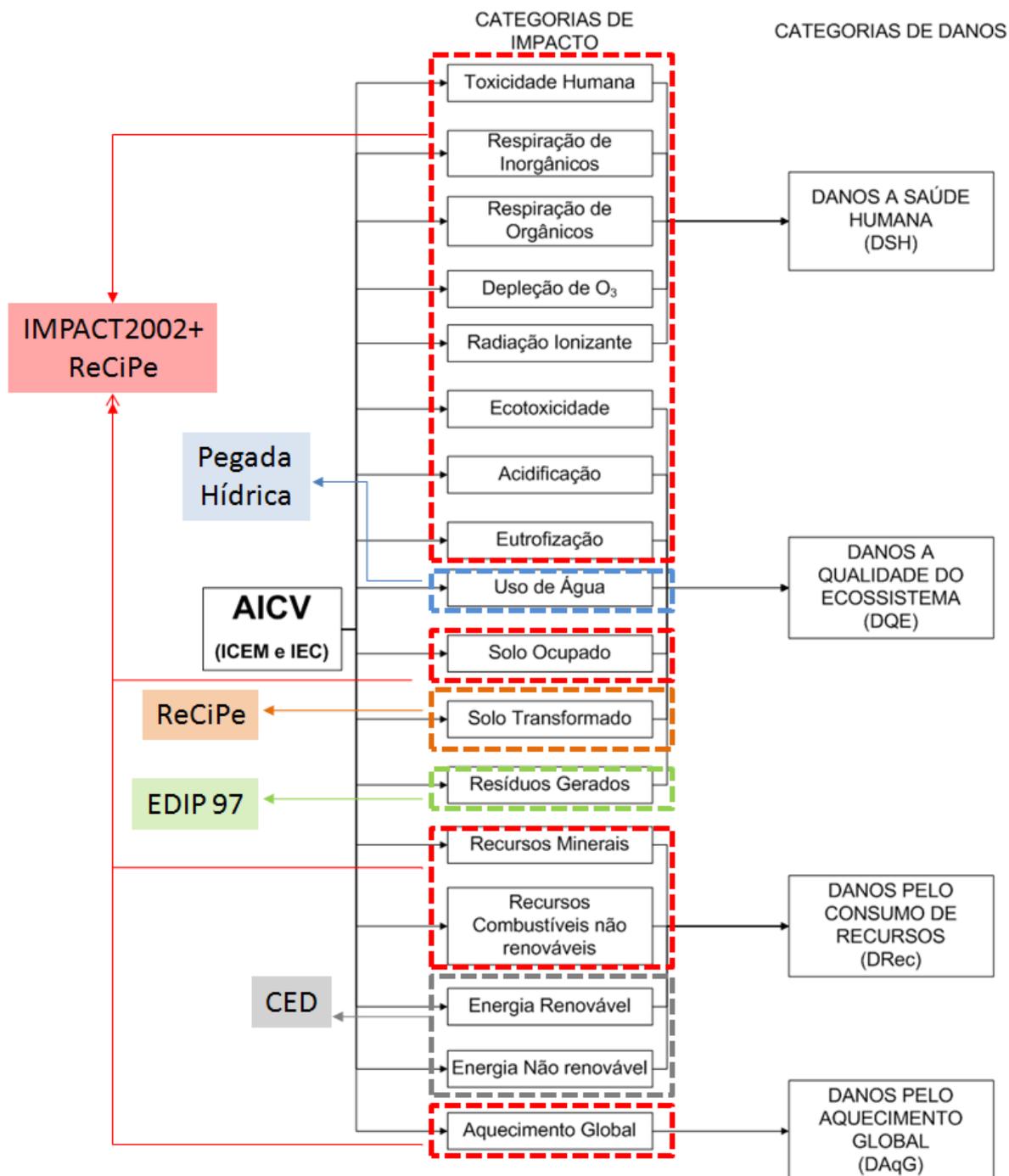


FIGURA 12 - Categorias de impacto e de danos consideradas na AICV da ferramenta EPIP.  
Fonte: O Autor (2015)

Desta forma, o cálculo do  $ICEM(n)$ , conforme Equação (38), foi organizado para considerar, além da  $M_{OUT}(n)$  (em kg), os impactos ambientais que podem gerar Danos a Saúde Humana ( $DSH(n)$ ) (em  $kg^{-1}$ ), Danos na Qualidade do Ecossistema ( $DQE(n)$ ) (em  $kg^{-1}$ ), Danos por Resíduos Gerados ( $DRG(n)$ ) (em  $kg^{-1}$ ), Danos pelo uso de Recursos ( $DRec(n)$ ) (em  $kg^{-1}$ ) e os Danos do Aquecimento Global ( $DAqG(n)$ ) (em  $kg^{-1}$ ). Cada um destes danos possui fatores de ponderação, sendo  $PD_{SH}$  o fator de ponderação de Danos a Saúde Humana,  $PD_{QE}$  o fator de ponderação de Danos a Qualidade do Ecossistema,  $PD_{Rec}$  o fator de ponderação de Danos ao consumo de Recursos e  $PD_{AqG}$  o fator de ponderação de Danos pelo Aquecimento Global.

$$ICEM(n) = M_{OUT}(n) \cdot [PD_{SH} \cdot DSH(n) + PD_{QE} \cdot (DQE(n) + DRG(n)) + PD_{Rec} \cdot DRec(n) + PD_{AqG} \cdot DAqG(n)] \quad (38)$$

Todos os fatores de ponderação de danos são adimensionais e seus valores podem ser obtidos de duas formas: a) pode-se optar pela utilização dos fatores de ponderação já presentes no método IMPACT 2002+ v.Q2.22, que considera o valor 1 para todas as categorias de danos, caso não se tenha conhecimento adequado da qualidade do meio ambiente de entorno da indústria para realizar uma ponderação própria; b) pode-se optar pela obtenção dos fatores de ponderação de danos obtidos através da aplicação do método multicritério AHP, os quais compara e classifica os danos entre si, conforme classes de importância. Esta opção (b) possui maior detalhamento no item 4.7.3. Observa-se ainda que, apesar do dano pelo aquecimento global ser alocado como um fator separado dos outros fatores de danos, o impacto com o aquecimento global muitas vezes é alocado dentro do fator de danos a saúde humana, como nos métodos de AICV Eco-Indicator e CML. Desta forma, pode-se utilizar a relação de ponderação  $PD_{SH} = PD_{AqG}$ .

Na equação para o cálculo do  $ICEM(n)$ , as variáveis de Danos possuem equações específicas de cálculo, sendo compostas por categorias de impactos ambientais, fatores de ponderação por categorias de impacto e fatores de normalização de categorias. Desta forma, a Equação (39) representa o cálculo dos Danos na Saúde Humana, sendo  $TH(n)$  (em  $kg_{Eq} C_2H_3Cl.kg^{-1}$ ),  $RIn(n)$  (em  $kg_{Eq}$

$PM_{2,5}.kg^{-1}$ ),  $ROrg(n)$  (em  $kg_{Eq} C_2H_4.kg^{-1}$ ),  $DO(n)$  (em  $kg_{Eq} CFC-11.kg^{-1}$ ) e  $RI(n)$  (em  $Bq_{Eq} C_{14}.kg^{-1}$ ) os fatores de caracterização,  $P_{TH}$ ,  $P_{RIn}$ ,  $P_{ROrg}$ ,  $P_{DO}$ , e  $P_{RI}$  os fatores de ponderação (adimensionais), e  $N_{TH}$  (em  $kg_{Eq} C_2H_3Cl$ ),  $N_{RIn}$  (em  $kg_{Eq} PM_{2,5}$ ),  $N_{ROrg}$  (em  $kg_{Eq} C_2H_4$ ),  $N_{DO}$  (em  $kg_{Eq} CFC-11$ ) e  $N_{RI}$  (em  $Bq_{Eq} C_{14}$ ) os fatores de normalização, sendo os três tipos de fatores (caracterização, ponderação e normalização) aplicados para as categorias de impacto de toxicidade humana (TH), respiração de compostos inorgânicos (RIn), respiração de compostos orgânicos (ROrg), depleção da camada de ozônio (DO) e radiação ionizante(RI), respectivamente. Observa-se também que a unidade Bq (Bequerel) é a unidade de medida do sistema internacional para quantificação de radiação, que corresponde a quantidade de material radioativo em que um átomo se transforma por segundo.

$$DSH(n) = \left[ P_{TH} \cdot \frac{TH(n)}{N_{TH}} + P_{RIn} \cdot \frac{RIn(n)}{N_{RIn}} + P_{ROrg} \cdot \frac{ROrg(n)}{N_{ROrg}} + P_{DO} \cdot \frac{DO(n)}{N_{DO}} + P_{RI} \cdot \frac{RI(n)}{N_{RI}} \right] \quad (39)$$

A Equação (40) representa o cálculo dos Danos na Qualidade do Ecossistema, sendo  $Ec(n)$  (em  $kg_{Eq} TEG.kg^{-1}$ ),  $Ac(n)$  (em  $kg_{Eq} SO_2.kg^{-1}$ ),  $Eut(n)$  (em  $kg_{Eq} PO_4^{-3}.kg^{-1}$ ),  $SO(n)$  (em  $m^2.a_{Eq} solo\ orgânico\ arado.m^{-2}.a^{-1}$ ),  $ST(n)$  (em  $m^2_{Eq}.m^{-2}$ ) e  $UA(n)$  (em  $m^3_{Eq}.m^{-3}$ ) os fatores de caracterização,  $P_{Ec}$ ,  $P_{Ac}$ ,  $P_{Eut}$ ,  $P_{SO}$ ,  $P_{ST}$  e  $P_{UA}$  os fatores de ponderação (adimensionais), e  $N_{Ec}$  (em  $kg_{Eq} TEG$ ),  $N_{Ac}$  (em  $kg_{Eq} SO_2$ ),  $N_{Eut}$  (em  $kg_{Eq} PO_4^{-3}$ ),  $N_{SO}$  (em  $m^2.a_{Eq} solo\ orgânico\ arado$ ),  $N_{ST}$  ( $m^2_{Eq}$ ) e  $N_{UA}$  (em  $m^3_{Eq}$ ) os fatores de normalização, sendo os três tipos de fatores (caracterização, ponderação e normalização) aplicados para as categorias de impacto de Ecotoxicidade (Ec), Acidificação (Ac), Eutrofização (Eut), Solo Ocupado (SO), Solo Transformado (ST) e Uso de Água (UA), respectivamente.

$$DQE(n) = \left[ P_{Ec} \cdot \frac{Ec(n)}{N_{Ec}} + P_{Ac} \cdot \frac{Ac(n)}{N_{Ac}} + P_{Eut} \cdot \frac{Eut(n)}{N_{Eut}} + P_{SO} \cdot \frac{SO(n)}{N_{SO}} + P_{ST} \cdot \frac{ST(n)}{N_{ST}} + P_{UA} \cdot \frac{UA(n)}{N_{UA}} \right] \quad (40)$$

A Equação (41) representa o cálculo dos Danos por Resíduos Gerados, sendo  $RP(n)$ ,  $RNP(n)$ ,  $EC(n)$  e  $RR(n)$  (em  $kg.kg^{-1}$ ) os fatores de caracterização,  $P_{RP}$ ,  $P_{RNP}$ ,  $P_{EC}$  e  $P_{RR}$  os fator de ponderação (adimensional), e  $N_{RP}$ ,  $N_{RNP}$ ,  $N_{EC}$  e  $N_{RR}$  (em kg) o fatores de normalização, sendo estes três fatores (caracterização, ponderação

e normalização) para as categorias de Resíduos Perigosos (RP), Resíduos Não Perigosos (RNP), Escórias e Cinzas (EC) e Resíduos Radioativos (RR).

$$DRG(n) = \left[ P_{RP} \cdot \frac{RP(n)}{N_{RP}} + P_{RNP} \cdot \frac{RNP(n)}{N_{RNP}} + P_{EC} \cdot \frac{EC(n)}{N_{EC}} + P_{RR} \cdot \frac{RR(n)}{N_{RR}} \right] \quad (41)$$

A Equação (42) representa o cálculo dos Danos pelo Consumo de Recursos, sendo  $RM(n)$  (em  $\text{kg}_{\text{Eq}} \text{Fe} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) e  $RCNR(n)$  (em  $\text{kg}_{\text{Eq}} \text{óleo cru} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) os fatores de caracterização,  $P_{RM}$  e  $P_{RCNR}$  os fatores de ponderação (adimensionais), e  $N_{RM}$  (em  $\text{kg}_{\text{Eq}} \text{Fe}$ ) e  $N_{RCNR}$  (em  $\text{kg}_{\text{Eq}} \text{óleo cru}$ ) os fatores de normalização, sendo os três tipos de fatores (caracterização, ponderação e normalização) aplicados para as categorias de impacto de recursos minerais (RM) e recursos combustíveis não renováveis (RCNR), respectivamente. Por fim, a Equação (43) representa o cálculo dos Danos pelo Aquecimento Global, sendo  $AqG(n)$  (em  $\text{kg}_{\text{Eq}} \text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) o fator de caracterização,  $PD_{AqG}$  o fator de ponderação (adimensional), e  $N_{AqG}$  (em  $\text{kg}_{\text{Eq}} \text{CO}_2$ ) o fator de normalização para a categoria de impacto de aquecimento global.

$$DRec(n) = \left[ P_{RM} \cdot \frac{RM(n)}{N_{RM}} + P_{RCNR} \cdot \frac{RCNR(n)}{N_{RCNR}} \right] \quad (42)$$

$$DAqG(n) = PD_{AqG} \cdot \frac{AqG(n)}{N_{AqG}} \quad (43)$$

Os valores dos fatores de normalização das categorias de impactos foram organizados na TABELA 7, sendo estes valores obtidos dos métodos AICV, conforme descrição na tabela. Os valores dos fatores de ponderação para cada categoria de impacto podem ser obtidos através da aplicação do método multicritério AHP, que possibilita comparar e classificar as categorias de impacto entre si. A obtenção dos valores dos fatores de ponderação possui maior detalhamento no item 5.7.3. Vale ressaltar aqui que caso opte por utilizar a ponderação por categorias de Danos, os valores da ponderação para as categorias de impacto assumem a unidade, pois senão a ponderação seria realizada duas vezes e geraria resultados sobrepostos. O mesmo vale para o inverso, ou seja, caso opte pela ponderação entre as categorias de impacto, os valores de ponderação para as categorias de Danos assume a unidade.

TABELA 7 - Fatores de normalização das categorias de impacto que compõe a AICV da EPIP.

Fatores de Normalização das categorias de impacto	Sigla	Valor	Unidade	Método de Referência
Toxicidade Humana	$N_{TH}$	219	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	IMPACT 2002+
Respiração de Inorgânicos	$N_{RI}$	8,8	kg PM <sub>2,5</sub>	IMPACT 2002+
Respiração de Orgânicos	$N_{ROrg}$	12,4	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	IMPACT 2002+
Depleção da Camada de Ozônio	$N_{DO}$	0,204	kg CFC-11	IMPACT 2002+
Radiação Ionizante	$N_{RI}$	$5,33.10^5$	Bq C <sub>14</sub>	IMPACT 2002+
Respiração de Inorgânicos PM <sub>10</sub>	$N_{RI_{h0}}$	14,1	kg PM <sub>10</sub>	ReCiPe
Ecotoxicidade	$N_{Ec}$	$1,36.10^6$	kg TEG	IMPACT 2002+
Acidificação	$N_{Ac}$	66,2	kg SO <sub>2</sub>	IMPACT 2002+
Eutrofização	$N_{Eut}$	14,3	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	IMPACT 2002+
Solo Ocupado (uso do solo)	$N_{SO}$	$3,43.10^3$	m <sup>2</sup> .a	IMPACT 2002+
Solo Transformado (uso do solo)	$N_{ST}$	12,0	m <sup>2</sup>	ReCiPe
Uso/consumo de água	$N_{UA}$	$1,70.10^4$	m <sup>3</sup>	Pegada Ecológica
Resíduos Perigosos	$N_{RP}$	20,70	Kg	EDIP 97
Resíduos Não Perigosos	$N_{RNP}$	1350	Kg	EDIP 97
Escórias e Cinzas	$N_{EC}$	350	Kg	EDIP 97
Resíduos Radioativos	$N_{RR}$	0,16	Kg	EDIP 97
Consumo de Recursos Minerais	$N_{RM}$	$5,73.10^3$	kg Fe	IMPACT 2002+
Consumo de Recursos Combustíveis Não Renováveis	$N_{RCNR}$	$3,32.10^3$	kg óleo cru	IMPACT 2002+
Aquecimento Global	$N_{AqG}$	$1,16.10^4$	kg CO <sub>2</sub>	IMPACT 2002+
Energia Consumida	$N_E$	$1,51.10^5$	MJ	CED

Fonte: O Autor (2015)

### 5.7.2 Impactos Ambientais da Energia Consumida ( $IEC(n)$ )

A variável de Impactos Ambientais de Energia Consumida ( $IEC(n)$ ) quantifica os impactos ambientais para cada aspecto ambiental referente a energia consumida no processamento do aspecto ambiental  $n$ . Os impactos ambientais foram organizados por categorias de impactos ambientais de uso de energia, sendo obtidas pela junção e adaptação dos dados de energia não renovável do método de AICV IMPACT 2002+ v.Q2.22 (JOLLIET *et al.*, 2003; HUMBERT *et al.*, 2015) e os dados de energia renovável e energia não renovável do método de AICV de Demanda Cumulativa de Energia (FRISCHKNECHT *et al.*, 2003).

O cálculo do  $IEC(n)$  foi organizado, conforme Equação (44), sendo  $EC(n)$  (em kWh) e  $PE(n)$  (em %) variáveis já apresentadas na Equação (34) de CEC,  $PD_{Rec}$  o fator de ponderação de danos pelo consumo de recursos (adimensional),  $ER(n)$  e  $ENR(n)$  (em MJ.kg<sup>-1</sup> ou MJ.m<sup>-3</sup> ou MJ.MJ<sup>-1</sup>, conforme tipo de energia usado)

os fatores de caracterização, e  $P_{ER}(n)$  e  $P_{ENR}(n)$  os fatores de ponderação (adimensionais), sendo estes dois tipos de fatores (caracterização e ponderação) aplicados para as categorias de impacto de energia renovável (ER) e energia não renovável (ENR), respectivamente, e  $N_E$  o fator de normalização de energia.

$$IEC(n) = EC(n) \cdot PE(n) \cdot PD_{Rec} \left[ \frac{P_{ER} \cdot ER(n) + P_{ENR} \cdot ENR(n)}{N_E} \right] \quad (44)$$

Observa-se que no cálculo do  $IEC(n)$ , o valor da ponderação utilizado em relação a categoria de danos é o fator de ponderação de danos pelo consumo de recursos. Isto porque o consumo de energia e o conseqüente impacto ambiental deste consumo se enquadra na categoria de danos em recursos. Além disso, a escolha definida para o cálculo do  $ICEM(n)$  em relação aos fatores de ponderação, se pela ponderação por categorias de danos ou pela ponderação por categorias de impacto, assumindo para a opção não escolhida o valor da unidade para os fatores de ponderação, é também utilizada no cálculo do  $IEC(n)$ .

### 5.7.3 Multicritério de Apoio à Decisão na Ponderação de Fatores

O método multicritério AHP foi utilizado para quantificar os valores dos fatores de ponderação de danos para aplicação nos estudos de caso do Capítulo 5. Foi escolhida a ponderação por fatores de danos por considerar um conhecimento limitado das condições de meio ambiente de entorno para as empresas utilizadas nos estudos de caso. Ressalta-se que pode ser utilizada a ponderação por categorias de impacto, desde que se conheça com detalhes a importância de cada categoria de impacto em relação a área de estudo.

O primeiro passo da ponderação pelo AHP foi a definição do número de categorias de danos a serem analisadas. Assim, foi definido que a ponderação deveria ocorrer entre as categorias de Danos à saúde humana, Danos a qualidade do ecossistema, Danos pelo consumo de recursos e Danos de aquecimento global. O fator de ponderação de danos pela geração de resíduos foi considerada igual ao fator de ponderação de danos a qualidade do ecossistema, conforme classificação de categorias de impacto e de danos realizada por Carvalho *et al.* (2014).

No segundo passo, foi realizada a análise comparativa de importância, ou seja, os julgamentos de importância entre categorias de danos, conforme a escala de Saaty (SAATY, 2000). Nesta análise paritária de julgamentos, foi considerado que os danos à saúde humana foi a categoria de danos de maior importância. Assim, pode ser visualizado no QUADRO 8 o resultado dos julgamentos paritários para as quatro categorias de danos.

<b>Critério 1</b>	<b>Critério 2</b>	<b>Julgamento</b>	<b>Valor de Saaty</b>	<b>Motivo</b>
Danos à saúde humana	Danos a qualidade do ecossistema	Importância muito forte do critério 1 em relação ao critério 2	7	As empresas estudadas são de médio e pequeno porte, com baixa influência sobre a qualidade do ecossistema de entorno. Já os danos a saúde humana podem ser consideráveis, pois as indústrias estudadas possuem atividades com potencial de dano aos trabalhadores e de impacto no entorno.
Danos à saúde humana	Danos pelo uso de recursos	Importância moderada do critério 1 em relação ao critério 2	3	As empresas estudadas se encontram em áreas (Região da grande Curitiba) que tem sido atingidas pela variação da disponibilidade de recursos, principalmente em relação a energia e a disponibilidade de recursos combustíveis não renováveis.
Danos à saúde humana	Danos para o Aquecimento Global	Importância extrema do critério 1 em relação ao critério 2	9	Devido ao porte das empresas, pode-se dizer que o impacto delas em relação ao aquecimento global é desprezível, principalmente quando comparado ao potencial de danos a saúde humana.
Danos a qualidade do ecossistema	Danos pelo uso de recursos	Importância forte do critério 2 em relação ao critério 1	1/5	Como já descrito em relações anteriores, os danos a qualidade do ecossistema pelas empresas são baixos pelo potencial poluidor delas. Já em relação ao uso de recursos, apesar do porte das empresas, a região apresenta variação de oferta.
Danos a qualidade do ecossistema	Danos para o Aquecimento Global	Importância moderada do critério 1 em relação ao critério 2	3	As duas categorias de danos são pouco influenciadas pelos impactos gerados nos processos das empresas dos estudos de caso, mas o aquecimento global é uma categoria de maior amplitude que a de qualidade de ecossistemas.
Danos pelo uso de recursos	Danos para o Aquecimento Global	Importância muito forte do critério 1 em relação ao critério 2	7	As empresas estudadas se encontram em áreas (Região da grande Curitiba) que tem sido atingidas pela variação para baixo da disponibilidade de recursos. Já o aquecimento global é uma categoria de efeito mais global, sendo pouco influenciado pela atividade das empresas.

QUADRO 8 - Relação dos julgamentos com os resultados da escala de Saaty e os motivos de classificação por comparação para as categorias de danos da AICV.

Fonte: O Autor (2015)

Através dos julgamentos paritários realizados com a aplicação da escala de Saaty, conforme QUADRO 8, foi obtida a matriz de julgamento da FIGURA 13.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 & 9 \\ 0,14 & 1 & 0,2 & 3 \\ 0,33 & 5 & 1 & 7 \\ 0,11 & 0,33 & 0,14 & 1 \end{bmatrix}$$

FIGURA 13 - Matriz de julgamento de Saaty construída no julgamento par a par das 10 formas de destinação dos materiais possíveis no modelo EPIP.

Fonte: O Autor (2014).

A soma dos elementos de cada coluna da matriz  $A$  produziu o vetor  $B = [ 1,58 ; 13,33 ; 4,34 ; 20 ]$ . Na sequência, cada elemento da primeira coluna da matriz  $A$  foi dividido pela soma dos elementos desta coluna (1,58), cada elemento da segunda coluna da matriz  $A$  foi dividido pela soma dos elementos desta coluna (13,33), e assim sucessivamente, formando a matriz normalizada  $A'$ . Através da soma de cada linha da matriz  $A'$  foi obtido o vetor  $A''$  correspondente ao vetor de prioridades médias locais do método AHP (FIGURA 14).

$$A' = \begin{bmatrix} 0,630 & 0,525 & 0,690 & 0,450 \\ 0,090 & 0,075 & 0,046 & 0,150 \\ 0,210 & 0,375 & 0,230 & 0,35 \\ 0,070 & 0,025 & 0,033 & 0,050 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Soma das linhas}} A'' = \begin{bmatrix} 0,574 \\ 0,090 \\ 0,292 \\ 0,044 \end{bmatrix}$$

FIGURA 14 – Representação do cálculo da Matriz  $A'$  obtida através da normalização da matriz  $A$ .

Fonte: O autor (2014)

Para análise de consistência dos dados foi utilizado o cálculo da Razão de Consistência (RC). Para isso fez-se o cálculo do  $B'$  pela multiplicação de cada valor das colunas da matriz  $A$  pelo respectivo valor da linha da matriz  $A''$  (FIGURA 15).

$$B' = \begin{bmatrix} 0,574 & 0,574 & 0,574 & 0,574 \\ 0,090 & 0,090 & 0,090 & 0,090 \\ 0,292 & 0,292 & 0,292 & 0,292 \\ 0,044 & 0,044 & 0,044 & 0,044 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 & 9 \\ 0,14 & 1 & 0,2 & 3 \\ 0,33 & 5 & 1 & 7 \\ 0,11 & 0,33 & 0,14 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,573 & 0,631 & 0,873 & 0,400 \\ 0,081 & 0,090 & 0,058 & 0,133 \\ 0,191 & 0,451 & 0,291 & 0,311 \\ 0,063 & 0,030 & 0,041 & 0,040 \end{bmatrix}$$

FIGURA 15 - Representação do cálculo da matriz  $B'$ .

Fonte: O Autor (2015)

Através da multiplicação da matriz  $B'$  pela matriz coluna unitária, foi obtida a matriz  $B''$ . Por fim, para a obtenção do  $\lambda_{\max}$ , foi calculado o determinante da matriz  $B''$  com a matriz transposta de  $A''$ . Assim, foi obtido  $\lambda_{\max} = 4,17$  (FIGURA 16).

$$B'' = \begin{bmatrix} 0,573 & 0,631 & 0,873 & 0,400 \\ 0,081 & 0,090 & 0,058 & 0,133 \\ 0,191 & 0,451 & 0,291 & 0,311 \\ 0,063 & 0,030 & 0,041 & 0,040 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,48 \\ 0,36 \\ 1,24 \\ 0,18 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \det[B'' \cdot A''^T] = \det \left[ \begin{bmatrix} 2,48 \\ 0,36 \\ 1,24 \\ 0,18 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,574 & 0,090 & 0,291 & 0,044 \end{bmatrix} \right] = 4,17$$

FIGURA 16 - Representação do cálculo do  $\lambda_{\max}$  para realização do cálculo da razão de consistência.  
Fonte: O Autor (2015)

Para o cálculo do RC foi primeiramente encontrado o valor do Índice de Consistência (IC), conforme FIGURA 17. E com o valor do Índice Randômico Médio para matriz de ordem 4 igual a 0,90 (SAATY, 1991), foi calculado o RC.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \rightarrow IC = \frac{4,17 - 4}{4 - 1} = 0,056$$

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,056}{0,90} = 0,063$$

FIGURA 17 – Representação do cálculo da razão de consistência RC.  
Fonte: O Autor (2015)

Como o valor de *RC* foi menor que 0,10, a análise de prioridades para a ponderação das categorias de danos foi consistente. Desta forma, foi construída a TABELA 8 com os valores de ponderação para as categorias de danos.

TABELA 8 - Fatores de ponderação das categorias de danos obtidos para a AICV da EPIP.

<b>Categoria de danos</b>	<b>Matriz A''</b>	<b>Fator de ponderação (em escala de 0-100)</b>
Danos à saúde humana	0,574	57,4
Danos a qualidade do ecossistema	0,090	9,0
Danos pelo uso de recursos	0,292	29,2
Danos pelo aquecimento global	0,044	4,4

Fonte: O Autor (2015)

## 5.8 RESUMO DO EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DA EPIP

A EPIP é uma ferramenta analítica de avaliação de desempenho ambiental de índice único de resultado. Sua construção foi baseada em um balanço econômico-ambiental para cada aspecto ambiental  $n$  com o propósito de auxiliar gestores na tomada de decisão na indústria em busca de melhorias ambientais.

Desta forma, foi definido, como forma de equilibrar as variáveis de avaliação ambiental (AICV) e econômica, o produto delas. Este produto foi preferido no caso da EPIP, pois isto evita um desequilíbrio de grandezas entre AICV e variáveis econômicas, a qual poderia tornar uma das duas análises desfavorável na combinação. Neste contexto, a TABELA 9 traz o resumo de todas as equações já discutidas nos itens anteriores, para composição da EPIP.

TABELA 9 - Resumo do Equacionamento matemático da EPIP.

<b>FERRAMENTA EPIP</b>		
<b>Nome</b>	<b>Equações matemáticas</b>	<b>Nº</b>
<b>Custo de Perda Material</b>	$CPM(n) = MP_{1xm}(n) \cdot CM_{m1}(n)$	(33)
<b>Custo de Consumo de Energia</b>	$CEC(n) = EG(n) \cdot CE(n) \cdot PE(n) = EG(n) \cdot CE(n) \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{M_{IN}(n)}$	(34)
<b>Custo de Destino Material</b>	$CDM(n) = M_{OUT}(n) \cdot D_{1xd}^{\%}(n) \cdot CD_{d1}(n)$	(35)
<b>Custo de Gestão Localizada</b>	$CGL(n) = CTGL_{GAA} \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{\sum_{n=1}^N M_{OUT}(n)}$	(36)
<b>Custo de Pesquisa e Desenvolvimento</b>	$CPD(n) = CPD_{GAA} \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{\sum_{n=1}^P M_{OUT}(n)}$	(37)
<b>Impacto Ambiental de Consumo e Emissão Material</b>	$ICEM(n) = M_{OUT}(n) \cdot \left[ \frac{PD_{SH} \cdot DSH(n) + PD_{QE} \cdot (DQE(n) + DRG(n)) + PD_{Rec} \cdot DRec(n) + PD_{AqG} \cdot DAqG(n)}{PD_{Rec} \cdot DRec(n) + PD_{AqG} \cdot DAqG(n)} \right]$	(38)
<b>Dano a Saúde Humana</b>	$DSH(n) = \left[ P_{TH} \cdot \frac{TH(n)}{N_{TH}} + P_{Rln} \cdot \frac{Rln(n)}{N_{Rln}} + P_{ROrg} \cdot \frac{ROrg(n)}{N_{ROrg}} + P_{DO} \cdot \frac{DO(n)}{N_{DO}} + P_{RI} \cdot \frac{RI(n)}{N_{RI}} \right]$	(39)

Continuação da Tabela 9.

<b>Dano a Qualidade do Ecossistema</b>	$DQE(n) = \left[ \begin{array}{l} P_{Ec} \cdot \frac{Ec(n)}{N_{Ec}} + P_{Ac} \cdot \frac{Ac(n)}{N_{Ac}} + P_{Eut} \cdot \frac{Eut(n)}{N_{Eut}} + P_{SO} \cdot \frac{SO(n)}{N_{SO}} + \\ P_{ST} \cdot \frac{ST(n)}{N_{ST}} + P_{UA} \cdot \frac{UA(n)}{N_{UA}} \end{array} \right]$	<b>(40)</b>
<b>Dano por Resíduo Gerado</b>	$DRG(n) = \left[ P_{RP} \cdot \frac{RP(n)}{N_{RP}} + P_{RNP} \cdot \frac{RNP(n)}{N_{RNP}} + P_{EC} \cdot \frac{EC(n)}{N_{EC}} + P_{RR} \cdot \frac{RR(n)}{N_{RR}} \right]$	<b>(41)</b>
<b>Dano pelo Consumo de Recursos</b>	$DRec(n) = \left[ P_{RM} \cdot \frac{RM(n)}{N_{RM}} + P_{RCNR} \cdot \frac{RCNR(n)}{N_{RCNR}} \right]$	<b>(42)</b>
<b>Dano pelo Aquecimento Global</b>	$DAqG(n) = PD_{AqG} \cdot \frac{AqG(n)}{N_{AqG}}$	<b>(43)</b>
<b>Impacto Ambiental de Energia Consumida</b>	$IEC(n) = EC(n) \cdot PE(n) \cdot PD_{Rec} \left[ \frac{P_{ER} \cdot ER(n) + P_{ENR} \cdot ENR(n)}{N_E} \right]$	<b>(44)</b>
<b>Custo do Aspecto Ambiental n</b>	$C_{AA}(n) = \left[ \begin{array}{l} CPM(n) + CEC(n) + CDM(n) \\ -CGL(n) - CPD(n) + CEx(n) \end{array} \right] \cdot [ICEM(n) + IEC(n)]$	<b>(30)</b>
<b>Custo Total dos Aspectos Ambientais</b>	$C_{AA}T = \sum_{n=1}^i C_{AA}(n) + CGG$	<b>(31)</b>
<b>Custo Relativo do Aspecto Ambiental n</b>	$CR\%(n) = \frac{C_{AA}(n)}{C_{AA}T - CGG}$	<b>(32)</b>

Fonte: O Autor (2015)

## 5.9 PASSOS DE APLICAÇÃO DO MODELO EPIP

Para a aplicação da EPIP, deve-se atentar para as etapas da FIGURA 18. O fluxo de aplicação da EPIP está dividido em seis estágios.

No **1º Estágio** ocorrem as etapas ligadas a coleta de informações sobre o processo produtivo, sendo necessário o levantamento do processo, a elaboração do fluxograma do processo e identificação dos aspectos ambientais relativos a matérias-prima, insumos e resíduos no processo produtivo.

O **2º Estágio** envolve as etapas de quantificação das matérias prima e insumos consumidos e os resíduos gerados para os aspectos ambientais identificados, a quantificação dos custos unitários de cada material utilizado no processo, levantamento das potências e tempos de uso das máquinas ao longo do processo produtivo, a quantificação dos destinos de resíduos e os tipos de destinos adotados e o preenchimento das fichas de coleta de dados. Vale ressaltar que os

dados quantificados levantados devem considerar um referencial de produção pré definido, tal como um lote produzido, uma unidade de produto produzida ou uma quantidade produzida em um tempo pré-definido como dia, semana, mês ou ano.

O **3º Estágio** trata do levantamento dos custos de Gestão, que envolve a quantificação dos custos relacionados a medidas localizadas de gestão, tais como treinamentos, calibração de equipamentos, instalação de dispositivos para redução de erros de produção, dentre outras, custos relacionados a investimentos para alteração do produto, desenvolvimento de novo produto e/ou alteração de processo com maquinários mais eficientes, e também os custos de gestão que abrangem toda a indústria, tais como o custo de implementação de Sistema de Gestão Ambiental e de Certificação do sistema, os custos de Auditoria Ambiental, dentre outros.

O **4º Estágio** envolve a identificação das categorias de impactos ambientais pelo consumo e emissão de material e pelo consumo de energia que estão relacionadas ao aspecto ambiental *n*, seguido da identificação dos compostos e tipos de energia relacionados a este aspecto ambiental para cada categoria de impacto.

O **5º Estágio** trata da ponderação dos fatores de categorias de impacto ou categorias de danos ambientais. Nesta etapa, o gestor deve definir se realizará a ponderação através do método AHP através da análise comparativa entre categorias de impacto ou dano, selecionando se realizará a ponderação entre categorias de impacto ou danos ambientais, ou se utilizará os fatores de ponderação de danos do método IMPACT 2002+. Recomenda-se utilizar o método AHP para a ponderação, caso o gestor conheça as condições do ambiente de entorno e, conseqüentemente, a divisão de importância entre as categorias.

Por fim, no **6º Estágio**, faz-se a análise dos resultados obtidos pela implementação da EPIP, podendo-se utilizar o resultado do CR% como valor para classificação dos aspectos ambientais, do mais crítico para o menos crítico, auxiliando na identificação dos itens de interesse para a tomada de decisão em busca de melhorias ambientais.

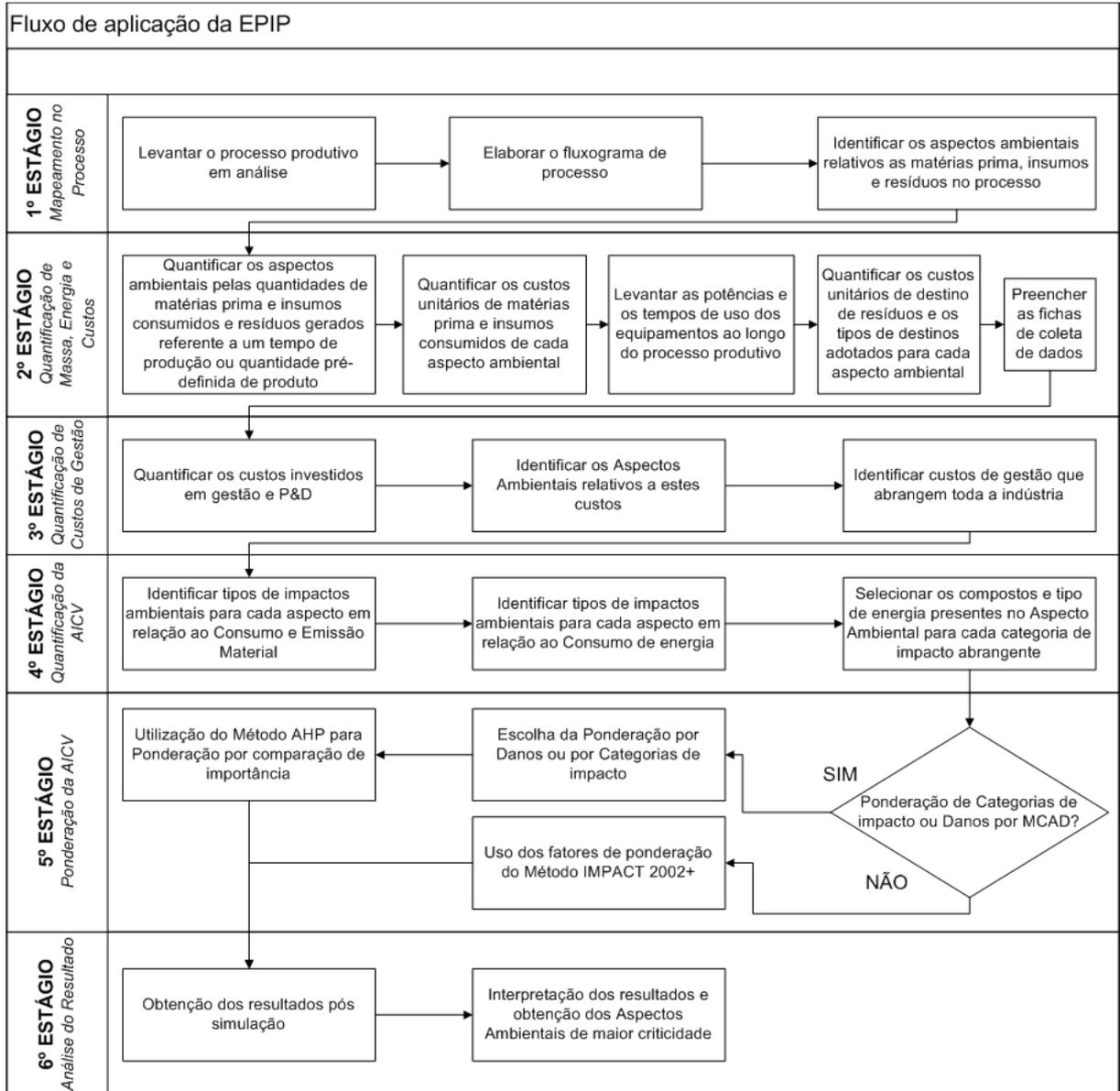


FIGURA 18 - Etapas de trabalho para uso e aplicação do modelo EPIP em uma indústria.  
Fonte: O Autor (2015)

## CAPÍTULO 6 - RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO EPIP

Nesta etapa do estudo, a aplicabilidade da ferramenta EPIP foi explorada em três diferentes processos industriais, juntamente com o uso das ferramentas MFCA, AICV, ASAIA e modelo de Cercal. O interesse da aplicação conjunta das ferramentas para as três indústrias foi, além de verificar a aplicabilidade da ferramenta EPIP, buscar entender seus resultados e seu diferencial de respostas em relação as outras ferramentas. Desta forma, este Capítulo é composto pela aplicação e análise das cinco ferramentas para uma Indústria A, fabricante de embalagens plásticas para lácteos fermentados (iogurtes), uma Indústria B, fabricante de móveis planejados em MDF para residências e escritórios e uma Indústria C, produtora de luminárias tipo Plafon.

### 6.1 ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA A – FABRICAÇÃO DE EMBALAGENS DE PLÁSTICOS PARA LÁCTEOS FERMENTADOS

A empresa em estudo é uma multinacional produtora de embalagens plásticas para alimentos, com plantas industriais presentes no Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. A unidade fabril em que foi realizado a aplicação do modelo EPIP situa-se na Região Metropolitana de Curitiba, com foco de produção em embalagens de alimentos e de produtos de higiene pessoal. Nos próximos itens são detalhados o processo produtivo do setor estudado, o levantamento de dados de entrada para o EPIP e os resultados obtidos da simulação. A coleta de dados ocorreu entre os meses de fevereiro e março de 2015 com visitas semanais, sendo que no primeiro mês ocorreu a ambientação e conhecimento do processo produtivo e, no segundo mês foi realizada a coleta de dados e o preenchimento das fichas de coleta.

#### 6.1.1 Processo Produtivo da Indústria A

O processo de fabricação estudado refere-se à produção de copos de lácteos fermentados (iogurte) de 150 mL da cor branca, tendo como matéria prima base o polipropileno (PP), termoplástico derivado do propeno de fácil moldagem quando aquecido. O fluxograma do processo estudado está descrito na FIGURA 19.

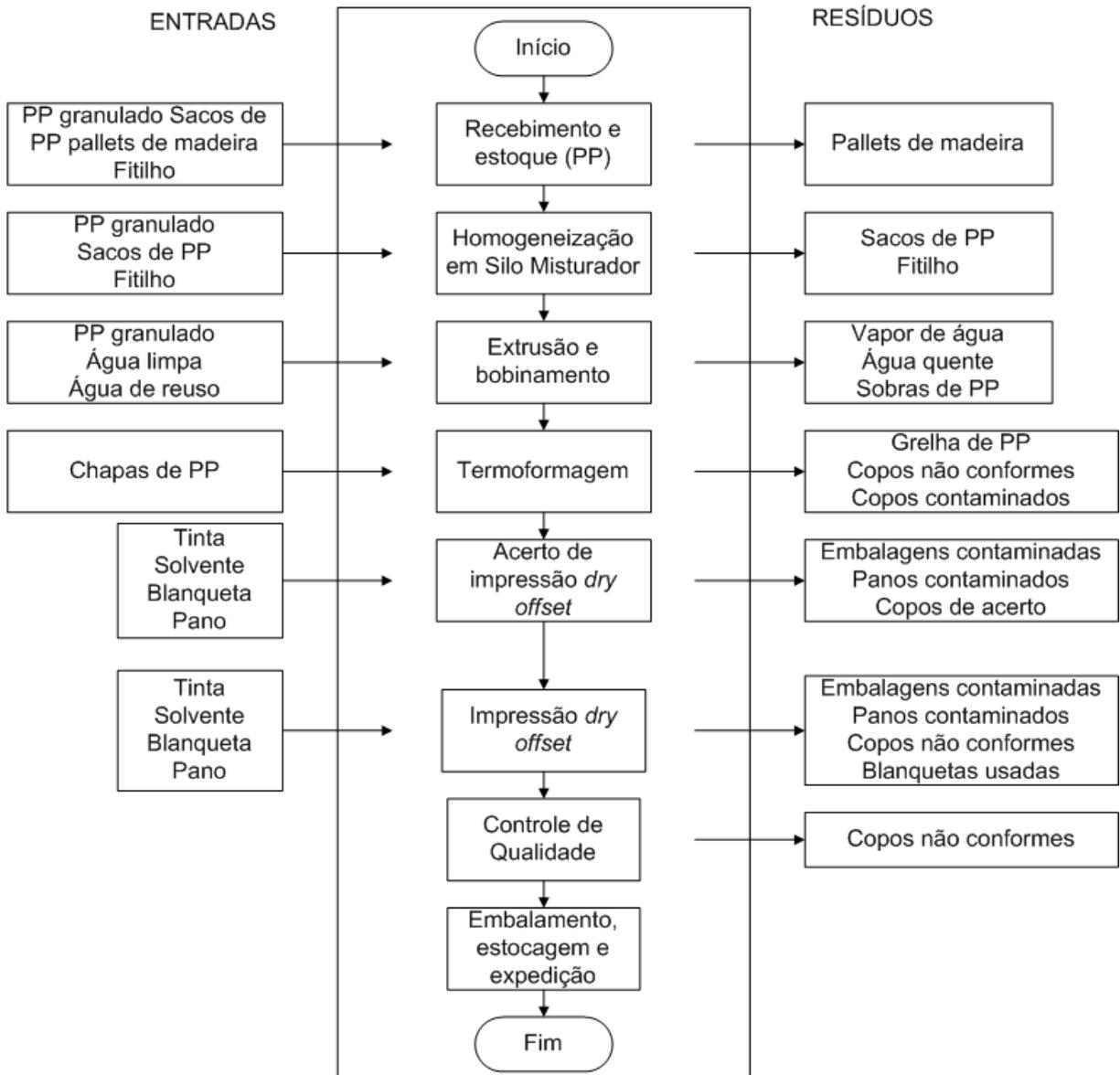


FIGURA 19 - Fluxograma do processo de produção do copo plástico pela Indústria A.  
 FONTE: O Autor (2014)

O início do processo de fabricação ocorre com o recebimento e estocagem da matéria prima a ser utilizada na produção, o Polipropileno. Quando tem-se a ordem de produção, o PP é transportado da área de estoque para o local de mistura através de empilhadeiras a gás GLP. Na mistura, utilizam-se silos misturadores para homogeneizar o PP que será processado. Logo na sequência, este polipropileno segue por esteira rolante até o processo de extrusão, sendo que a máquina extrusora, conforme FIGURA 20, derrete o polímero a uma temperatura média de 230 °C e conforma-o em chapas plásticas bobinadas, sendo utilizados banhos e pulverizadores de água para resfriamento do plástico antes do bobinamento. As

sobras de chapa são acondicionadas em *big bags* e seguem para máquina trituradora afim de produzir grânulos de PP que retornam ao início do processo produtivo.



FIGURA 20 - Máquina de extrusão de chapas plásticas.  
 FONTE: SHANDONG ROPE NET MACHINERY CO. (2015)

As bobinas são encaminhadas para a máquina termoformadora. Neste processo, a bobina é inserida no início da máquina para desenrole e segue por esteira rolante para seção de aquecimento a temperatura de 180 °C e moldagem por bloco metálico para conformação dos copos plásticos de embalagem. Os copos são resfriados por ar e o resíduo da moldagem, chamado de grelha, é também acumulado em *big bags* e segue para área de trituração (FIGURA 21).

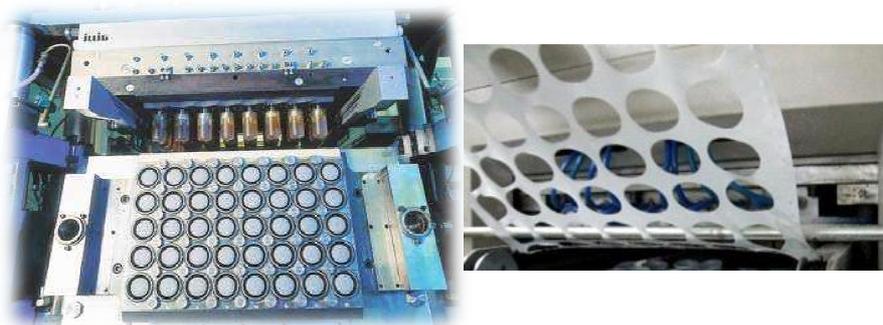


FIGURA 21 - Molde de copos plásticos e grelha resultante do processo.  
 FONTE: O Autor (2015)

A etapa final de processamento dos copos é realizada pelas máquinas impressoras através do processo *dry offset printing*. A impressão é dividida em três fases, sendo primeiramente a de acerto de impressão, depois a impressão e por fim o controle de qualidade das peças impressas. A máquina impressora é composta pela área de alimentação dos copos de embalagens (1), pelos recipientes de

abastecimento de tintas ou tinteiros (2), pelas chapas de borracha que possuem gravadas os desenhos a serem impressos nas embalagens, também conhecidas como blanquetas (3), e pelo cilindros de chapa, que dão suporte as blanquetas (4), (FIGURA 22).

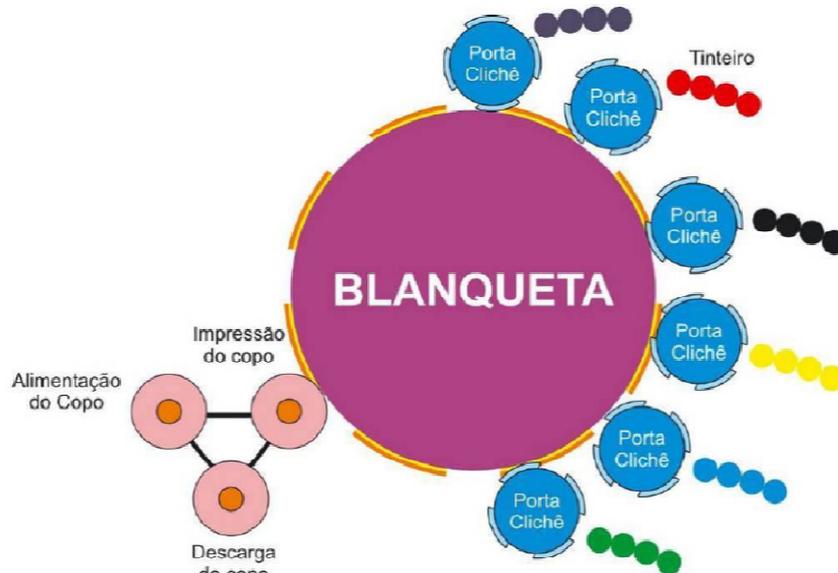


FIGURA 22 - Diagrama de impressora *dry offset*.  
Fonte: RIBEIRO (2011).

No acerto de impressão, as máquinas impressoras são abastecidas em seus tinteiros pelas tintas para impressão, as blanquetas são ajustadas nos cilindros de chapas e inicia-se o processo de impressão para ajustes da coloração, do nível de penetração da tinta na embalagem, do consumo de tinta e da qualidade final do impresso. Comumente são utilizados entre 100 e 200 copos para este ajuste, referente a impressão conforme pedido de determinado cliente. Após este acerto, é dado início a impressão dos copos de embalagens para obtenção do produto final. Durante a impressão, é realizada a inspeção periódica dos copos com relação a qualidade final pretendida, e também são realizadas *set up* (paradas) pré definidas do processo para fins de troca de blanquetas, realizadas em média a cada 100.000 copos impressos. Por fim, os copos classificados como “Conforme” no controle de qualidade são empilhados, embalados e armazenados para posterior expedição do cliente do pedido. Desta forma, a capacidade de produção de copos de iogurte pela empresa é da ordem de 54,3 milhões de copos.mês<sup>-1</sup>.

Vale ressaltar que este processo estudado corresponde a um dos seis setores de produção da empresa, sendo que os outros cinco setores possuem linha

de produção semelhante, porém com foco de produção em outros produtos, tais como potes de sorvete de 2 L e embalagens plásticas de xampu de 200 e 400 mL.

### 6.1.2 Levantamento de Dados da Indústria A

Este é composto por duas linhas de produção contendo 1 silo misturador, 1 máquina extrusora, 1 máquina de termoformagem e 1 impressora *dry offset*, em cada linha. Além disso, existe uma máquina trituradora que atende as duas linhas ao mesmo tempo. A quantidade total de funcionários do setor é 62, sendo 36 operadores de máquinas, divididos em 4 turnos de 6 horas por dia para as máquinas de extrusão, termoformagem, impressão, silo misturador e trituração, 8 operadores divididos em 4 turnos de 6 horas para operação de duas empilhadeiras, 12 auxiliares de limpeza e 3 copeiras divididas em 3 turnos de 8 horas, e 3 chefes de linha de produção trabalhando em turnos de 8 horas diárias. O número total de funcionários da empresa para o mês de março de 2015 foi de 454 funcionários. Vale ressaltar aqui que para este estudo não foram consideradas as áreas de atividades administrativas da empresa devido a falta de acesso aos dados para análise. Observa-se ainda que o efluente produzido nesta linha de produção em estudo segue para rede da concessionária de água e esgoto local (SANEPAR), devido suas características de efluente doméstico, dado que o processo industrial não tem produção de efluente com características industriais. Desta forma, foi construído o QUADRO 9 que apresenta os processos, aspectos ambientais, as entradas de matérias prima e insumos e os resíduos levantados para esta indústria, considerando como tempo de dados para simulação a produção de 1 mês, sendo março de 2015 este mês de referência.

Quadro 9

ID (n)	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Entradas	Saídas/Resíduos
A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	Pallets de madeira para descarte
A02	Silo Misturador	Consumo de PP	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	PP granulado
A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	Saco de rafia de polipropileno

Continuação do Quadro 9

A04	Silo Misturador	Geração de fitilho de amarração	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	Fitolho PP de amarração
A05	Extrusão e bobinamento de chapas	Produção de chapas de PP	PP granulado	Chapas de PP
A06	Extrusão e bobinamento de chapas	Geração de sobras de PP	PP granulado, Água	Sobra de polipropileno (PP)
A07	Extrusão e bobinamento de chapas	Consumo de água para resfriamento de peça	PP granulado, Água	Água quente
A08	Extrusão e bobinamento de chapas	Geração de vapor de água	PP granulado, Água	Vapor de água
A09	Resfriamento de água	Resfriamento e reuso de água em torre	Água quente	Água resfriada
A10	Termoformagem	Produção dos copos de PP	Chapas de PP	Copos
A11	Termoformagem	Geração de grelha de PP	Chapa de PP, Canudo metálico de bobina	Grelha de polipropileno
A12	Termoformagem	Geração de copos não conformes	Chapa de PP, Canudo metálico de bobina	Copos plásticos não conformes e não contaminados
A13	Termoformagem	Geração de copos contaminados	Chapa de PP, Canudo metálico de bobina	Copos plásticos contaminados com óleo da máquina
A14	Trituração	Produção de PP granulado	Sobras de chapa de PP, grelha de PP, copos não contaminados, bags	PP granulado
A15	Acerto de Impressão dry offset	Geração de copos de teste	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Copos de teste
A16	Acerto de Impressão dry offset	Geração de embalagens de tinta de teste	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Embalagem de tinta
A17	Acerto de Impressão dry offset	Geração de pano contaminado de limpeza de teste	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Pano com tinta e solvente
A18	Acerto de Impressão dry offset	Geração de embalagem de solvente de teste	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Embalagem de solvente
A19	Acerto de Impressão dry offset	Geração de COVs de teste	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	COVs de acerto
A20	Impressão dry offset	Produção de copos impressos	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Copos pintados
A21	Impressão dry offset	Geração de embalagens de tinta de impressão	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Embalagens de tinta
A22	Impressão dry offset	Geração de pano contaminado de impressão	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Pano com tinta e solvente

Continuação do Quadro 9

A23	Impressão dry offset	Geração de copos não conformes de impressão	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Copos plásticos não conformes
A24	Impressão dry offset	Geração de blanqueta	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Blanqueta usada
A25	Impressão dry offset	Geração de embalagens de solvente de impressão	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	Embalagem de solvente
A26	Impressão dry offset	Geração de COVs de impressão	Blanqueta, tinta, Pano, Solvente, Copos	COVs de impressão
A27	Serviços gerais	Limpeza com vassoura	Vassouras	Resíduo de varrição
A28	Serviços gerais	Consumo de panos de limpeza	Rodos, Panos, Água, Produtos de limpeza	Panos contaminados
A29	Serviços gerais	Geração de embalagens de produtos de limpeza	Rodos, Panos, Produtos de limpeza, Água	Embalagem de produto de limpeza
A30	Serviços gerais	Geração efluente de limpeza	Rodos, Panos, água, Produtos de limpeza	Efluente de limpeza
A31	Geral	Geração de efluente sanitário	Água, Papel higiênico, Papel toalha, sabonete líquido	Efluente sanitário
A32	Geral	Geração de resíduos sanitários	Água, Papel higiênico, Papel toalha, sabonete líquido	Resíduo de sanitário
A33	Geral	Consumo de água e café para beber	Copos, Água, Café	Copos plásticos usados
A34	Geral	Geração de lâmpadas de troca	Lâmpadas novas	Lâmpadas queimadas
A35	Geral	Uso de pilhas e baterias	Pilhas e baterias	Pilhas e baterias
A36	Geral	Uso de EPIs	EPIs novos	EPI usados
A37	Copa	Geração de resíduos orgânicos da copa	Café, alimentos diversos	Resíduo orgânico
A38	Copa	Geração de embalagens de alimentos da copa	Café, alimentos diversos	Plástico de embalagens
A39	Manutenção de máquinas	Consumo de óleo lubrificante de máquina	Óleo lubrificante	óleo de troca
A40	Transporte interno	Consumo de GLP	Botijão de GLP de 20 kg	GLP gasto
A41	Transporte interno	Geração de embalagem de GLP	Botijão de GLP de 20 kg	Botijão de gás

QUADRO 9 - Levantamento de processos, Aspectos Ambientais, entradas e saídas / resíduos da Indústria A.

Fonte: O Autor (2015)

Os dados de entrada levantados da Indústria A para utilização no cálculo dos Custos de Perda Material através da Equação (33) da ferramenta EPIP seguem TABELA 10.

TABELA 10 - Dados de entrada do modelo EPIP para realização do cálculo dos custos de perda material (CPM) para a Indústria A.

ID(n)	Un	Quantidade MP/insumos	Quantidade de Saída/Resíduos	Materiais nas Saídas/Resíduos	Quantidade Material	Custo Material (R\$/Un)
A01	kg	103320	400	Madeira	400,0	1,32
A02	kg	103320	103320	PP	103320,0	0,00
A03	kg	103320	241,5	Sacos	241,5	0,30
A04	kg	103320	14,65	Fitolho	14,7	0,30
A05	kg	925320	91440	PP	91440,0	0,00
A06	kg	925320	11880	PP	11880,0	5,93
A07	kg	925320	411000	Água	411000,0	0,01
A08	kg	925320	411000	Água	411000,0	0,01
A09	kg	411000	411000	Água	411000,0	0,01
A10	kg	91440	60332,9	PP	60332,9	0,00
A11	kg	91440	31016,4	PP	31016,4	5,93
A12	kg	91440	60,4	PP	60,4	5,93
A13	kg	91440	31,8	PP Óleo	30,3 1,5	5,93 10,00
A14	kg	42956,8	42956,8	PP	42956,8	0,00
A15	kg	139,17	136,7	PP Tinta	121,0 15,7	5,93 11,80
A16	kg	139,17	0,2	Embalagem	0,2	0,00
A17	kg	139,17	1,42	Pano Tinta Solvente	0,8 0,4 0,22	2,30 11,80 9,10
A18	kg	139,17	2,5	Embalagem	2,5	0,00
A19	kg	139,17	1,05	COV (kg)	1,05	11,80
A20	kg	68454,8	67681,8	PP Tinta	60107,7 7574,1	0,00 0,00
A21	kg	68454,8	101	Embalagem	101,0	0,00
A22	kg	68454,8	75	Pano Tinta Solvente	50,0 20,0 5,0	2,30 11,80 9,10
A23	kg	68454,8	254,4	PP Tinta	225,2 29,2	5,93 11,80
A24	kg	68454,8	3,1	Blanqueta	3,1	32,50
A25	kg	68454,8	0,4	Embalagem	0,4	0,00
A26	kg	68454,8	247,75	COV	247,75	11,80
A27	kg	6605,4	62,5	Varrição	62,5	0,00
A28	kg	6605,4	5,4	Panos	5,4	2,30
A29	kg	6605,4	10,68	Embalagem	10,7	0,00
A30	kg	6605,4	6600	Água Produto limpeza	6000,0 600,0	0,00542 0,9
A31	kg	147252	147000	Água	147000	0,00542
A32	kg	147252	252	Papel sujo	252,0	9,46
A33	kg	23,1	23,1	Copos sujos	23,1	11,36
A34	kg	10	10	Lâmpada	10,0	24,89
A35	kg	3,5	3,5	Pilha Bateria	0,8 2,8	8,67 145,50
A36	kg	26,1	26,1	EPI	26,1	8,90
A37	kg	270	210	Resíduo Orgânico	210,0	0,00
A38	kg	270	60	Plástico	60,0	0,30
A39	kg	8	8	Óleo	8,0	14,60
A40	kg	478,75	204	GLP	204,0	2,92
A41	kg	478,75	274,75	Botijão	274,8	0,00

Fonte: O Autor (2015)

Já os dados de entrada levantados desta indústria para realização dos cálculos de Custos de Energia Consumida e de Destino Material através das Equações (34) e (35), respectivamente, são apresentados na TABELA 11.

TABELA 11 - Dados de entrada do modelo EPIP para realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) para a Indústria A. (NA = Não aplicado por não ser resíduo, por ser material lançado sem tratamento e sem exigência para tratamento ou por ser devolvido pelo fornecedor como embalagem vazia).

ID (n)	CEC			Un	CDM		
	EG (kW.h)	CE (R\$/kW.h)	PE (%)		Quantidade de Resíduo	Tipo de destino (d)	Custo de Destino (R\$/Un)
A01	0,0	0,6621	1,00	kg	400,0	4	-0,375
A02	250,0	0,6621	1,00	kg	103320,0	NA	0,000
A03	0,0	0,6621	0,00	kg	241,5	5	-0,300
A04	0,0	0,6621	0,00	kg	14,7	5	-0,300
A05	61650,0	0,6621	0,10	kg	91440,0	NA	0,000
A06	61650,0	0,6621	0,01	kg	11880,0	1	-5,930
A07	61650,0	0,6621	0,44	kg	411000,0	1	-0,005
A08	61650,0	0,6621	0,44	kg	411000,0	NA	0,000
A09	377,9	0,6621	1,00	kg	411000,0	1	-0,005
A10	374850,0	0,6621	0,65	kg	60332,9	NA	0,000
A11	374850,0	0,6621	0,34	kg	31016,4	1	-5,930
A12	374850,0	0,6621	0,01	kg	60,4	1	-5,930
A13	374850,0	0,6621	0,00	kg	31,8	9	1,780
A14	1335,0	0,6621	1,00	kg	42956,8	NA	0,000
A15	20,0	0,6621	0,92	kg	136,7	9	0,610
A16	0,0	0,6621	0,00	kg	0,2	9	1,780
A17	0,0	0,6621	0,05	kg	1,4	9	1,780
A18	0,0	0,6621	0,02	kg	2,5	9	1,780
A19	20,0	0,6621	0,03	kg	1,1	NA	0,000
A20	4662,3	0,6621	1,00	kg	67681,8	NA	0,000
A21	0,0	0,6621	0,00	kg	101,0	9	1,780
A22	0,0	0,6621	0,00	kg	75,0	9	1,780
A23	4662,3	0,6621	0,00	kg	254,4	9	0,610
A24	0,0	0,6621	0,00	kg	3,1	9	1,780
A25	0,0	0,6621	0,00	kg	0,4	9	0,610
A26	4662,3	0,6621	0,00	kg	247,75	NA	0,000
A27	0,0	0,6621	0,01	kg	62,5	9	0,610
A28	0,0	0,6621	0,00	kg	5,4	9	1,780
A29	0,0	0,6621	0,00	kg	10,7	9	1,780
A30	0,0	0,6621	1,00	kg	6600,0	8	0,004
A31	0,0	0,6621	1,00	kg	147000,0	8	0,004
A32	0,0	0,6621	0,00	kg	252,0	8	3,080
A33	0,0	0,6621	1,00	kg	23,1	9	0,610
A34	0,0	0,6621	1,00	kg	10,0	8	12,240
A35	0,0	0,6621	1,00	kg	3,5	8	3,850
A36	0,0	0,6621	1,00	kg	26,1	9	1,780
A37	0,0	0,6621	0,78	kg	210,0	9	0,610
A38	0,0	0,6621	0,22	kg	60,0	5	-0,300
A39	0,0	0,6621	1,00	kg	8,0	5	-0,280
A40	0,0	0,6621	0,43	kg	204,0	NA	0,000
A41	0,0	0,6621	0,57	kg	274,8	NA	0,000

Fonte: O Autor (2015)

Em relação aos valores dos Custos de Gestão Localizada (CGL), foi verificado nesta indústria que houve um investimento na ordem de R\$ 10.000,00 no último ano para adaptação da máquina de termoformagem para resfriamento a ar, eliminando o uso de água pela máquina. Desta forma, este valor foi utilizado para o cálculo do CGL em relação as quatro aspectos ambientais que compõe o processo de termoformagem. Já em relação aos custos de pesquisa e desenvolvimento (CPD), não foram identificados investimentos da empresa no último ano.

Após o cálculo de todos os custos de cada aspecto ambiental através da ferramenta EPIP, foi realizada a análise dos impactos ambientais de cada um destes aspectos em relação as 17 categorias de impacto da ferramenta. Os resultados obtidos da classificação dos aspectos ambientais em cada categoria de impacto seguem QUADRO 10.

Quadro 10

ID (n)	RG*	UA*	ENR*	AG*	TH*	ROR*
A01	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A02	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A03	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A04	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A05	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A06	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A07	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A08	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A09	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A10	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A11	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A12	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A13	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A14	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A15	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A16	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A17	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A18	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A19	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	COV	COV
A20	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A21	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A22	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A23	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A24	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA

Continuação do Quadro 10

A25	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A26	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	COV	COV
A27	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A28	Resíduo Perigoso	Água usada	NA	NA	NA	NA
A29	Resíduo Perigoso	Água usada	NA	NA	NA	NA
A30	NA	Água usada	NA	NA	NA	NA
A31	NA	Água usada	NA	NA	NA	NA
A32	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A33	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A34	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A35	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A36	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A37	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A38	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A39	Resíduo Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA
A40	NA	NA	Energia Não renovável	Dióxido de Carbono	NA	NA
A41	Resíduo Não Perigoso	NA	NA	NA	NA	NA

QUADRO 10 - Dados de entrada da Indústria A selecionadas para categoria de impacto da AICV em relação a cada aspecto ambiental *n.* \* RG (Resíduo Gerado); UA (Uso de Água); ENR (Energia Não Renovável); AG (Aquecimento Global); TH (Toxicidade Humana); ROr (Respiração de compostos orgânicos). NA = Não Aplicável.

Fonte: O Autor (2015)

Além dos dados levantados para aplicação da EPIP, foi realizado a alocação dos dados necessários para a aplicação das outras 4 ferramentas selecionadas para comparação de resultados, sendo elas a MFCA, a AICV, a ASAIA e o Modelo de Cercal. Os dados da MFCA foram organizados na forma de centros de quantidade, conforme definido para aplicação deste método, conforme TABELA 12. Para o cálculo dos resultados da MFCA, além dos dados já existentes coletados para a aplicação da EPIP, também foram levantados os dados de custo da hora da mão-de-obra por atividade e o tempo total de atividade para cada mão-de-obra.

Para o cálculo dos resultados da AICV, foi definido como método representativo a própria integração de métodos AICV proposta na EPIP. Isto porque, tornaria inviável a aplicação de diferentes métodos para comparação de respostas.

Já para o cálculo dos resultados da ASAIA, foram analisados cada aspecto ambiental em relação as categorias de Severidade, Ocorrência, Detecção e

Abrangência, conforme descrição prévia da ferramenta no Capítulo 2. Estas classificações de níveis de categoria para cada aspecto ambiental são apresentadas no QUADRO 11.

TABELA 12 - Dados de entrada da MFCA para a indústria A.

CQ	Material	Entrada (kg)	Saída/ Produto (kg)	Saída/ Resíduo (kg)	Custo (R\$/kg)	Custo de destino (R\$/kg)	Energia (kW.h)	Mão-de-obra	
CQ 1	PP	103320	103320	0	5,93	0	250	Nº	8
	Madeira	400	0	400	1,32	-0,375		Tempo (h)	40
	Sacos	241,5	0	241,5	0,3	-0,3		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	8,52
	Fítilho	14,65	0	14,65	0,3	-0,3			
CQ 2	PP	103320	91440	11880	5,93	0	61650	Nº	8
	Água	822000	0	411000	0,00542	-0,00542		Tempo (h)	140
	Vapor	0	0	411000	0,00542	0		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	8,52
CQ 3	Água	411000	411000	0	0,00542	0	377,85	Nº	0
CQ 4	PP	91440	60331,4		5,93	0	74970	Nº	8
	Grelha	0	0	31016,4	5,93	0		Tempo (h)	180
	PP não conforme	0	0	60,4	5,93	0		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	8,52
	PP com óleo	0	0	31,8	5,93	1,78			
CQ 5	PP	121	121	0	5,93	0	20	Nº	8
	Tinta	21,75	15,7	0,4	11,80	1,78		Tempo (h)	4
	Pano	0,8	0	5	2,30	1,78		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	8,52
	Solvente	0,22	0	1	9,10	1,78			
CQ 6	PP	60211,9	59986,7	0	5,93	0	932,46	Nº	8
	Tinta	7871,05	7574,1	10	11,80	1,78		Tempo (h)	176
	Pano	50	0	50	2,30	1,78		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	8,52
	Solvente	5	0	5	9,10	1,78			
	Blanqueta	3,1	0	3,1	32,50	1,78			
	COV	0	0	247,75	11,80	0			
CQ 7	PP	42956,8	42956,8	0	5,93	0	1335	Nº	4
								Tempo (h)	180
								Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	8,52

Fonte: O Autor (2015)

Por fim, os dados necessários para os cálculos da Análise de Resíduo por Valor (ARV), da Análise de Resíduo por Risco (ARR), da Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM) e da Análise Global de Resíduo (AGR) são apresentados na TABELA 13. Vale ressaltar que nesta Tabela estão apenas os dados ainda não apresentados e necessários para os cálculos das variáveis ARV, ARR, ARFM e ARG. Os dados complementares que possibilitam estes cálculos já foram apresentados na TABELA 10 e TABELA 11.

ID (n)	Severidade	Ocorrência	Deteção	Abrangência
A01	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A02	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A03	Desprezível	Frequente	Média	Local
A04	Média	Global	Desprezível	Frequente
A05	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A06	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A07	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A08	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A09	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A10	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A11	Irreversível	Frequente	Difícil	Global
A12	Fácil	Local	Reversível	Frequente
A13	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A14	Fácil	Local	Reversível	Periódica
A15	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A16	Difícil	Global	Desprezível	Frequente
A17	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A18	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A19	Reversível	Frequente	Média	Global
A20	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A21	Irreversível	Frequente	Fácil	Global
A22	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A23	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A24	Fácil	Global	Irreversível	Frequente
A25	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A26	Média	Global	Desprezível	Frequente
A27	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A28	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A29	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A30	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A31	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A32	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A33	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A34	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A35	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A36	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A37	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A38	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A39	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A40	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A41	Desprezível	Frequente	Fácil	Local

QUADRO 11 - Dados de entrada para o cálculo de risco através da ASAIA para a Indústria A.  
Fonte: O Autor (2015)

TABELA 13 - Dados de entrada para o cálculo do ARV (Análise de Resíduo por Valor), ARR (Análise de Resíduo por Risco), ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização) e AGR (Análise Global de Resíduo) através do modelo de Cercal para a Indústria A.

ID (n)	Análise de Resíduo por Valor	Análise de Resíduo por Risco		Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização	
	Índice de Priorização Hierárquica de Minimização de Resíduos ( $\xi_b$ )	Risco a Saúde Humana	Classe do Resíduo (Periculosidade)	Facilidade de Minimização ( $F_i$ )	Custo da Minimização ( $CM_i$ )
A01	0,82	Isento	N Perigoso N Inerte	Tecnologia disponível?	Baixo

Continuação da Tabela 13.

A02	0,2	Isento	N Perigoso Inerte	Tecnologia disponível?	Baixo
A03	0,2	Isento	N Perigoso Inerte	Tecnologia disponível?	Baixo
A04	0,97	Isento	N Perigoso Inerte	Tecnologia disponível?	Baixo
A05	1	Isento	N Perigoso Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A06	0,2	Isento	N Perigoso Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A07	0,97	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A08	0,97	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A09	-0,6	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Muito alto
A10	-0,6	Potencial	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Muito alto
A11	1	Isento	N Perigoso Inerte	Modificar equipamento?	Alto
A12	-0,6	Isento	N Perigoso Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A13	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Muito alto
A14	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Muito alto
A15	-0,6	Potencial	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A16	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A17	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A18	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A19	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A20	-0,6	Isento	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Muito alto
A21	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A22	-0,6	Isento	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A23	-0,6	Potencial	N Perigoso Inerte	Tecnologia disponível?	Muito alto
A24	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A25	-0,6	Isento	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A26	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A27	-0,6	Potencial	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A28	-0,6	Isento	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A29	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A30	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo

Continuação da Tabela 13.

A31	0,2	Isento	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A32	-0,6	Potencial	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A33	-0,6	Potencial	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A34	-0,6	Isento	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A35	0,2	Isento	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A36	0,2	Isento	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A37	0,2	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A38	0,2	Isento	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A39	0,2	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A40	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A41	0,2	Isento	N Perigoso Inerte	Tecnologia disponível?	Baixo

Fonte: O Autor (2015)

### 6.1.3 Exemplo de Cálculo das variáveis da EPIP para a Indústria A

Com todos os dados de entrada levantados, foi possível realizar os cálculos, conforme equações da TABELA 9, e obter a medição do desempenho ambiental da Indústria A em relação a cada aspecto ambiental  $n$ . Como forma de exemplificação dos cálculos foi utilizado o aspecto ambiental A01.

O A01 refere-se a Geração de pallet de madeira e está alocado no processo de Silo Misturador, tendo como materiais de entrada o pallet de madeira, o PP granulado, o saco de rafia e o fitilho de amarração, sendo estes materiais identificados com  $m = 1$ ,  $m = 2$ ,  $m = 3$  e  $m = 4$ , respectivamente. O materiais de saída possíveis seriam o pallet de madeira, o saco de rafia e o fitilho de amarração. Apesar disso, é considerado como saída neste aspecto apenas o pallet de madeira, pois o A01 refere-se a Geração do pallet, com gestão do resíduo diferenciado em relação aos outros materiais deste processo. Desta forma, segue o passo-a-passo do cálculo das variáveis do EPIP para o A01.

#### 1º Passo - Cálculo do $CPM(n)$

$$CPM(1) = MP_{1,4}(1) \cdot CM_{4,1}(1) =$$

$$\begin{aligned}
&= CPM(1) = MP_{11}(1) \cdot CM_{11}(1) + MP_{12}(1) \cdot CM_{21}(1) + MP_{13}(1) \cdot CM_{31}(1) + MP_{14}(1) \cdot CM_{41}(1) \\
&= CPM(1) = 400 \cdot 1,32 + 0 \cdot 5,93 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,3 = \\
&= CPM(1) = 400 \cdot 1,32 = 528
\end{aligned}$$

$$CPM(1) = R\$528,00$$

### 2º Passo - Cálculo do $CEC(n)$

$$\begin{aligned}
CEC(1) &= EG(1) \cdot PE(1) \cdot CE(1) = \\
&= CEC(1) = 0 \cdot 0 \cdot 0,6621 = 0
\end{aligned}$$

$$CEC(1) = R\$0,00$$

### 3º Passo - Cálculo do $CDM(n)$

$$CDM(1) = M_{OUT}(1) \cdot D_{1,10}^{\%}(1) \cdot CD_{10,1}(1) =$$

$$= CDM(1) = 400 \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,375 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= CDM(1) = 400 \cdot 1 \cdot -0,375 = R\$ -150,00$$

$$CDM(1) = R\$ -150,00$$

### 4º Passo - Cálculo do $CGL(n)$

$$CGL(n) = CTGL_{GAA} \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{\sum_{n=1}^N M_{OUT}(n)} =$$

$$= CGL(1) = 0 \cdot \frac{M_{OUT}(1)}{\sum_{n=1}^1 M_{OUT}(n)} = 0 \cdot \frac{400}{400} =$$

$$\boxed{CGL(1) = R\$0,00}$$

### 5º Passo - Cálculo do $CPD(n)$

$$CPD(n) = CPD_{GAA} \cdot \frac{M_{OUT}(n)}{\sum_{n=1}^P M_{OUT}(n)} =$$

$$= CPD(1) = 0 \cdot \frac{M_{OUT}(1)}{\sum_{n=1}^1 M_{OUT}(n)} = 0 \cdot \frac{400}{400} =$$

$$\boxed{CPD(1) = R\$0,00}$$

### 6º Passo - Cálculo do $ICEM(n)$

$$ICEM(1) = M_{OUT}(1) \cdot \left[ \frac{PD_{SH} \cdot DSH(1) + PD_{QE} \cdot (DQE(1) + DRG(1)) + PD_{Rec} \cdot DRec(1) + PD_{AqG} \cdot DAqG(1)}{PD_{SH} \cdot DSH(1) + PD_{QE} \cdot (DQE(1) + DRG(1)) + PD_{Rec} \cdot DRec(1) + PD_{AqG} \cdot DAqG(1)} \right]$$

Para se realizar este cálculo, primeiro é necessário o cálculo de cada categoria de dano da AICV para o consumo e emissão de materiais. Desta forma, segue o cálculo para as categorias de Danos a Saúde Humana (DSH), Danos a Qualidade do Ecossistema (DQE), Danos por Resíduos Gerados (DRG) e Danos por Aquecimento Global (DAqG). Para os cálculos de todas as categorias de danos foi considerado o fator de ponderação de cada categoria de impacto como sendo “1”, pois a ponderação utilizada para os estudos de caso foram realizadas através dos fatores de ponderação de categorias de danos.

#### Para Danos a Saúde Humana (DSH)

$$DSH(1) = \left[ P_{TH} \cdot \frac{TH(1)}{N_{TH}} + P_{Rln} \cdot \frac{Rln(1)}{N_{Rln}} + P_{ROrg} \cdot \frac{ROrg(1)}{N_{ROrg}} + P_{DO} \cdot \frac{DO(1)}{N_{DO}} + P_{RI} \cdot \frac{RI(1)}{N_{RI}} \right] =$$

$$= DSH(1) = \left[ 1 \cdot \frac{TH(1)}{219} + 1 \cdot \frac{RIn(1)}{8,8} + 1 \cdot \frac{ROrg(1)}{12,4} + 1 \cdot \frac{DO(1)}{0,204} + 1 \cdot \frac{RI(1)}{0,0000533} \right] =$$

$$= DSH(1) = \left[ 1 \cdot \frac{0}{219} + 1 \cdot \frac{0}{8,8} + 1 \cdot \frac{0}{12,4} + 1 \cdot \frac{0}{0,204} + 1 \cdot \frac{0}{0,0000533} + 1 \cdot \frac{0}{14,1} \right] = 0$$

$$\boxed{= DSH(1) = 0}$$

### Para Danos a Qualidade do Ecossistema (DQE)

$$DQE(1) = \left[ \begin{array}{l} P_{Ec} \cdot \frac{Ec(1)}{N_{Ec}} + P_{Ac} \cdot \frac{Ac(1)}{N_{Ac}} + P_{Eut} \cdot \frac{Eut(1)}{N_{Eut}} + P_{SO} \cdot \frac{SO(1)}{N_{SO}} + \\ P_{ST} \cdot \frac{ST(1)}{N_{ST}} + P_{UA} \cdot \frac{UA(1)}{N_{UA}} \end{array} \right] =$$

$$= DQE(1) = \left[ 1 \cdot \frac{Ec(1)}{1,28} + 1 \cdot \frac{Ac(1)}{188,6} + 1 \cdot \frac{Eut(1)}{14,3} + 1 \cdot \frac{SO(1)}{3430} + 1 \cdot \frac{ST(1)}{12} + 1 \cdot \frac{UA(1)}{1} \right] =$$

$$= DQE(1) = \left[ 1 \cdot \frac{0}{1,28} + 1 \cdot \frac{0}{188,6} + 1 \cdot \frac{0}{14,3} + 1 \cdot \frac{0}{3430} + 1 \cdot \frac{0}{12} + 1 \cdot \frac{0}{1} \right] = 0$$

$$\boxed{= DQE(1) = 0}$$

### Para Danos por Resíduos Gerados (DRG)

$$DRG(1) = \left[ P_{RP} \cdot \frac{RP(1)}{N_{RP}} + P_{RNP} \cdot \frac{RNP(1)}{N_{RNP}} + P_{EC} \cdot \frac{EC(1)}{N_{EC}} + P_{RR} \cdot \frac{RR(1)}{N_{RR}} \right] =$$

$$= DRG(1) = \left[ 1 \cdot \frac{RP(1)}{20,70} + 1 \cdot \frac{RNP(1)}{1349,5} + 1 \cdot \frac{EC(1)}{349,6} + 1 \cdot \frac{RR(1)}{0,16} \right] =$$

$$= DRG(1) = \left[ 1 \cdot \frac{0}{20,70} + 1 \cdot \frac{1}{1349,5} + 1 \cdot \frac{0}{349,6} + 1 \cdot \frac{0}{0,16} \right] = 0,000741$$

$$\boxed{DRG(1) = 0,000741}$$

### Para Danos por Recursos Naturais (DRec)

$$DRec(1) = \left[ P_{RM} \cdot \frac{RM(1)}{N_{RM}} + P_{RCNR} \cdot \frac{RCNR(1)}{N_{RCNR}} \right] =$$

$$= DRec(1) = \left[ 1 \cdot \frac{RM(1)}{5730} + 1 \cdot \frac{RCNR(1)}{3320} \right] =$$

$$= DRec(1) = \left[ 1 \cdot \frac{0}{5730} + 1 \cdot \frac{0}{3320} \right] = 0$$

$$\boxed{DRec(1) = 0,0}$$

### Para Danos por Aquecimento Global (DAqG)

$$DAqG(1) = PD_{AqG} \cdot \frac{AqG(1)}{N_{AqG}} = 1 \cdot \frac{AqG(1)}{1160} =$$

$$= DAqG(1) = 4,4 \cdot \frac{0}{1160} = 0$$

$$\boxed{DAqG(1) = 0,0}$$

Desta forma, através dos resultados obtidos para cada categoria de dano para o A01, segue o cálculo do  $ICEM(1)$ .

$$ICEM(1) = M_{OUT}(1) \cdot \left[ \frac{PD_{SH} \cdot DSH(1) + PD_{QE} \cdot (DQE(1) + DRG(1)) +}{PD_{Rec} \cdot DRec(1) + PD_{AqG} \cdot DAqG(1)} \right] =$$

$$= ICEM(1) = 400 \cdot [54,7 \cdot 0 + 9,0 \cdot (0 + 0,000741) + 29,2 \cdot 0 + 4,4 \cdot 0] = 2,6745$$

$$\boxed{ICEM(1) = 2,6745}$$

### **7º Passo - Cálculo do $IEC(n)$**

$$IEC(1) = EC(1) \cdot PE(1) \cdot PD_{Rec} \cdot \left[ \frac{P_{ER} \cdot ER(1) + P_{ENR} \cdot ENR(1)}{N_E} \right] =$$

$$IEC(1) = 0 \cdot 1 \cdot 29,2 \cdot \left[ \frac{1 \cdot 0 + 1 \cdot 0}{151000} \right] = 0$$

$$\boxed{IEC(1) = 0}$$

### 8º Passo - Cálculo do $C_{AA}(n)$

$$C_{AA}(1) = \begin{bmatrix} CPM(1) + CEC(1) + CDM(1) \\ -CGL(1) - CPD(1) \end{bmatrix} \cdot [ICEM(1) + IEC(1)] =$$

$$C_{AA}(1) = [528 + 0 + (-150) - CGL(n) - CPD(n)] \cdot [2,6676 + 0] = 1008,3528$$

$$C_{AA}(1) = R\$_{Eq} 1010,95$$

#### 6.1.4 Exemplo de Cálculo das variáveis da ferramenta MFCA para a Indústria A

Para o cálculo das variáveis da MFCA foram utilizadas as Equações (1) a (8), conforme Capítulo 2 desta Tese. Diferentemente da distribuição de dados definido para as ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal, a MFCA utiliza uma distribuição de dados de análise baseada nos centros de quantidade. Conforme TABELA 12, referente aos dados de entrada para o cálculo da MFCA, foram criados 7 centros de quantidade para a Indústria A, sendo estes o CQ 1 para o Silo misturador, o CQ 2 para a Extrusão do PP granulado, o CQ 3 para o Resfriamento da água da extrusão, o CQ 4 para a Termoformagem das chapas de PP, o CQ 5 para o Acerto de impressão *dry offset*, o CQ 6 para a Impressão *dry offset* dos copos de PP e o CQ 7 para Trituração das sobras de PP dos processos de extrusão e termoformagem. Desta forma, através dos dados de entrada da MFCA para o CQ 1 e, considerando as equações que compõe esta ferramenta, segue o passo-a-passo do cálculo das variáveis desta ferramenta para o CQ 1.

### 1º Passo - Cálculo do $VP_i$

Para o cálculo do CQ 1, deve-se primeiramente verificar a quantidade total de materiais presentes na entrada e saída deste centro de quantidade. Conforme levantamento na TABELA 12 o número de materiais  $j$  é igual à 4, sendo eles o PP granulado, o Pallet de madeira, o Saco de rafia e o Fitolho de amarração. Para este CQ 1, a massa total de entrada foi de 103.976,2 kg, a massa total de saída na forma de produto foi de 103.320 kg e a massa total de saída na forma de resíduos foi de 656,15 kg. Já a energia utilizada para o funcionamento do silo misturador no período de 1 mês de trabalho (tempo estabelecido para a análise da Indústria A) foi de 250 kW.h. Por fim, o número de trabalhadores atuantes nas atividades que envolvem o

Silo misturador foram 8 funcionários, com tempo de trabalho de 40 h.mês<sup>-1</sup> para cada um deles, e valor pago pela empresa para a hora-homem de R\$ 8,52 h<sup>-1</sup>. Desta forma, segue o cálculo do  $VP_1$ .

$$\begin{aligned}
 VP_i &= \sum_j P_{ij} \cdot QP_{ij} + ap_i \cdot (pe \cdot E_i + S_i) \\
 &= VP_1 = P_{11} \cdot QP_{11} + P_{12} \cdot QP_{12} + P_{13} \cdot QP_{13} + P_{14} \cdot QP_{14} + ap_1 \cdot (pe \cdot E_1 + S_1) = \\
 &= 5,93 \cdot 103320 + 1,32 \cdot 400 + 0,3 \cdot 241,5 + 0,3 \cdot 14,65 + \frac{103320}{103976,2} \cdot (0,6621 \cdot 250 + 8 \cdot 40 \cdot 8,52) = \\
 &= VP_1 = 612.687,6 + 0,99 \cdot (165,52 + 2726,4) = 615.576,7
 \end{aligned}$$

$$VP_1 = R\$615.576,8$$

### 2º Passo - Cálculo do $VR_i$

Dado que o número de resíduos levantados para o CQ 1 foi  $k = 3$ , sendo o Pallet de madeira, o Saco de rafia e o Fitolho de amarração, segue o cálculo do  $VR_1$ .

$$\begin{aligned}
 VR_i &= \sum_k P_{ik} \cdot QR_{ik} + GR_i + ar_i \cdot (pe \cdot E_i + S_i) \\
 &= VR_1 = P_{11} \cdot QP_{11} + P_{12} \cdot QP_{12} + P_{13} \cdot QP_{13} + GR_1 + ar_1 \cdot (pe \cdot E_1 + S_1) = \\
 &= 1,32 \cdot 400 + 0,3 \cdot 241,5 + 0,3 \cdot 14,65 + (-226,85) + \frac{656,15}{103976,2} \cdot (165,52 + 2726,4) = \\
 &= VR_1 = 528 + 72,45 + 4,395 + (-226,85) + 0,01 \cdot (165,52 + 2726,4) = 380,85
 \end{aligned}$$

$$VR_1 = R\$380,85$$

### 3º Passo - Cálculo do $VP_i^{\%}$

$$\begin{aligned}
 VP_i^{\%} &= \frac{VP_i}{VP_i + VR_i} = VP_1^{\%} = \frac{VP_1}{VP_1 + VR_1} = \\
 &= VP_1^{\%} = \frac{615576,7}{615576,7 + 380,85} \cdot 100 = 99,93
 \end{aligned}$$

$$VP_1^{\%} = 99,93\%$$

#### 4º Passo - Cálculo do $VR_i^{\%}$

$$VR_i^{\%} = \frac{VR_i}{VP_i + VR_i} = VR_1^{\%} = \frac{VR_1}{VP_1 + VR_1} =$$

$$= VR_1^{\%} = \frac{380,85}{615576,7 + 380,85} \cdot 100 = 0,07$$

$$\boxed{VR_1^{\%} = 0,07\%}$$

#### 6.1.5 Exemplo de Cálculo das variáveis da ferramenta ASAIA para a Indústria A

Para o cálculo da significância de cada aspecto ambiental foi utilizado o produto da Severidade, Ocorrência, Detecção e Abrangência, conforme Capítulo 2 desta Tese. A distribuição dos dados de análise para a ASAIA mantém a distribuição por aspecto ambiental já definida na aplicação da EPIP. Desta forma, através da análise e classificação de cada aspecto ambiental em relação ao seu nível de Severidade, Ocorrência, Detecção e Abrangência, foi possível realizar o cálculo da significância destes aspectos ambientais. Na sequência, segue o passo-a-passo do cálculo da variável de significância da ASAIA para o aspecto ambiental A01.

#### Passo Único - Cálculo do $Sig_i$

$$Sig_i = S_i \cdot O_i \cdot D_i \cdot A_i = Sig_1 = S_1 \cdot O_1 \cdot D_1 \cdot A_1 =$$

$$= Sig_1 = 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 = 6$$

$$\boxed{Sig_1 = 6}$$

#### 6.1.6 Exemplo de Cálculo das variáveis do modelo de Cercal para a Indústria A

Para o cálculo das variáveis de Análise de Resíduo por Valor (ARV), Análise de Resíduo por Risco (ARR), Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM) e Análise de Resíduo Global (ARG) do Modelo de Cercal, conforme Equações (10) a (29), apresentadas no Capítulo 2 desta Tese, foi utilizado a distribuição dos dados por aspectos ambientais conforme já definida na aplicação da EPIP. Observa-se que como o Modelo de Cercal se limita a análise de resíduos, os aspectos ambientais da Indústria em estudo que não envolvem a geração de

resíduos, mas sim a produção de determinado produto ou sub-produto foram excluídos do cálculo por este modelo. Através dos dados apresentados nas TABELA 10, TABELA 11 e TABELA 13, foi possível realizar os cálculos das variáveis deste modelo, sendo apresentado na sequência o passo-a-passo destes cálculos para o aspecto ambiental A01.

### 1º Passo - Cálculo do $\$_{Total}$

Para o aspecto ambiental A01 que refere-se a geração de pallet de madeira, foi levantado que este resíduo possui como destino a venda para reuso. Desta forma,  $D_{\$+}^{S/N}$  e  $D_{\$R}^{+S/N}$  são iguais a 1, e os outros D se anulam por não haver este tipo de gerenciamento.

$$\begin{aligned} \$'_k &= \$^+ + \$_B + \$_T + \$_{TD} + \$_{GP} - \$_R^+ = \\ &= W_1 \cdot [D_{\$+}^{S/N} \cdot \$_1^+ + D_{\$B}^{-S/N} \cdot \$_{B1}^- + D_{\$T}^{-S/N} \cdot \$_{T1}^- + D_{\$TD}^{-S/N} \cdot \$_{TD1}^- + D_{\$GP}^{-S/N} \cdot \$_{GP1}^- - D_{\$R}^{+S/N} \cdot \$_{R1}^+] \\ &= 400 \cdot [1 \cdot 1,32 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 - 1 \cdot 0,375] = \end{aligned}$$

$$\boxed{\$'_k = R\$378,00}$$

Dado que para os valores de  $D_{\$+}^{S/N}$  e  $D_{\$R}^{+S/N}$  iguais a 1, o valor a ser utilizado para  $\xi_B$  é igual a 0,82, conforme Cercal (2000), e que os valores da variação do custo do material ( $\Delta\$\%$ ), do fator de constância do resíduo gerado ( $K$ ) e do fator de relação do resíduo com o processo ( $\Omega$ ) são iguais a 0,5, 1 e 1 respectivamente, segue o cálculo do valor total do resíduo do aspecto ambiental A01.

$$\xi = \xi_B \cdot \Delta\$\% = 0,82 \cdot 0,5 = 0,41$$

$$\delta^+ = \frac{(1 + \xi)}{(K \cdot \Omega)} = \frac{(1 + 0,41)}{(1 \cdot 1)} = 1,41$$

$$\$_{Total} = \$'_1 \cdot \delta^+ = 378 \cdot 1,41 = 532,98$$

$$\boxed{\$_{Total} = R\$532,98}$$

## 2º Passo - Cálculo do $R$

Para o aspecto ambiental A01 foram classificados os riscos a saúde humana, a vizinhança e ao atendimento da lei como Isento. Além disso, o resíduo deste aspecto é considerado como um Resíduo Não Perigosos e Não inerte. Assim, segue o cálculo do risco deste modelo.

$$R = \left( \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \sum_{q=1}^q Q_{jk} \cdot Z_{jk} \cdot W_k \right) \div \Pi = \frac{400 \cdot 0}{2} = 0$$

$$R = 0,0$$

## 3º Passo - Cálculo do $F$

Para o aspecto ambiental A01 foi classificado a facilidade de minimização como “tecnologia disponível?” para a troca deste suporte de produtos por outro, e o custo relacionado a esta troca de “Muito Alto”. Assim, segue o cálculo da Facilidade de Minimização deste modelo.

$$F = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^e \left( \sum_{f=1}^f F_{jk} \div CM_{jk} \right) \cdot Z_{jk} \cdot W_k = 400 \cdot \frac{-10,1}{2} = -2020,00$$

$$F = -2020,00$$

## 4º Passo - Cálculo do $ARG$

$$\begin{aligned} ARG &= P_{ARV} \cdot ARV + P_{ARR} \cdot ARR + P_{ARFM} \cdot ARFM = \\ &= ARG = 3 \cdot 532,98 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot -2020 = -421,06 \end{aligned}$$

$$ARG = -421,06$$

### 6.1.7 Resultados da Indústria A para as ferramentas EPIP, MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal

Através dos cálculos realizados para todos os 41 aspectos ambientais levantados na Indústria A, foi possível obter os resultados de desempenho ambiental

através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal. Além disso, através da adaptação dos dados destes 41 aspectos ambientais na forma de Centros de quantidade, foi possível aplicá-los e obter os resultados da ferramenta MFCA. Os resultados obtidos para cada uma destas 5 ferramentas foram normalizados pelo desempenho ambiental total calculado para cada uma delas afim de possibilitar a representação deles em percentagem, sendo apresentados na FIGURA 23. Pela análise desta figura foi verificado que o aspecto A26 foi o que obteve o pior desempenho ambiental nas simulações com as ferramentas EPIP, AICV e ASAIA, ou seja, foi classificado com a maior prioridade na tomada de ação em busca de melhorias. Para o modelo de Cercal o aspecto A08 foi o que apresentou o pior desempenho ambiental. Já para a ferramenta MFCA o pior desempenho ambiental foi obtido no CQ 4, relacionado a atividade de termoformagem.

Dado que os cinco primeiros aspectos ambientais classificados em cada ferramenta, e também os cinco 5 primeiros centros de quantidade para a MFCA, corresponderam a no mínimo 50% do desempenho ambiental total calculado para cada ferramenta em relação ao processo da Indústria A, estes aspectos ambientais foram organizados no QUADRO 12, com a finalidade de comparação dos resultados entre as ferramentas.

QUADRO 12 - Resultado da classificação dos aspectos ambientais obtido através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA para a Indústria A.

<b>Posição</b>	<b>EPIP</b>	<b>AICV</b>	<b>ASAIA</b>	<b>Cercal</b>	<b>MFCA</b>
1	A26	A26	A26	A08	CQ4
2	A10	A21	A19	A07	CQ2
3	A11	A22	A31	A11	CQ5
4	A08	A13	A30	A06	CQ6
5	A07	A10	A34	A30	CQ1

Fonte: O Autor (2015)

Para melhor entender as respostas de classificação apresentadas no QUADRO 12 para as cinco ferramentas, foram elaborados cinco gráficos para possibilitar melhor análise da diferenciação desta classificação e os motivos desta diferenciação entre as ferramentas. Em relação a ferramenta EPIP, foram construídas a FIGURA 24, com os resultados de cada aspecto ambiental em relação aos custos por classes separadas, e FIGURA 25, com os resultados da aplicação da AICV com a ferramenta EPIP.

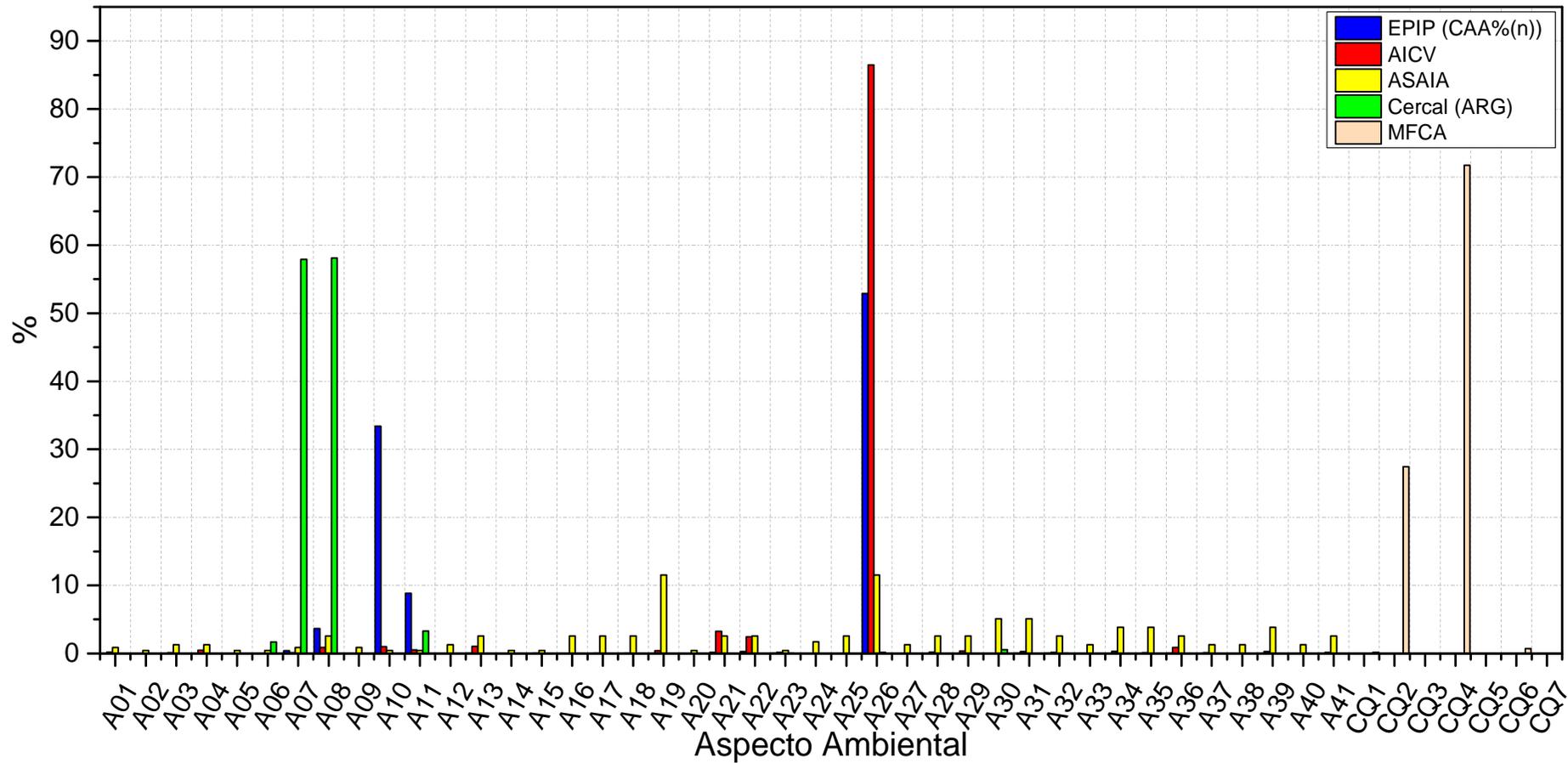


FIGURA 23 - Resultados do desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria A através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e modelo de Cercal, e do desempenho ambiental dos centros de quantidade levantados para a MFCA.  
 Fonte: O Autor (2015)

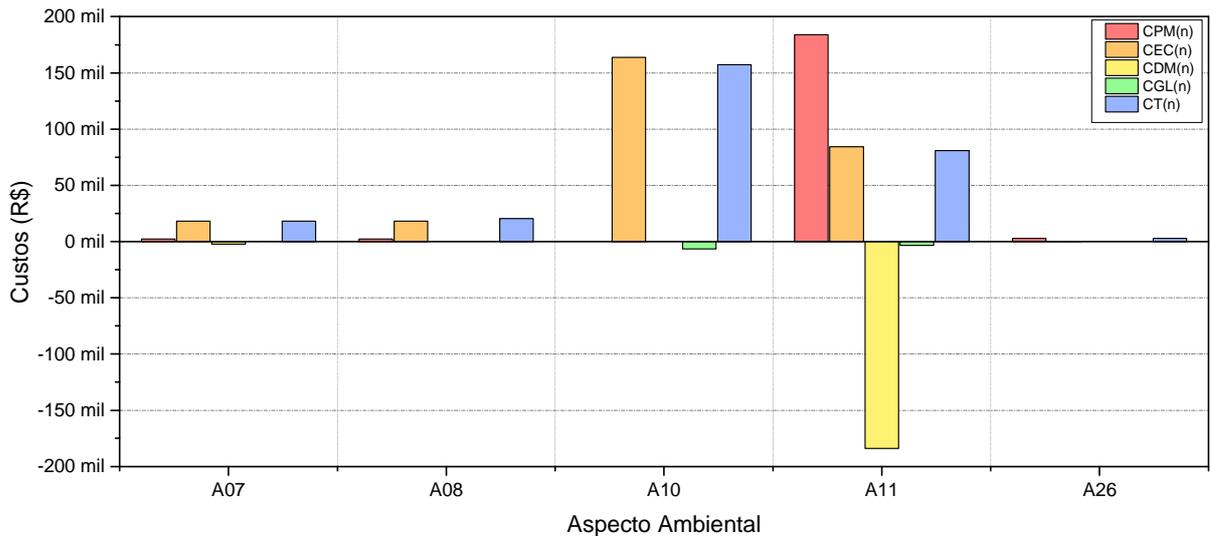


FIGURA 24 - Resultados obtidos dos Custos de Perda Material (CPM), Custo de Energia Consumida (CEC), Custo de Destino Material (CDM) e Custo de Gestão Localizada (CGL) para cada aspecto ambiental através da EPIP aplicada a Indústria A.  
 Fonte: O Autor (2015)

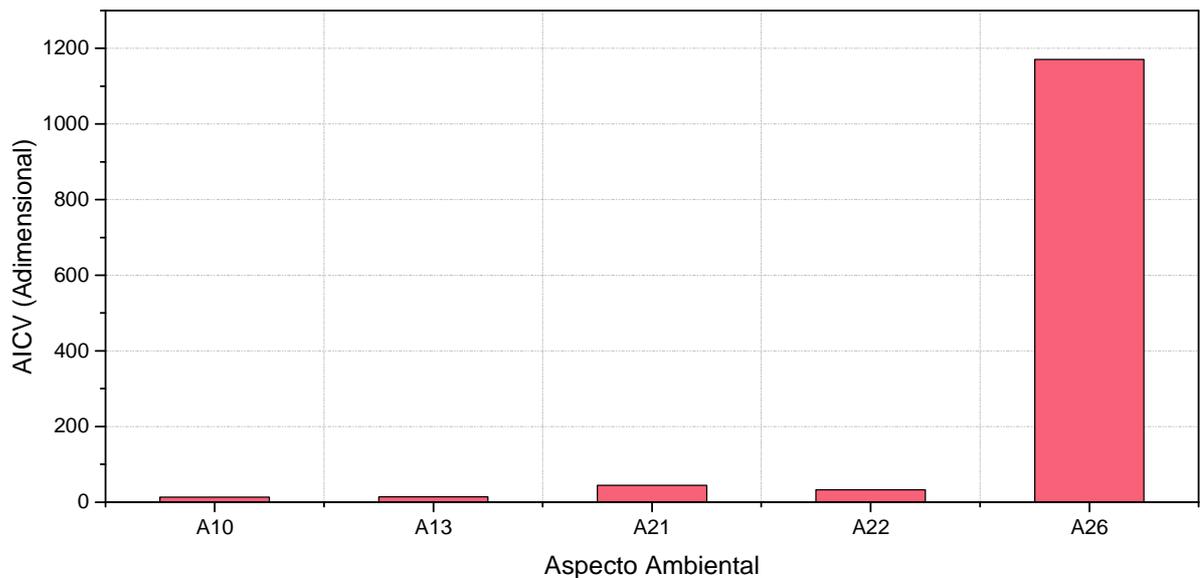


FIGURA 25 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria A através da aplicação da ferramenta AICV.  
 Fonte: O Autor (2015)

Pela análise dos custos e da AICV pela EPIP, foi possível perceber que aspecto A26 (Geração de COVs de impressão), classificado em primeiro lugar para a tomada de ação em busca de redução de seu impacto ambiental, foi fortemente influenciado pelo resultado da AICV, principalmente devido a presença de compostos que podem gerar toxicidade e efeitos respiratórios para a saúde humana. Este aspecto ambiental obteve 52,9 % do custo relativo total dos aspectos ambientais. Já para os aspectos A10 (Copos produzidos da termoformagem), aspecto A11 (Grelha de PP) e A07 (Água quente), ocorreu forte influência do

consumo de energia durante a termoformagem dos copos de PP e consequentemente, o impacto ambiental do consumo do recurso energia elétrica. Por fim, o A08 (Geração de vapor da água) teve como influência principal para seu resultado na quarta posição da classificação a energia utilizada na termoformagem que acabava por evaporar a água e também o impacto ambiental pelo consumo do recurso energia e do recurso água. Neste contexto, percebe-se que estes cinco aspectos ambientais corresponderam a aproximadamente 99,2 % dos custos relativos totais dos aspectos ambientais envolvidos no processo da Indústria A.

Para o resultado da AICV, foi verificado que o aspecto A26 foi classificado no primeiro lugar na classificação, assim como no resultado da EPIP. Este aspecto ambiental concentrou 86,5 % do impacto ambiental total desta indústria conforme a AICV. Porém, percebe-se que este valor obtido na simulação com o AICV é maior do que o percentual deste aspecto no resultado total do EPIP, dado que os custos não estão sendo analisados pela ferramenta AICV. Já os aspectos A21, A22 e A13 foram classificados na segunda, terceira e quarta posição da classificação para a AICV. Foi percebido que esta classificação foi influenciada pela quantidade em massa destes aspectos e também pelo seu impacto relacionado a geração de resíduos perigosos. Apesar disso, devido a ausência da análise econômica, estes três aspectos não apareceram na lista dos três primeiros colocados da EPIP. Por fim, o aspecto que obteve o quinto lugar no ranque pela AICV, o A10, acabou obtendo este resultado devido a grande quantidade de energia consumida relacionada a ele, impactando pela AICV através do consumo do recurso energia elétrica.

Os resultados pela ferramenta ASAIA foram apresentados na FIGURA 26 em relação a sua significância. Foi percebido que os aspectos ambientais com maior significância foram aqueles classificados com a maior severidade. Desta forma, é possível visualizar pela FIGURA 26 que os aspectos A26 (Geração de COV de impressão) e A19 (Geração de COV de acerto) foram os de maior significância para a busca de melhorias ambientais, com resultado igual. No QUADRO 12 o A26 foi classificado na primeira posição e o A19 na segunda posição devido a maior quantidade de massa presente no primeiro aspecto. Esta lógica de desempate foi utilizada também para os outros aspectos ambientais. Os aspectos A31 (geração de efluente sanitário) e A30 (Geração de efluente de limpeza) obtiveram a segunda e terceira posições, respectivamente, porém também com igual resultado. Por fim, o

aspecto ambiental A34 (Geração de lâmpadas usadas) foi classificado na quinta posição em relação ao seu nível de significância.

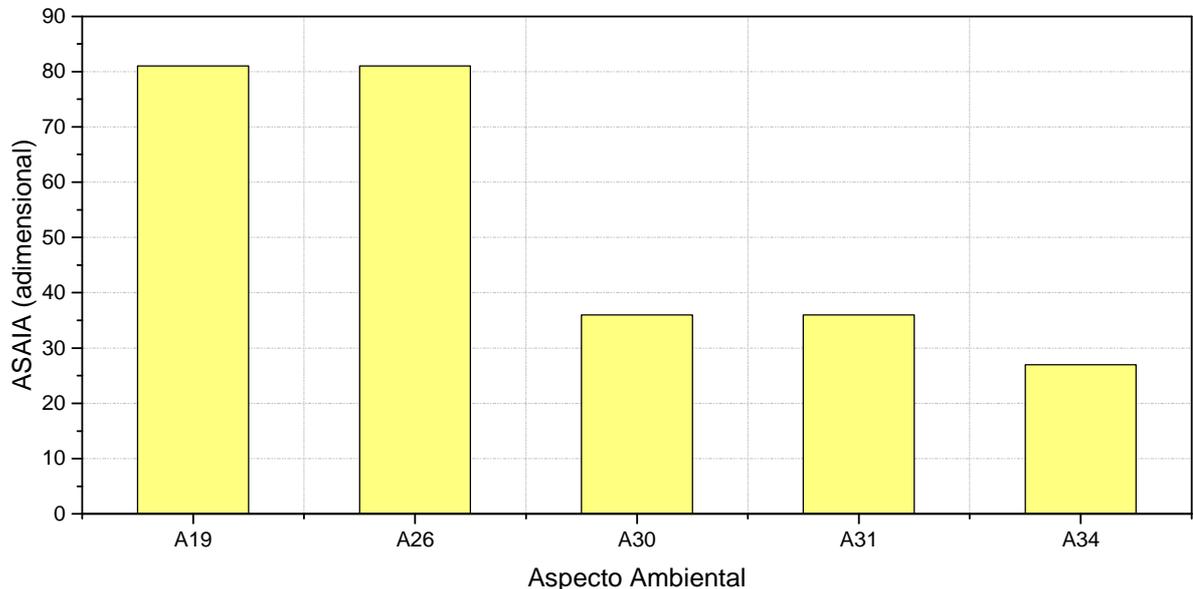


FIGURA 26 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria A através da aplicação da ferramenta ASAIA.  
Fonte: O Autor (2015)

Os resultados obtidos com o modelo de Cercal foram organizados em relação as variáveis de Análise de Resíduo por Valor (ARV), Análise de Resíduo por Risco (ARR) e Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM), conforme FIGURA 27. Desta forma, foi verificado que o primeiro colocado no ranque de aspectos ambientais para este modelo foi o A08 (Geração de vapor da água). Os aspectos ambientais que ocuparam da segunda a quinta posições de prioridade para minimização foram respectivamente o A07 (Água quente), A11 (Grelha de PP), A06 (Sobra de PP) e A30 (Efluente de limpeza). Pôde-se perceber que os resultados dos aspectos A08 e A07 foram superiores aos dos outros aspectos, sendo que estes resultados foram influenciados principalmente pela variável de facilidade de minimização. Desta forma, pôde-se concluir que a falta da análise energética pelo modelo de Cercal e os maiores valores obtidos para a variável ARFM para os aspectos ambientais acabaram por influenciar o ranque obtido por este modelo. Foi percebido ainda que os fatores ARV e ARR não influenciaram o resultado da classificação por apresentarem valores inferiores aos obtidos pela variável ARFM.

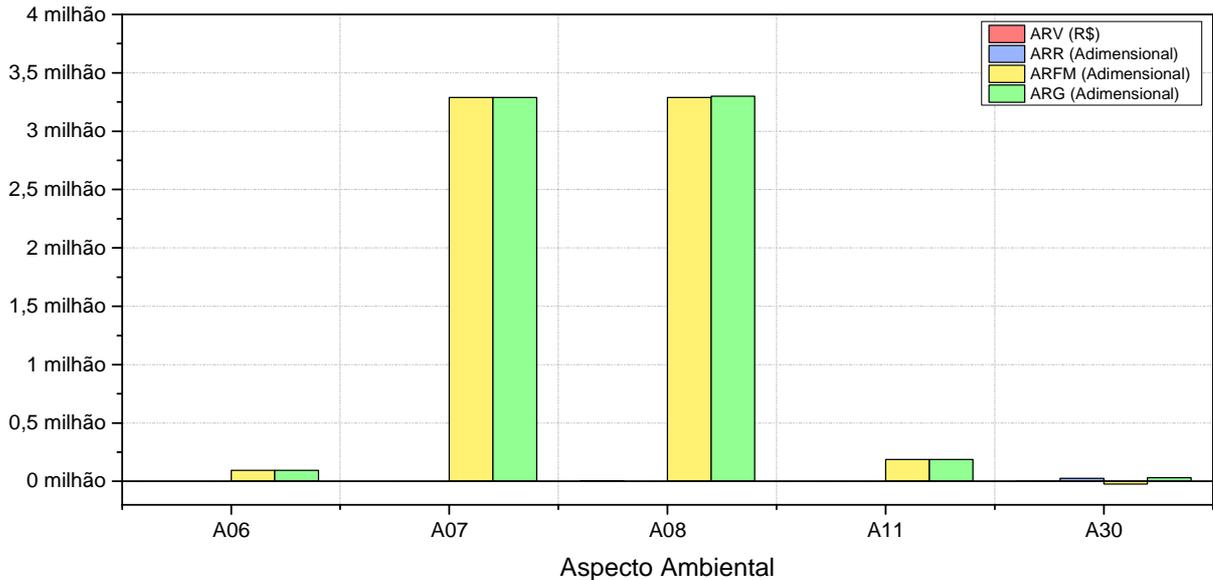


FIGURA 27 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais obtidos para as variáveis ARV (análise de resíduo por valor), ARR (análise de resíduo por risco), ARFM (análise de resíduo por facilidade de minimização) e ARG (análise de resíduo global) para Indústria A através da aplicação do Modelo de Cercal.

Fonte: O Autor (2015)

Por fim, os resultados dos CQs obtidos com a MFCA em relação aos Custos de Materiais perdidos nos Resíduos (CMR), os Custos de Energia nos Resíduos (CER), os Custos de Mão de obra nos Resíduos (CMOR), os Custos de Destino dos Resíduos (CDR) e os Custos Totais (CT), correspondente a soma dos outros custos, foram organizados na FIGURA 28. Desta forma, foi verificado que os valores calculados para a variável CMR em relação a cada CQ foi predominante para o ranque dos piores desempenhos ambientais entre os centros de quantidade. Assim, o CQ 4 (atividade de termoformagem) teve o pior desempenho ambiental, seguido do CQ 2 (extrusão) e do CQ 5 (impressão *dry offset*), na segunda e terceira posições de pior desempenho ambiental. Vale ressaltar que para as ferramentas EPIP, AICV e ASAIA, o aspecto ambiental de pior desempenho ambiental foi o A26 localizado no CQ de impressão *dry offset*, e para o modelo de Cercal o aspecto ambiental de pior desempenho ambiental foi o A08 localizado no CQ de extrusão.

Como pôde ser percebido, cada uma das ferramentas apresentou uma determinada influência de parâmetros de suas formulações matemáticas para a organização da classificação dos aspectos ambientais em relação ao desempenho ambiental calculado para a Indústria A, e também para o ranque dos centros de quantidade pela MFCA. Desta forma, foi realizada a análise das influências dos parâmetros e a análise de sensibilidade para comparação das respostas das

ferramentas estudadas. Estas duas análises realizadas para a Indústria A são apresentadas no item 6.4, juntamente com os resultados das análises para as Indústrias B e C, como forma de discutir em conjunto e traçar conclusões do comportamento das ferramentas analíticas estudadas nesta etapa da Tese.

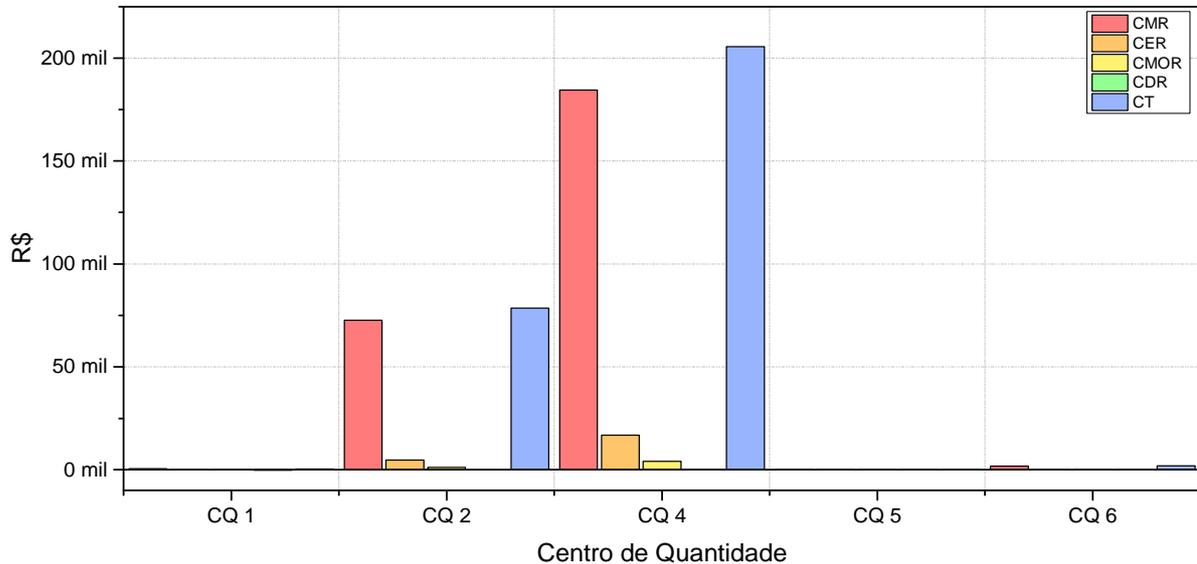


FIGURA 28 - Resultados de desempenho ambiental dos centros de quantidade obtidos para as variáveis CMR (custo de perda material no resíduo), CER (custo da energia no resíduo), CMOR (custo de mão de obra no resíduo), CDR (custo do destino do resíduo) e CT (custo total do resíduo, que é a soma dos outros custos), para Indústria A através da aplicação da ferramenta MFCA.  
Fonte: O Autor (2015)

## 6.2 ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA B – FABRICAÇÃO DE MÓVEIS PLANEJADOS

A segunda indústria estudada foi uma empresa local produtora de móveis sob medida para ambientes domésticos e escritórios, tais como guarda-roupas, móveis para cozinha, escrivaninhas, dentre outros. A empresa é considerada de pequeno porte, localizada no município de Pinhais, Paraná, Brasil, trabalhando com projetos personalizados com clientes na região de Curitiba, litoral do Paraná e também Campos Gerais. Os detalhes do processo produtivo, o levantamento dos dados e também os resultados obtidos pela aplicação das cinco ferramentas de desempenho ambiental são detalhados nos itens 6.2.1 à 6.2.3. A coleta de dados nesta indústria foi realizada entre os meses de abril e junho de 2015, sendo que no mês de abril a maio ocorreram visitas quinzenais para entendimento e mapeamento do processo, e no mês junho foi realizada a coleta de dados e o preenchimento das fichas de coleta. Apesar de trabalhar com projetos personalizados, a empresa possui parceiros do ramo de arquitetura e também da construção civil com demandas

estáveis ao longo dos meses, reduzindo a sazonalidade de produção do processo produtivo desta indústria, e facilitando a aplicação da ferramenta EPIP com dados de poucos meses de coleta.

### 6.2.1 O Processo Produtivo da Indústria B

A indústria B possui uma grande variedade de produtos de fabricação, utilizando como matéria prima principal a madeira MDF. Os principais processos mapeados foram aqueles relacionados ao corte e acabamento da madeira e também o tratamento e pintura desta madeira. O fluxograma do processo da Indústria B segue FIGURA 29.

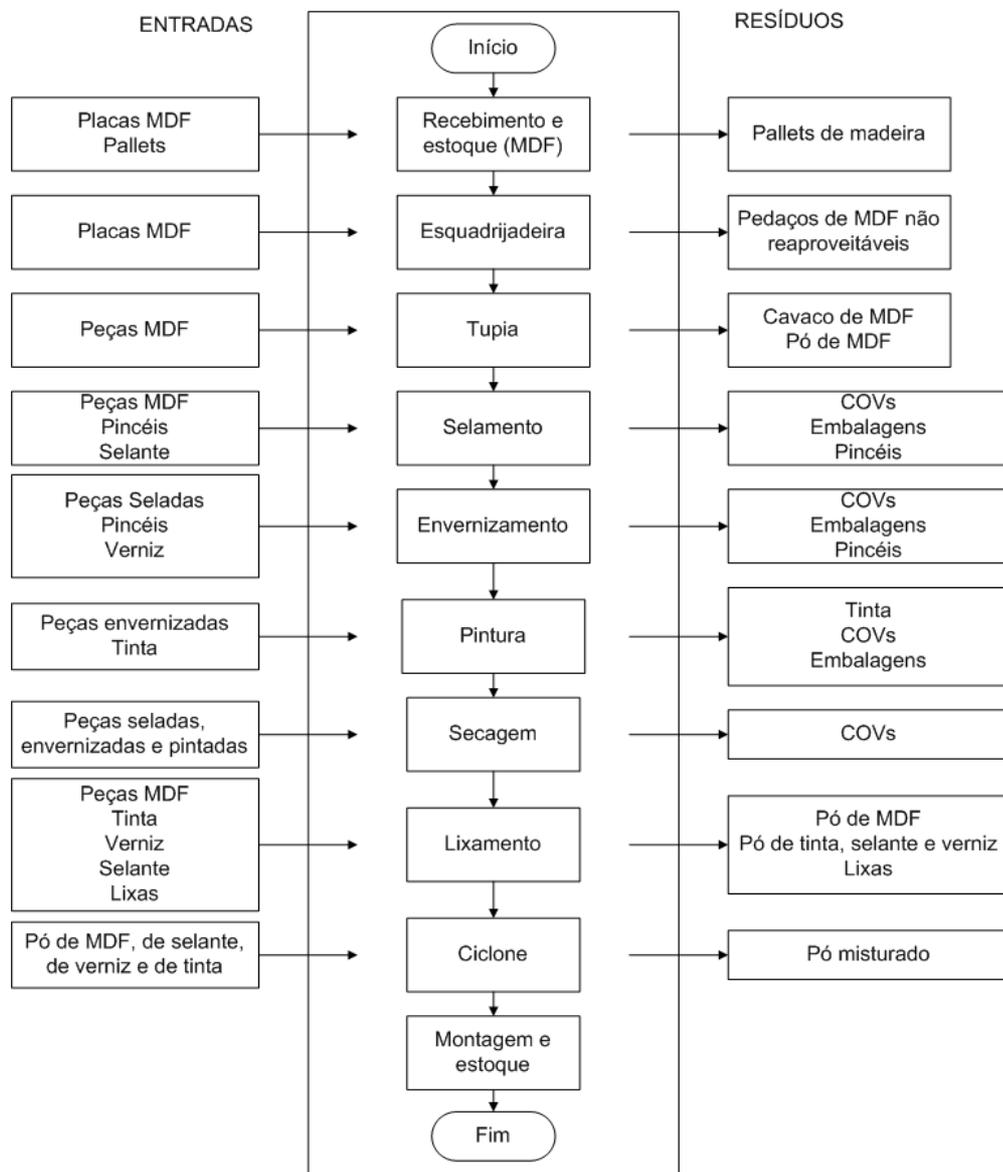


FIGURA 29 - Fluxograma do processo de produção do móveis planejados pela Indústria B.  
 FONTE: O Autor (2015)

O início do processo de produção ocorre com o recebimento de pedidos dos clientes. O layout da fábrica é celular, sendo que cada marceneiro funcionário é responsável pelos processos de esquadrijadeira, tupia, lixamento, selamento e envernizamento para um mesmo grupo de móveis. Desta forma, a produção inicia com a solicitação de materiais do estoque para envio as áreas de produção.

No primeiro processo, chamado de corte em serra esquadrijadeira de precisão (FIGURA 30) o marceneiro recebe chapas de MDF com dimensões médias de 2750 x 1850 x 15 mm e realiza cortes pré definidos em projeto, conforme o móvel a ser produzido, afim de se obter as partes maiores deste móvel, tais como portas, base, mesa, tampo, dentre outros. Após o corte das chapas em peças grandes, o próprio marceneiro utiliza a máquina tupia para a realização de cortes para produção de peças menores, com posterior acabamento, tais como bordas arredondadas, furações, e frisos. Com o final do processo de acabamento com tupia das peças, ocorre o lixamento da madeira para dar lisura ao móvel e retirar imperfeições, seguido de pré montagem deste móvel produzido afim de se verificar possíveis imperfeições da etapa de corte e acabamento. Caso o móvel não seja aprovado neste teste de montagem, ele retorna a área de tupia para ajustes. Se aprovado, é realizada a desmontagem do móvel para posterior trabalho de acabamento visual e de toque.



FIGURA 30 - Foto da esquadrijadeira de precisão utilizada em um dos postos de trabalho do marceneiro.

Fonte: O Autor (2015)

Com a etapa de cortes e acabamentos do MDF bruto finalizada, o marceneiro inicia a etapa de acabamento visual e de toque do móvel. Nesta etapa, ocorrem sequências de passagem de produtos químicos de base para madeira, secagem do produto químico em estufa e lixamento para retirada do excesso. O primeiro passo ocorre com a passagem do selador, o qual tem como função selar a madeira para a entrada de umidade e de possíveis agentes degradantes, tal como o cupim. O selamento é realizado com um esmalte sintético através da utilização de pincel. Após a passagem do esmalte, o móvel segue para estufa e permanece neste local por um período de até 8 horas. Depois, o móvel retorna para a área de marcenaria e é lixado para retirada do excesso de selante. Na sequência, passa-se uma demão de verniz com pincel, com posterior envio do móvel para secagem na estufa. Esta primeira secagem pode levar até 8 horas. Pós secagem, as peças do móvel retornam para a área de marcenaria para lixamento para retirada do excesso de verniz. Este processo de passagem do verniz, secagem e lixamento se repete mais duas vezes, sendo que após a terceira demão, a secagem pode demorar até 24 horas antes do envio das peças a pintura.

Com o final do envernizamento das peças do móvel, estas seguem para a cabine de pintura (FIGURA 31). Neste processo, as peças são pintadas com o uso de pistola de pintura, depois são enviadas a área de secagem por período de 8 horas e seguem a área de pintura para lixamento. Este processo se repete mais uma vez, podendo as peças permanecerem até 24 horas na estufa.

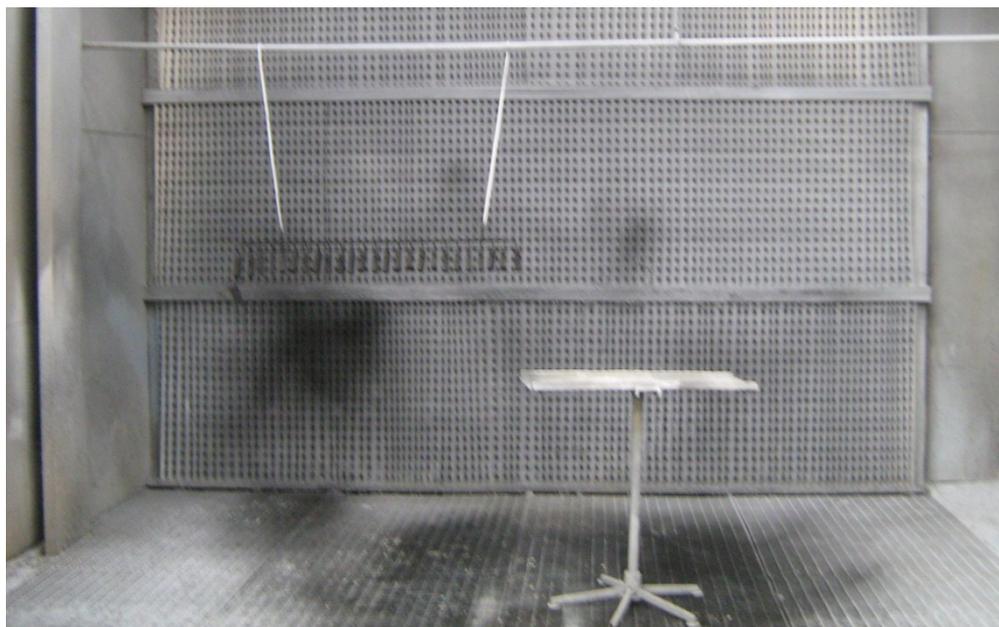


FIGURA 31 - Foto da área de pintura das peças em MDF após envernizamento.  
Fonte: O Autor (2015)

### 6.2.2 Levantamento de dados da Indústria B

O processo de fabricação desta indústria moveleira é composto por cinco áreas de marcenaria, contendo uma serra esquadrijadeira e uma tupia em cada uma delas. Cada área de marcenaria possui 1 marceneiro e 1 meio oficial. Além disso, existem duas cabines de pintura que recebem as peças acabadas da marcenaria, sendo composta por 2 pintores. A empresa funciona de segunda à sexta-feira, das 8:00 às 12:00 e das 14:00 às 18:00 horas, com um efetivo de 15 funcionários, sendo 1 projetista, 1 administrador, 1 secretária, além dos funcionários já citados da produção. Desta forma, foi elaborado o QUADRO 13 que apresentam a lista de processos, aspectos ambientais, entradas materiais e saídas na forma de produto ou resíduos para a Indústria B. O tempo de dados utilizado para a simulação com as 5 ferramentas analíticas de desempenho ambiental foi de 1 mês, referente a junho de 2015.

Quadro 13

ID (n)	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Entradas	Saídas/Resíduos
A01	Recebimento e estoque	Recebimento e estocagem de chapas de MDF	Pallets de madeira e Placas de MDF	Pallets de madeira para descarte
A02	Corte com Esquadrijadeira	Consumo de MDF	Placas de MDF	Chapas de MDF
A03	Corte com Esquadrijadeira	Geração de aparas de MDF da esquadrijadeira	Placas de MDF	Pedaços de MDF não reaproveitáveis
A04	Acabamento com Tupia	Consumo de Chapas de MDF	Chapas de MDF	Peças em MDF
A05	Acabamento com Tupia	Geração de cavaco de MDF da tupia	Chapas de MDF	Cavaco de MDF
A06	Acabamento com Tupia	Geração de pó de varrição da área da tupia	Chapas de MDF	Pó de MDF limpo da Tupia
A07	Ciclone de tratamento de particulado	Geração de Pó de MDF	Pó de MDF, base de fundo, verniz e tinta	Pó misturado
A08	Lixamento manual de peças limpas	Geração de lixas usadas do lixamento de peças limpas	Peças de MDF e lixas	Lixas usadas
A09	Lixamento manual de peças limpas	Geração de Pó de varrição	Peças de MDF e lixas	Pó de MDF limpo do lixamento
A10	Selamento	Geração de COVs do selamento	Peças de MDF e Selador	COVs de base de fundo
A11	Selamento	Geração de embalagem selador	Peças de MDF e Selador	Embalagem de selador
A12	Selamento	Geração de pincéis contaminados com selador	Peças de MDF e Selador	Pincéis contaminados com selador

Continuação do Quadro 13

A13	Lixamento manual de peças selador	Geração de lixas usadas do lixamento de peças com selador	Peças de MDF com selador e Lixas	Lixas contaminadas com selador
A14	Lixamento manual de peças selador	Geração de pó de varrição	Peças de MDF com selador e Lixas	Pó de selador
A15	Passagem manual de verniz	Geração de COVs do verniz	Peças de MDF com selador e verniz	COVs de verniz
A16	Passagem manual de verniz	Geração de pincéis contaminados com verniz	Peças de MDF com selador e verniz	Pincéis contaminados com verniz
A17	Passagem manual de verniz	Geração de embalagem de verniz	Peças de MDF com selador e verniz	Embalagem de verniz
A18	Passagem manual de verniz	Geração de panos contaminados com verniz da limpeza	Peças de MDF com selador e verniz	Panos contaminados com verniz
A19	Lixamento manual de peças envernizadas	Geração de lixas usadas do lixamento de peças com verniz	Peças de MDF envernizadas e lixas	Lixas contaminadas com verniz
A20	Lixamento manual de peças envernizadas	Geração de pó de lixamento de peças com verniz	Peças de MDF envernizadas e lixas	Pó de MDF com verniz
A21	Pintura em pistola	Consumo de peças em MDF envernizadas	Peças envernizadas e tinta	Peças pintadas
A22	Pintura em pistola	Geração de filtro de pintura contaminado	Peças envernizadas e tinta	Filtro contaminado
A23	Pintura em pistola	Geração de embalagens de tinta	Peças envernizadas e tinta	Embalagens de tinta
A24	Pintura em pistola	Geração de panos contaminados com tinta	Peças envernizadas e tinta	Panos contaminados com tinta
A25	Pintura em pistola	Geração de COVs da pintura	Peças envernizadas e tinta	COVs de pintura
A26	Lixamento manual de peças pintadas	Geração de lixas usadas do lixamento de peças pintadas	Peças pintadas e lixas	Lixa contaminada com tinta
A27	Lixamento manual de peças pintadas	Geração de pó de lixamento de peças pintadas	Peças pintadas e lixas	Pó de MDF com tinta
A28	Secagem de peças	Geração de COVs	Peças envernizadas e pintadas	COV de secagem
A29	Secagem de peças	Consumo de peças envernizadas e pintadas	Peças envernizadas e pintadas	Peças envernizadas e pintadas
A30	Embalamento, estoque e expedição	Consumo de embalagens plásticas e papelão	Plásticos	Sobras de embalagem
A31	Manutenção de máquinas	Consumo de óleo lubrificante de máquina	Óleo	Óleo usado
A32	Serviços gerais	Varrição	Vassouras	Resíduo de varrição
A33	Serviços gerais	Limpeza de áreas comuns	Equipamentos, produtos de limpeza e água	Panos contaminados
A34	Serviços gerais	Limpeza de áreas comuns	Equipamentos, produtos de limpeza e água	Embalagem de produtos de limpeza

Continuação do Quadro 13

A35	Serviços gerais	Limpeza de áreas comuns	Equipamentos, produtos de limpeza e água	Efluente de limpeza
A36	Geral	Uso de sanitários	Água e papel	Efluente sanitário
A37	Geral	Uso de sanitários	Água e papel	Papel higiênico usado
A38	Geral	Consumo de água e café para beber	Copos, Água, Café	Copos plásticos usados
A39	Geral	Uso de lâmpadas	Lâmpadas novas	Lâmpadas usadas
A40	Geral	Uso de lâmpadas	Lâmpadas novas	lâmpadas queimadas
A41	Geral	Uso de EPIs	EPIs novos	EPI
A42	Copa	Consumo de alimentos	Café, alimentos diversos	Resíduo orgânico
A43	Copa	Consumo de alimentos	Café, alimentos diversos	Plástico de embalagens
A44	Escritório	Impressão de papéis	Papel, tinta	Papel
A45	Escritório	Impressão de papéis	Papel, tinta	Cartucho impressora
A46	Escritório	Impressão de papéis	Papel, tinta	Plástico de embalagens
A47	Escritório	Uso de Computadores	Computadores	Uso de computador

QUADRO 13 - Levantamento de processos, Aspectos Ambientais, entradas e saídas / resíduos da Indústria B.

Fonte: O Autor (2015)

Os dados de entrada levantados da Indústria B para possibilitar a realização dos cálculos da variável de Custos de Perda Material (CPM), conforme Equação (33), pela ferramenta EPIP seguem TABELA 14.

TABELA 14 - Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização do cálculo dos custos de perda material (CPM) para a Indústria B.

ID(n)	Un	Quantidade MP/insumos	Quantidade de Saída/Resíduos	Materiais nas Saídas/Resíduos	Quantidade Material	Custo Material (R\$/Un)
A01	kg	2625,0	60,0	Madeira	60,0	1,32
A02	kg	2625,0	2524,5	MDF	2524,5	0,00
A03	kg	2625,0	100,5	MDF	100,5	19,05
A04	kg	2524,5	2469,7	MDF	2469,7	0,00
A05	kg	2524,5	51,0	MDF Cavaco	51,0	19,05
A06	kg	2524,5	3,8	MDF Pó	3,8	19,05
A07	kg	91,5	91,5	Pó misturado	91,5	19,05
A08	kg	2470,7	1,0	Lixa	1,0	105,00
A09	kg	2470,7	4,8	MDF	4,8	19,04
A10	kg	2500,3	0,7	COV	0,7	10,50
A11	kg	2500,3	2,1	Lata	2,1	0,00
A12	kg	2500,3	0,2	Pincéis	0,2	38,90
A13	kg	2499,7	0,0	Lixa	0,0	105,00
A14	kg	2499,7	1,2	Pó selador	1,2	10,50
A15	kg	2511,4	0,3	COV	0,3	59,50
A16	kg	2511,4	0,7	Pincéis	0,7	38,90
A17	kg	2511,4	1,3	Embalagem	1,3	0,00
A18	kg	2511,4	2,2	Pano Verniz	1,6	6,30
					0,7	59,50

Continuação da Tabela 14

A19	kg	2510,6	0,1	Lixa	0,1	105,00
A20	kg	2510,6	3,5	Pó de verniz	3,5	59,50
A21	kg	2635,6	2620,4	MDF Tinta	2507,1 113,3	0,00 0,00
A22	kg	2635,6	14,7	Filtro Tinta	0,2 14,5	162,50 26,10
A23	kg	2635,6	8,7	Lata Tinta	8,5 0,3	0,00 26,10
A24	kg	2635,6	1,5	Pano Tinta	1,1 0,5	6,30 26,10
A25	kg	2635,6	2,5	COV	2,5	26,10
A26	kg	2602,7	0,2	Lixa	0,2	105,00
A27	kg	2602,7	2,2	Pó tinta	2,2	26,10
A28	kg	2600,5	12,8	COV	12,8	40,20
A29	kg	2600,5	2587,6	MDF pintado	2587,6	0,00
A30	kg	2797,6	20,4	Embalagem	20,4	0,00
A31	kg	1,5	1,5	Óleo	1,5	15,80
A32	kg	0,0	22,5	Resíduo varrição	22,5	0,00
A33	kg	574,6	2,1	Panos contaminados	2,1	2,20
A34	kg	574,6	0,9	Embalagem	0,9	0,00
A35	kg	574,6	572,5	Água Produto de limpeza	520,0 52,5	0,00542 1,20
A36	kg	15462,5	15440,0	Água	15440,0	0,00542
A37	kg	15462,5	22,5	Papel usado	22,5	10,80
A38	kg	572,5	0,5	Copos sujos	0,5	10,90
A39	kg	6,0	5,0	Lâmpada	5,0	0,00
A40	kg	6,0	1,0	Lâmpada	1,0	25,90
A41	kg	15,0	15,0	EPI	15,0	1,00
A42	kg	0,0	105,0	Resíduo Orgânico	105,0	0,00
A43	kg	0,0	30,0	Plástico	30,0	0,00
A44	kg	2,1	2,1	Papel usado	2,1	5,65
A45	kg	2,1	0,2	Cartucho	0,2	0,00
A46	kg	2,1	0,0	Plástico	0,0	0,00
A47	Unidade	4,0	4,0	Computador	0,0	0,00

Fonte: O Autor (2015)

Para a realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) pela EPIP, conforme Equações (34) e (35), foram levantados os dados de quantidade de energia consumida em cada equipamento, o custo unitário da energia de acordo com a concessionária fornecedora do serviço, a quantidade de resíduos a serem gerenciados para cada aspecto, o tipo do destino dado e o custo unitário de cada destino para cada aspecto. Estes dados são apresentados na TABELA 15.

TABELA 15 - Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) para a Indústria B. (NA = Não aplicado por não ser resíduo, por ser material lançado sem tratamento e sem exigência para tratamento ou por ser devolvido pelo fornecedor como embalagem vazia).

ID (n)	ACEC			ACDM				Custo de Destino (R\$/Un)
	EG (kW.h)	CE (R\$/kW.h)	PE (%)	Un	Quantidade de Resíduo	Tipo de destino (d)	Porcentagem de destino (%)	
A01	0,0	0,6621	0,02	kg	60,0	4		-0,400
A02	484,0	0,6621	0,96	kg	2524,5	ND		0,000
A03	484,0	0,6621	0,04	kg	100,5	5		-0,400
A04	193,6	0,6621	0,98	kg	2469,7	ND		0,000
A05	193,6	0,6621	0,02	kg	51,0	5		-0,400
A06	193,6	0,6621	0,00	kg	3,8	9		1,820
A07	814,0	0,6621	1,00	kg	91,5	9		1,820
A08	0,0	0,6621	0,00	kg	1,0	9		1,800
A09	0,0	0,6621	0,00	kg	4,8	9		0,820
A10	0,0	0,6621	0,00	kg	0,7	ND		0,000
A11	0,0	0,6621	0,00	kg	2,1	9		1,800
A12	0,0	0,6621	0,00	kg	0,2	9		1,800
A13	0,0	0,6621	0,00	kg	0,0	9		1,800
A14	0,0	0,6621	0,00	kg	1,2	9		1,800
A15	0,0	0,6621	0,00	kg	0,3	ND		0,000
A16	0,0	0,6621	0,00	kg	0,7	9		1,800
A17	0,0	0,6621	0,00	kg	1,3	9		1,800
A18	0,0	0,6621	0,00	kg	2,2	9		1,800
A19	0,0	0,6621	0,00	kg	0,1	9		1,800
A20	0,0	0,6621	0,00	kg	3,5	9		1,800
A21	66,0	0,6621	0,99	kg	2620,4	ND		0,000
A22	66,0	0,6621	0,01	kg	14,7	9		1,800
A23	66,0	0,6621	0,00	kg	8,7	9		1,800
A24	66,0	0,6621	0,00	kg	1,5	9		1,800
A25	66,0	0,6621	0,00	kg	2,5	ND		0,000
A26	0,0	0,6621	0,00	kg	0,2	9		1,800
A27	0,0	0,6621	0,00	kg	2,2	9		1,800
A28	1600,0	0,6621	0,00	kg	12,8	ND		0,000
A29	1600,0	0,6621	1,00	kg	2587,6	ND		0,000
A30	0,0	0,6621	0,01	kg	20,4	5		-0,300
A31	0,0	0,6621	1,00	kg	1,5	5		-0,300
A32	0,0	0,6621	0,00	kg	22,5	9		0,820
A33	0,0	0,6621	0,00	kg	2,1	9		1,800
A34	0,0	0,6621	0,00	kg	0,5	9		1,800
A35	0,0	0,6621	1,00	kg	572,5	8		0,004
A36	0,0	0,6621	1,00	kg	15440,0	8		0,004
A37	0,0	0,6621	0,00	kg	22,5	9		0,820
A38	0,0	0,6621	0,00	kg	0,5	9		0,820
A39	528,0	0,6621	0,83	kg	0,5	ND		0,000
A40	528,0	0,6621	0,17	kg	1,0	8		11,900
A41	0,0	0,6621	1,00	kg	15,0	9		1,800
A42	0,0	0,6621	0,00	kg	105,0	9		1,800
A43	0,0	0,6621	0,00	kg	30,0	9		0,820
A44	20,0	0,6621	1,00	kg	2,1	9		0,820
A45	20,0	0,6621	0,11	kg	0,2	9		0,820
A46	20,0	0,6621	0,01	kg	0,0	5		-3,000
A47	207,7	0,6621	1,00	Unidade	4,0	ND		0,000

Fonte: O Autor (2015)

Os valores dos Custos de Gestão Localizada e dos Custos de Pesquisa e Desenvolvimento não foram avaliados para esta Indústria, pois não houve investimentos no último ano relativos a busca de melhorias ambientais.

Após do levantamento dos dados de balanço material e de energia e de custos, foi realizada a análise dos impactos ambientais para cada aspecto em relação as 17 categorias de impacto presentes na AICV conforme a ferramenta EPIP. Os resultados da classificação dos aspectos ambientais para as categorias de impacto Resíduos Gerados (RG), Uso de Água (UA), Energia Não Renovável (ENR), Toxicidade Humana (TH), Respiração de compostos Inorgânicos (RIn) e Respiração de compostos Orgânicos (ROr) são apresentados no QUADRO 14. As categorias de impacto de Depleção da camada de Ozônio (DO), Radiação Ionizante (RI), Ecotoxicidade (Eco), Acidificação (Aci), Eutrofização (Eut), Solo Ocupado (SO), Solo Transformado (ST), uso de Minerais (Mi), uso de Combustíveis fósseis (Com) e Energia Renovável (ER) não foram apresentadas no QUADRO 14 por não terem apresentado compostos ou energias aplicados aos aspectos ambientais levantados.

Quadro 14

ID (n)	RG*	UA*	ENR*	TH*	RIn*	ROr*
A01	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A02	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A03	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A04	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A05	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A06	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A07	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A08	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A09	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A10	NA	NA	Energia elétrica, BR	COV	NA	COV

Continuação do Quadro 14

A11	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A12	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A13	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A14	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A15	NA	NA	Energia elétrica, BR	COV	NA	COV
A16	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A17	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A18	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A19	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	COV	NA	COV
A20	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A21	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A22	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A23	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A24	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A25	NA	NA	Energia elétrica, BR	COV	NA	COV
A26	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A27	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total	NA
A28	NA	NA	Energia elétrica, BR	COV	NA	COV
A29	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA

Continuação do Quadro 14

A30	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A31	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A32	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A33	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A34	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A35	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A36	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A37	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A38	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A39	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A40	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A41	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A42	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A43	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A44	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A45	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A46	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA
A47	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA	NA

QUADRO 14 - Dados de entrada selecionadas para categoria de impacto da AICV em relação a cada aspecto ambiental *n*. \* RG (Resíduo Gerado); UA (Uso de Água); ENR (Energia Não Renovável); TH (Toxicidade Humana); RIn (Respiração de compostos inorgânicos); ROr (Respiração de compostos orgânicos). NA = Não aplicável  
Fonte: O Autor (2015)

Os dados levantados conforme TABELA 14 e TABELA 15 foram também utilizados para as simulações com as ferramentas AICV, ASAIA e o Modelo de Cercal. Estes dados ainda foram organizados na forma de centros de quantidade para possibilitar a aplicação da ferramenta MFCA, conforme TABELA 16. Para o cálculo dos resultados da MFCA foram também levantados os custo da hora da mão-de-obra por atividade e o tempo total de atividade para cada mão-de-obra.

TABELA 16 - Dados de entrada da MFCA para a indústria B.

CQ	Material	Entrada (kg)	Saída/ Produto (kg)	Saída/ Resíduo (kg)	Custo (R\$/kg)	Custo de destino (R\$/kg)	Energia (kW.h)	Mão-de-obra	
CQ 1	MDF	2625	2524,5	100,5	19,05	-0,40	160,5	Nº	10
								Tempo (h)	40
	Pallet	60	0	60	1,40	-0,40		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	7,22
CQ 2	MDF	2524,5	2469,7	0	19,05	0	193,6	Nº	10
	Cavaco	0	0	51	19,05	-0,40		Tempo (h)	40
	Pó	0	0	3,8	19,05	1,80		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	7,22
CQ 3	Pó	91,5	0	91,5	19,05	1,80	814	Nº	0
CQ 4	MDF	2469,7	2464,95	4,75	19,05	1,80	0	Nº	10
	Lixa	1,264	0	1,264	105,00	1,80		Tempo (h)	40
	Selador	28,59	27,39	1,2	10,5	1,80		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	7,22
	Verniz	11,41	7,91	3,5	59,5	1,80			
	Tinta	99,99	97,79	2,2	26,10	1,80			
CQ 5	Peça	2469,7	2469,7	0	19,05	0	0	Nº	10
	Selador	30,6	29,93	0	10,50	0		Tempo (h)	20
	Pincél	0,18	0	0,18	38,90	1,80		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	7,22
	Lata	2,06	0	2,06	0	1,80			
	COV	0	0	0,67	10,50	0			
CQ 6	Peça	2469,7	2469,7	0	19,05	0	0	Nº	10
	Verniz	12,98	12,68	0	59,50	0		Tempo (h)	40
	Pincél	0,72	0	0,72	38,90	1,80		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	7,22
	Lata	1,30	0	1,30	0	1,80			
	Pano	1,57	0	1,57	6,30	1,80			
	COV	0	0	0,3	59,50	0			
CQ 7	Peça	2469,7	2469,7	0	19,05	0	66	Nº	2
	Tinta	128,5	110,8	15,2	26,10	1,80		Tempo (h)	180
	COV	0	0	2,5	26,10	0		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	7,22
CQ 8	Peça	2469,7	2469,7	0	19,05	0	1600	Nº	0
	Selador	29,93	28,59	0	10,50	0			
	Verniz	12,68	11,41	0	59,50	0			
	Tinta	110,8	99,9	0	26,10	0			
	COV	0	0	12,84	40,2	0			

Fonte: O Autor (2015)

Para o cálculo dos resultados da AICV, foi definido como método representativo a própria integração de métodos AICV proposta na EPIP como já

comentado na aplicação desta ferramenta na Indústria A. Em relação a ASAIA, os resultados foram obtidos pela análise e classificação de cada aspecto ambiental em relação ao nível de Severidade, Ocorrência, Detecção e Abrangência de cada um deles, conforme QUADRO 15.

<b>ID (n)</b>	<b>Severidade</b>	<b>Ocorrência</b>	<b>Detecção</b>	<b>Abrangência</b>
A01	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A02	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A03	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A04	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A05	Irreversível	Frequente	Difícil	Global
A06	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A07	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A08	Fácil	Global	Irreversível	Frequente
A09	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A10	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A11	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A12	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A13	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A14	Fácil	Global	Reversível	Periódica
A15	Irreversível	Frequente	Difícil	Global
A16	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A17	Irreversível	Frequente	Difícil	Global
A18	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A19	Irreversível	Frequente	Difícil	Global
A20	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A21	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A22	Média	Global	Reversível	Frequente
A23	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A24	Fácil	Global	Irreversível	Frequente
A25	Irreversível	Frequente	Fácil	Global
A26	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A27	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A28	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A29	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A30	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A31	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A32	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A33	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A34	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A35	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A36	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A37	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A38	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A39	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A40	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A41	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A42	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A43	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A44	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A45	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A46	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A47	Desprezível	Frequente	Fácil	Local

QUADRO 15 - Dados de entrada para o cálculo de risco através da ASAIA para a Indústria B.  
Fonte: O Autor (2015)

Por fim, foram obtidos os dados do Índice de Priorização Hierárquica de Minimização de Resíduos, bem como a classificação de cada aspecto ambiental em relação ao risco à saúde, a periculosidade do resíduo, a facilidade de minimização e o custo de minimização, conforme TABELA 17, para possibilitar os cálculos da Análise de Resíduo por Valor (ARV), da Análise de Resíduo por Risco (ARR), da Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM) e da Análise Global de Resíduo (AGR).

TABELA 17 - Dados de entrada para o cálculo do ARV (Análise de Resíduo por Valor), ARR (Análise de Resíduo por Risco), ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização) e AGR (Análise Global de Resíduo) através do modelo de Cercal para a Indústria B.

ID (n)	Análise de Resíduo por Valor	Análise de Resíduo por Risco		Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização	
	Índice de Priorização Hierárquica de Minimização de Resíduos ( $\xi_b$ )	Risco a Saúde Humana	Classe do Resíduo (Periculosidade)	Facilidade de Minimização ( $F_i$ )	Custo da Minimização ( $CM_i$ )
A01	0,82	Isento	N Perigoso N Inerte	Tecnologia disponível?	Alto
A02	NA	NA	NA	NA	NA
A03	0,2	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A04	NA	NA	NA	NA	NA
A05	1	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A06	0,2	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A07	0,97	Isento	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A08	0,97	Potencial	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Baixo
A09	-0,6	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A10	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A11	1	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A12	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A13	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Baixo
A14	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A15	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A16	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A17	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A18	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A19	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Baixo

Continuação da Tabela 17

A20	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A21	NA	NA	NA	NA	NA
A22	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A23	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A24	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A25	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A26	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Baixo
A27	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A28	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A29	NA	NA	NA	NA	NA
A30	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A31	0,2	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A32	-0,6	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A33	-0,6	Potencial	Perigoso	Modificar processo?	Baixo
A34	-0,6	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A35	0,2	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A36	0,2	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A37	0,2	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A38	0,2	Isento	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A39	NA	NA	NA	NA	NA
A40	-0,6	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A41	0,2	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A42	0	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A43	0	Isento	N Perigoso Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A44	0	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A45	0	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A46	0	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A47	NA	NA	NA	Mão de obra disponível?	Baixo

Fonte: O Autor (2015)

### 6.2.3 Resultados da Indústria B para as ferramentas EPIP, MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal

Com a realização dos cálculos do desempenho ambiental para os 47 aspectos ambientais levantados e também os 8 centro de quantidades relacionados a Indústria B através das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA, foi analisado o ranque de aspectos ambientais e centros de quantidade a serem melhorados em seus desempenhos ambientais, bem como a diferença de respostas para este ranque entre as ferramentas. Os resultados obtidos para cada uma destas 5 ferramentas são apresentados na FIGURA 32.

Pela análise desta figura foi verificado que o aspecto A07 foi o que obteve o melhor ranque pelas ferramentas EPIP e AICV. Além disso, para a ferramenta MFCA o CQ 3, com a atividade de filtro por ciclone, foi o de pior desempenho ambiental, sendo que nesta atividade se encontra o aspecto A07. Já para a ferramenta ASAIA o aspecto de pior desempenho ambiental foi o A28 (Geração de COVs de secagem), e para o modelo de Cercal o pior desempenho ambiental foi obtido aspecto A03 (Geração de pedaços de MDF da esquadriadeira).

Desta forma, assim como realizado no estudo de caso da Indústria A, dado que os cinco primeiros aspectos ambientais classificados em cada ferramenta, e também os cinco 5 primeiros centros de quantidade para a MFCA, corresponderam a valores superiores a 60% do desempenho ambiental total calculado para o processo da Indústria B, estes aspectos ambientais foram organizados no QUADRO 16, com a finalidade de comparação dos resultados entre as ferramentas.

<b>Posição</b>	<b>EPIP</b>	<b>AICV</b>	<b>ASAIA</b>	<b>Cercal</b>	<b>MFCA</b>
1	A07	A07	A28	A36	CQ3
2	A28	A28	A25	A07	CQ2
3	A22	A22	A31	A05	CQ1
4	A03	A25	A15	A03	CQ4
5	A20	A30	A10	A35	CQ7

QUADRO 16 - Resultado da classificação dos aspectos ambientais obtido através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA para a Indústria B.

Fonte: O Autor (2015)

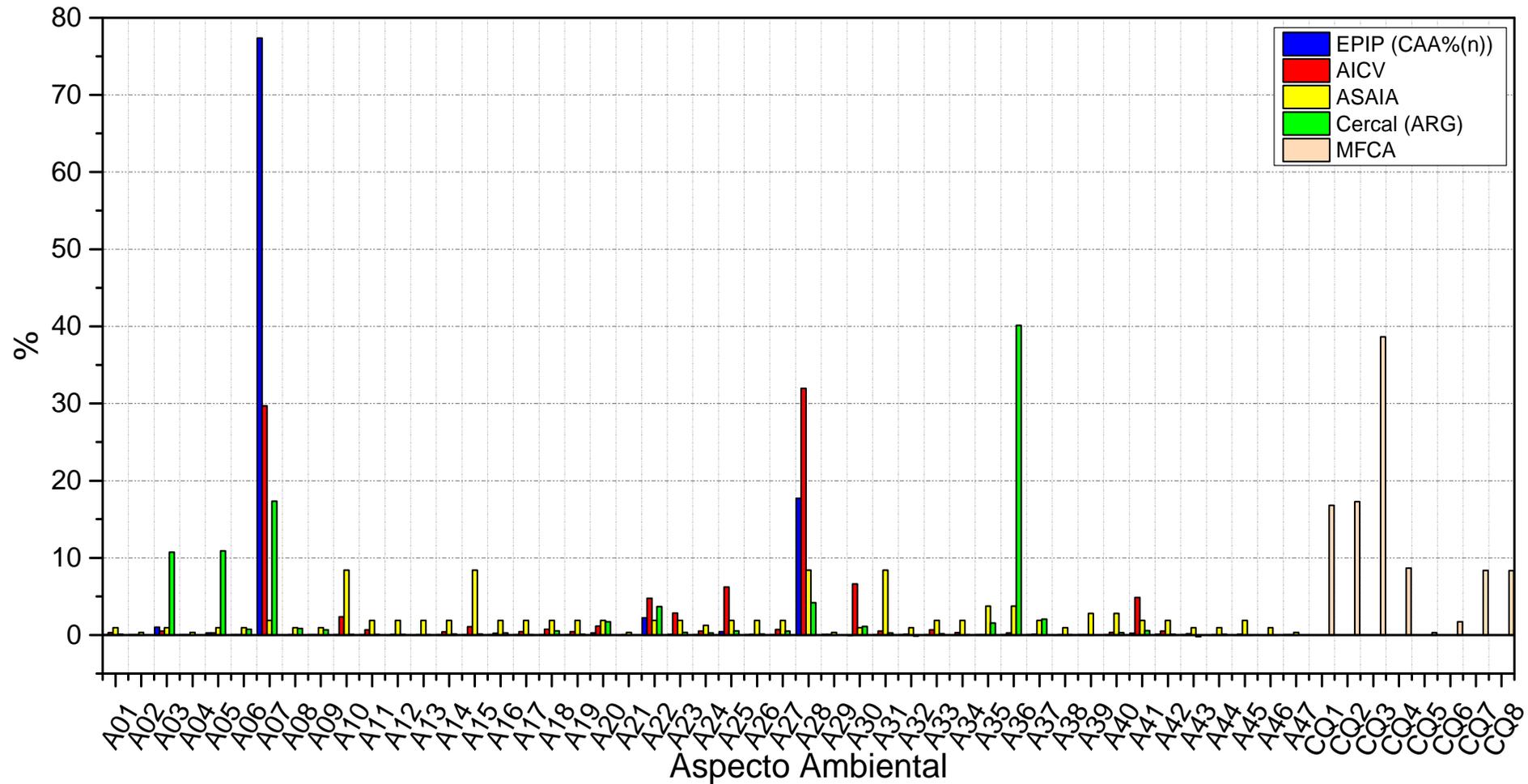


FIGURA 32 - Resultados do desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria B através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e modelo de Cercal, e do desempenho ambiental dos centros de quantidade pela aplicação da MFCA.  
 Fonte: O Autor (2015)

De acordo com os resultados destes cinco primeiros aspectos ambientais no ranque obtido pela ferramenta EPIP, foi verificado que o aspecto A07 (Pó misturado do ciclone), que obteve a primeira posição no ranque da simulação com a EPIP, teve influência neste resultado pelo acúmulo de custos com a perda material, consumo de energia e do destino do material (FIGURA 33), e principalmente devido ao impacto ambiental no cálculo da AICV pela presença de resíduos perigosos e o consumo do recurso energia elétrica (FIGURA 34). Este aspecto concentrou 87,9 % do cálculo do desempenho ambiental total desta indústria em estudo. Já o aspecto A28 (Geração de COVs da secagem) teve influência dos custos da perda material (FIGURA 33) e principalmente do impacto potencial a Saúde Humana pela relação dos COVs (FIGURA 34). Para este aspecto, foi percebido que o valor obtido da AICV passou este aspecto da terceira posição da classificação para a segunda posição. Para o aspecto A22 (geração do filtro contaminado da pintura) classificado na terceira posição da classificação obtido da EPIP, foi verificada a influência do custo da perda material e principalmente o menor valor do AICV em relação ao aspecto A28. Por fim, para os aspectos A03 (Geração de pedaços de MDF da esquadriadeira) e A20 (Geração de pó de verniz do lixamento) classificados na quarta e quinta posições, respectivamente, os custos calculados das perdas materiais foram os que mais influenciaram a posição destes aspectos no ranque da EPIP. Apesar disso, o menor impacto ambiental do aspecto A03, considerado como um resíduo não perigoso, fez com que este aspecto saísse do segundo lugar no ranque da análise de custos e fosse classificado na quarta posição do resultado final da EPIP.

Para o resultado da AICV (FIGURA 34), o aspecto A07 foi classificado no primeiro lugar no ranque, assim como no resultado da EPIP. Este aspecto ambiental concentrou 47,7 % do impacto ambiental total desta indústria conforme a AICV. Este percentual foi inferior ao resultado percentual do total do desempenho ambiental obtido para este aspecto pela EPIP. Ou seja, os valores dos custos da perda material, de energia consumida e do destino material impulsionaram para cima o resultado do A07 na EPIP em relação a AICV. Já os aspectos A28 (geração de COV da secagem) e A25 (geração de COV da pintura), classificados na segunda e quarta posição da classificação da AICV, tiveram maior influência dos impactos relacionados a Saúde humana, apesar destes aspectos possuírem menor massa do que o aspecto A22. Por fim, os aspectos A22 (geração de filtro contaminado de

pintura) e A30 (geração de embalagem de tinta) foram influenciados pela quantidade em massa destes aspectos e também pelo seu impacto relacionado a geração de resíduos perigosos, para classificação deles na terceira e quinta posições.

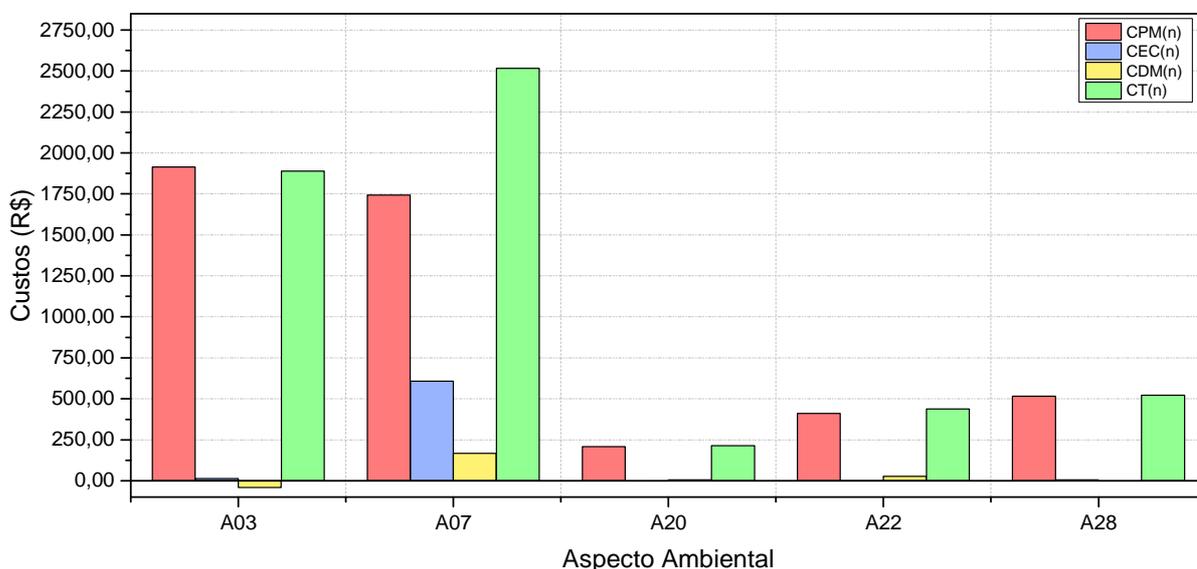


FIGURA 33 - Resultados obtidos dos Custos de Perda Material (CPM), Custo de Energia Consumida (CEC) e Custo de Destino Material (CDM) para cada aspecto ambiental através da EPIP aplicada a Indústria B.

Fonte: O Autor (2015)

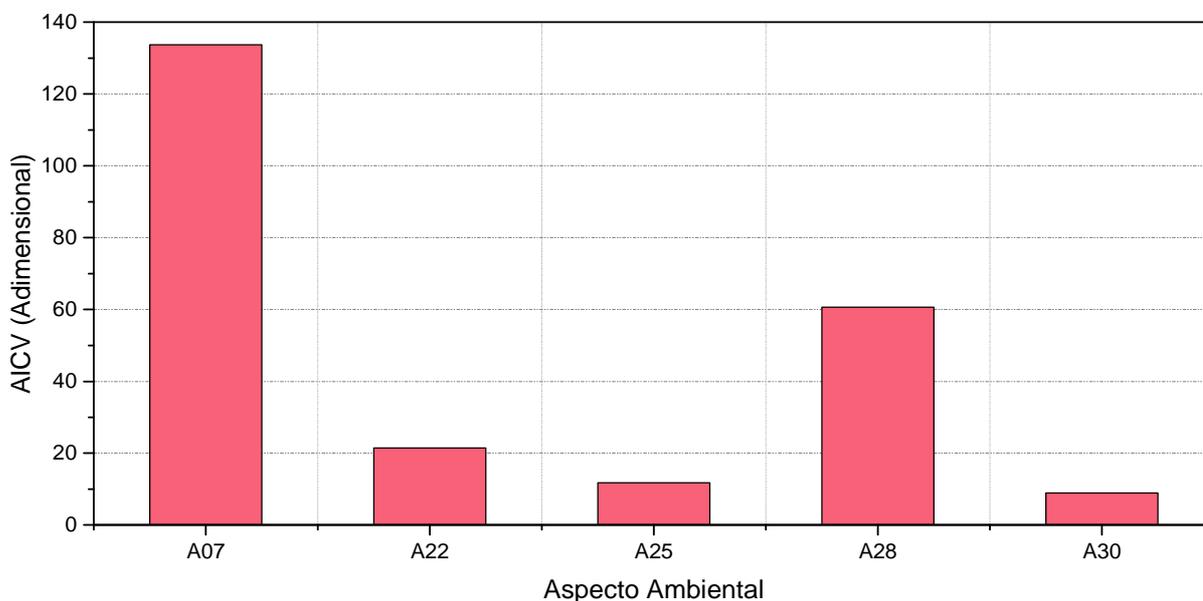


FIGURA 34 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria B através da aplicação da ferramenta AICV.

Fonte: O Autor (2015)

Os resultados pela ferramenta ASIA apresentados na FIGURA 34 em relação a sua significância mostraram que os aspectos ambientais com maior

significância foram aqueles classificados com a maior nível de severidade e maior dificuldade de detecção, sendo eles o A28 (geração de COV de secagem), A25 (geração de COV da pintura), A31 (geração de COV do envernizamento), A10 (geração de COV do selamento) e A15 (geração de óleo usado das máquinas). Ou seja, pôde-se verificar que os quatro primeiros aspectos classificados estavam relacionados aos gases de COV emitidos pelos solventes nos processos de tratamento da madeira.

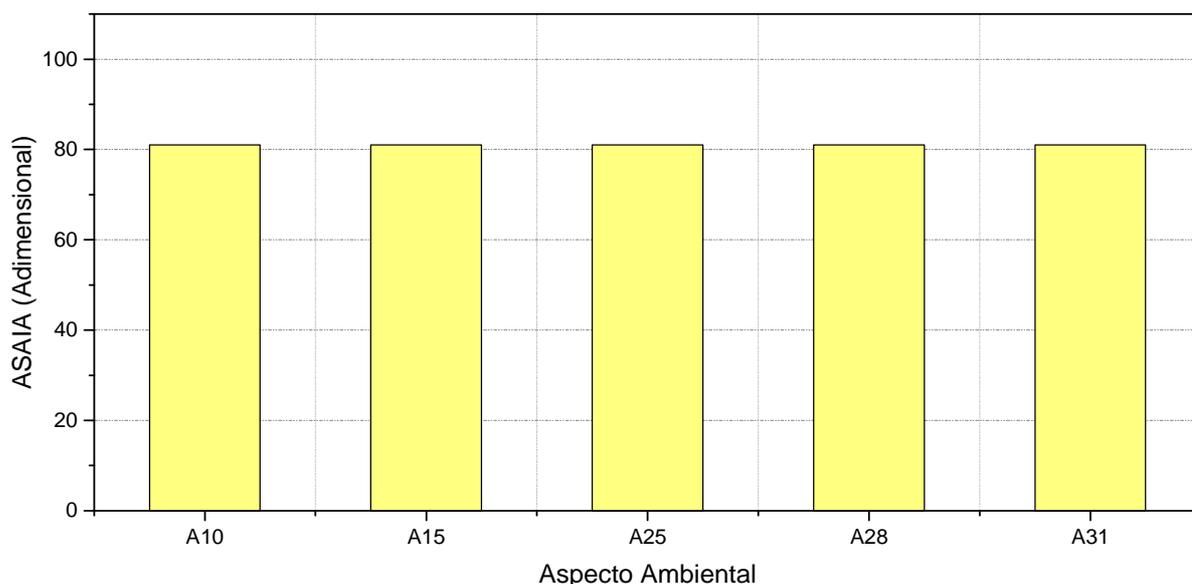


FIGURA 35 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria B através da aplicação da ferramenta ASAIA.

Fonte: O Autor (2015)

Para o modelo de Cercal, pôde ser visto que o aspecto A36 (efluente sanitário) classificado na primeira posição de desempenho ambiental foi o aspecto predominante em prioridade, com um percentual do desempenho total de 41 %. Este resultado ocorreu principalmente devido a grande quantidade de volume de água desperdiçada na forma de efluente, alavancando os resultados da ARR e ARFM.

Por fim, os resultados dos CQs pela MFCA em relação aos custos de perda de materiais, custos de energia, custos de sistema (mão de obra) e custos de gestão dos resíduos foram organizados na FIGURA 37. Após análise destes resultados, foi visto que o CQ 03 (filtração com ciclone) obteve o pior resultado de desempenho ambiental entre os centros de quantidade da Indústria B. A influência dos custos com a energia consumida e com as perdas materiais foram predominantes para o posicionamento deste aspecto no ranque da MFCA. Na sequência, os centros de

quantidade CQ 02 (tupia), CQ 01 (esquadrijadeira), CQ 04 (lixamento) e CQ 07 (pintura) foram classificados da segunda a quinta posição, sendo que o custo com a perda material foi a variável predominante de influência de resultado da classificação destes CQs.

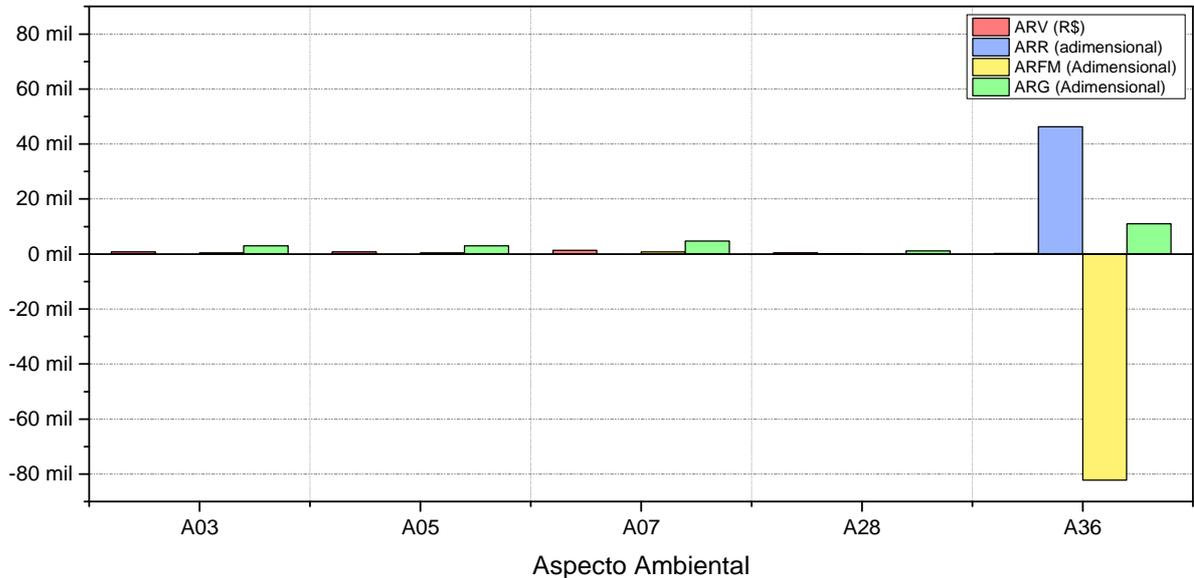


FIGURA 36 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais obtidos para as variáveis ARV (análise de resíduo por valor), ARR (análise de resíduo por risco), ARFM (análise de resíduo por facilidade de minimização) e ARG (análise de resíduo global) para Indústria B através da aplicação do Modelo de Cercal.  
 Fonte: O Autor (2015)

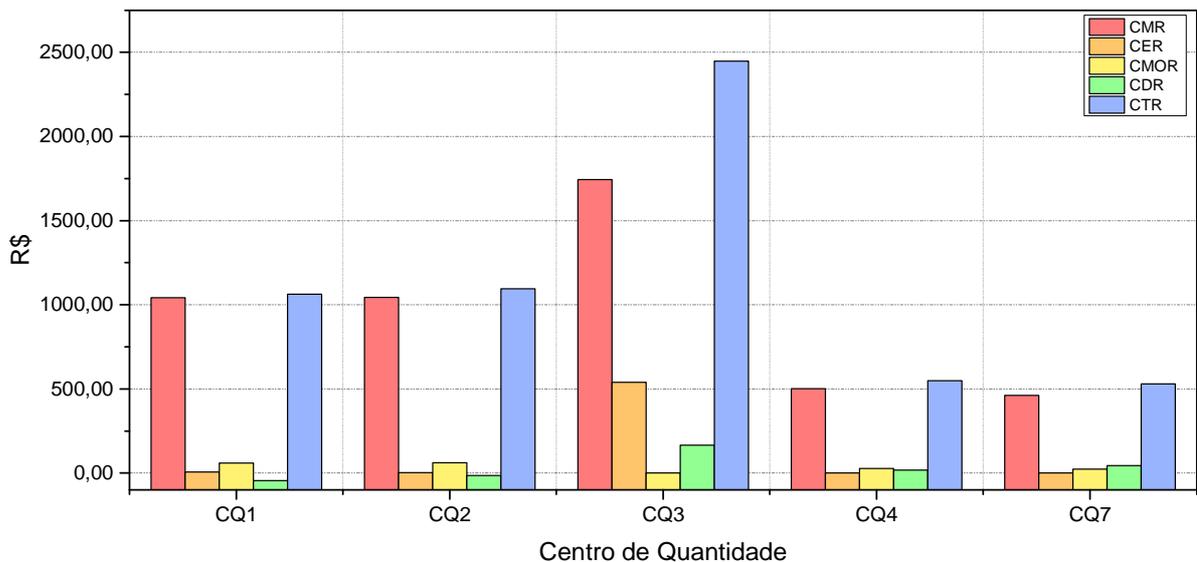


FIGURA 37 - Resultados de desempenho ambiental dos centros de quantidade obtidos para as variáveis CMR (custo de perda material no resíduo), CER (custo da energia no resíduo), CMOR (custo de mão de obra no resíduo), CDR (custo do destino do resíduo) e CT (custo total do resíduo) para Indústria B através da aplicação da ferramenta MFCA.  
 Fonte: O Autor (2015)

Como pôde ser verificado, assim como para o estudo de caso da Indústria A, cada uma das ferramentas apresentaram influências específicas para a organização da classificação dos aspectos ambientais e dos centros de quantidade em relação ao desempenho ambiental calculado para a Indústria B. Desta forma, foi realizada a análise das influências dos parâmetros e a análise de sensibilidade para comparação das respostas das ferramentas estudadas, apresentada no item 6.4.

### 6.3 ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA C – FABRICAÇÃO DE LUMINÁRIAS PLAFON

A terceira indústria foi a de fabricação de luminárias tipo Plafon, fornecendo seus produtos para diferentes lojas do ramo de construção em todo Estado do Paraná. A empresa está a 14 anos no mercado e localiza-se na cidade de São José dos Pinhais, Paraná, Brasil. As informações do processo produtivo da empresa, do levantamento de dados e dos resultados obtidos de desempenho ambiental pela aplicação das ferramentas analíticas são apresentadas nos itens 6.3.1 à 6.3.3. O período de coleta de dados para a Indústria C foi de maio a julho de 2015.

#### 6.3.1 O Processo Produtivo da Indústria C

A indústria C possui como produto principal a luminária tipo Plafon circular ou quadrada, conforme FIGURA 38. Os principais processos mapeados no processo produtivo estão relacionados a conformação e pintura do alumínio, matéria prima para a base e carcaça da luminária, e o jateamento do vidro. O fluxograma do processo da Indústria C segue FIGURA 39.



FIGURA 38 - Exemplo do produto fabricado pela Indústria C.  
Fonte: Irmãos Abage (2015)

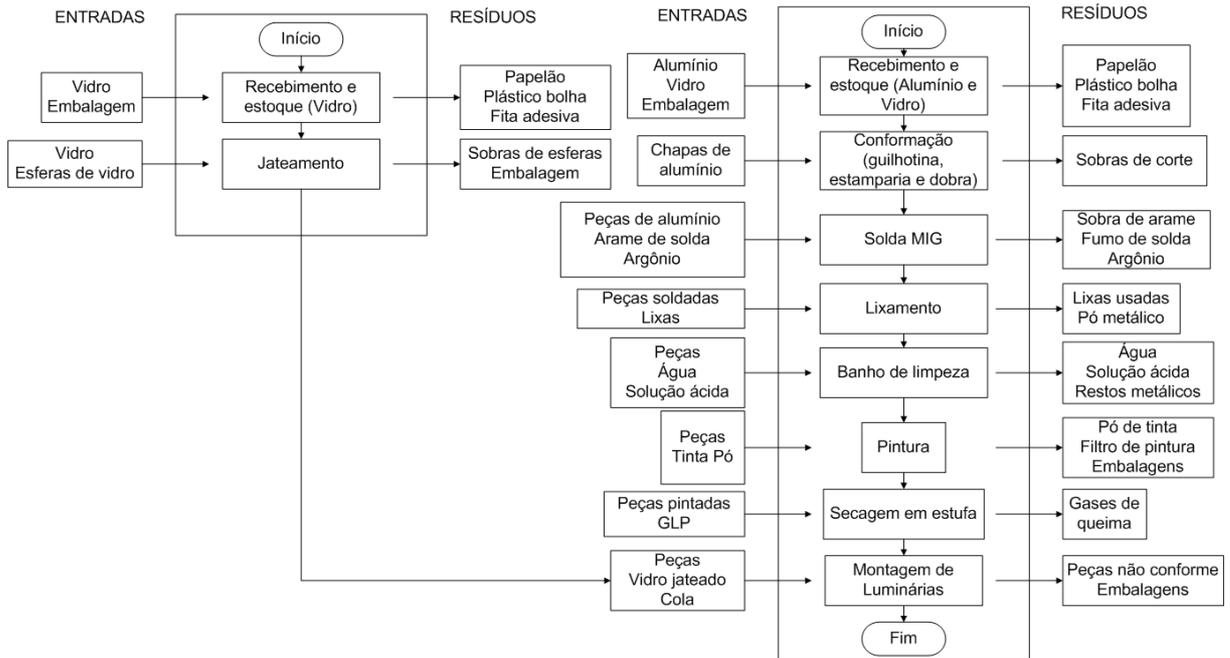


FIGURA 39 - Fluxograma do processo de produção das luminárias Plafon pela Indústria C.  
 FONTE: O Autor (2015)

A fabricação das luminárias se inicia com o recebimento das chapas de alumínio com dimensões de 2000 x 1000 x 10 mm e também dos vidros já moldados conforme encomenda. As chapas de alumínio seguem para a conformação metálica, composta por três processos, sendo o corte em guilhotina para produção de cortes menores de chapas, a estamparia para conformação da peça de acordo com o estabelecido em projeto e a dobra para obtenção de ângulos específicos de peça, obtendo-se ao final destes três processos a chamada peça base.

Na sequência, as peças base são enviadas para o setor de soldagem, onde ocorre o processo de solda MIG com arame de alumínio. A soldagem tem como função a união da carcaça da luminária com as partes do conjunto elétrico onde fica a lâmpada. Este conjunto elétrico, que é composto pelo soquete, base de alumínio e fiação elétrica já é comprado em formato acabado de fornecedores da empresa. Após a soldagem das partes metálicas, é realizado o lixamento mecanizado com disco de abrasão para acabamento de solda.

A etapa final do processo de fabricação da parte metálica da luminária está relacionada ao acabamento metálico com pintura. Para isso, as peças soldadas e lixadas são encaminhadas para um banho de ácido (fosfato) para retirada de impurezas da soldagem e lixamento, seguido de secagem da peça por gravidade apenas através de grampos que deixam as peças içadas, levando esta etapa do

processo até 2 horas. Com as peças já secas, é realizada a pintura em cabine de pintura através do processo de pintura eletrostática a pó, sendo que pós pintura as peças são encaminhadas para a cura em estufa alimentada por GLP.

No final as peças são inspecionadas e estocadas para a posterior montagem final do produto.

Em paralelo ao processamento metálico, os vidros recebidos são encaminhados para as cabines de jateamento com esferas de vidro para obtenção do vidro com efeito fosco. Após este tratamento do vidro, é realizado a sua inspeção para posterior envio a área de montagem.

O processo final de fabricação das luminárias ocorre na área de montagem, em que as partes metálicas são unidas ao vidro através de porcas, parafusos e cola sintética para acabamento e selamento.

### 6.3.2 Levantamento de dados da Indústria C

O processo de fabricação da Indústria C é composto por 1 máquina guilhotina, 1 máquina de estamparia metálica, 1 máquina de dobra, 2 máquinas de solda MIG, 2 máquinas lixadeiras, 1 tanque de banho de peças, 1 cabine de pintura eletrostática, 1 estufa de secagem e 1 cabine de jateamento. O número de total de funcionários na empresa são 14, sendo que na área de produção tem-se 2 funcionários operadores das máquinas guilhotina, estamparia e dobra, 2 funcionários para soldagem e lixamento, 1 funcionário para controle do banho e secagem de peças, 1 funcionário para a pintura, 1 funcionário para o jateamento do vidro e 2 funcionários para montagem de produtos. Além disso, a fábrica conta com uma equipe de 5 funcionários responsáveis pelas atividades administrativa e de serviços gerais da empresa. Os empregados da Indústria C trabalham das 8:00 às 18:00 horas, de segunda à sexta-feira com 2 horas de intervalo para almoço. Desta forma, foi elaborado o QUADRO 17 com as informações dos processos, aspectos ambientais, entradas de matérias prima e insumos e as saídas como produtos ou resíduos levantados para esta indústria, referente a produção do mês de julho de 2015.

Quadro 17

ID (n)	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Entradas	Saídas/Resíduos
A01	Recebimento e estoque	Recebimento e estocagem de chapas de alumínio, vidro e tinta	Chapas de alumínio, vidro e tinta	Papelão
A02	Recebimento e estoque	Consumo de MDF	Chapas de alumínio, vidro e tinta	Plástico bolha
A03	Recebimento e estoque	Geração de pedaços de MDF da esquadrijadeira	Chapas de alumínio, vidro e tinta	Fita adesiva
A04	Corte de chapas de alumínio (guilhotina, serra e furadeira)	Consumo de chapas de alumínio	Chapas de alumínio	Peças cortadas
A05	Corte de chapas de alumínio (guilhotina, serra e furadeira)	Geração de sobras de corte	Sobras de chapas	Sobras de chapa
A06	Estamparia	Consumo de peças cortadas	Peças cortadas de alumínio	Peças estampadas
A07	Estamparia	Geração de sobras de corte	Sobras de peças de alumínio	Sobras de peças estampadas
A08	Dobra	Consumo de peças estampadas	Peças estampadas	Peças conformadas
A09	Solda MIG	Consumo de produto conformado e arame de solda	Peças, arame de solda, gás de solda	Peça soldada
A10	Solda MIG	Geração de sobra de arame de solda	Peças, arame de solda, gás de solda	Sobra de arame de solda fundido
A11	Solda MIG	Geração de gases de solda	Peças, arame de solda, gás de solda	Gás Ar
A12	Solda MIG	Geração de fumo de solda	Peças, arame de solda, gás de solda	Fumo de solda
A13	Lixamento de peças	Consumo de peças soldadas	Peças soldadas e lixa	Peças lixadas
A14	Lixamento de peças	Geração de sobras de lixamento	Peças soldadas e lixa	Lixa usada
A15	Lixamento de peças	Geração de sobras de lixamento	Peças soldadas e lixa	Pó metálico
A16	Lavagem de peças	Consumo de peças lixadas	Peças lixadas e solução de banho	Peças limpas
A17	Lavagem de peças	Geração de solução de banho	Peças lixadas e solução de banho	Solução de banho usada
A18	Lavagem de peças	Geração de embalagens de solução	Peças lixadas e solução de banho	Embalagens de limpador
A19	Secagem de peças lavadas	Geração de solução de banho pela secagem de peças	Peças limpas e solução de banho	Solução de banho de peça limpa
A20	Pintura de peças metálicas	Consumo de peças limpas e tinta pó	Peças limpas e tinta pó	Peças pintadas
A21	Pintura de peças metálicas	Geração de embalagens de tinta pó	Peças limpas e tinta pó	Embalagem de tinta pó
A22	Pintura de peças metálicas	Geração de filtros de pintura	Peças limpas e tinta pó	Filtro contaminado

Continuação do Quadro 17

A23	Pintura de peças metálicas	Geração de pó de tinta de varrição de cabine de pintura	Peças limpas e tinta pó	Pó de tinta de varrição
A24	Secagem de peças pintadas	Consumo de peças pintadas	Peças pintadas e GLP	Peças curadas
A25	Secagem de peças pintadas	Consumo de GLP	Peças pintadas e GLP	GLP gasto
A26	Secagem de peças pintadas	Geração de gases de queima	Peças pintadas e GLP	Gases de queima
A27	Secagem de peças pintadas	Geração de botijões de gases	Peças pintadas e GLP	Botijões de GLP
A28	Jateamento de vidro	Consumo de vidro e areia	Vidro e areia	Vidro jateado
A29	Jateamento de vidro	Consumo de areia	Vidro e areia	Resíduo de vidro e areia
A30	Jateamento de vidro	Geração de embalagem de areia	Vidro e areia	Embalagem de esfera de vidro
A31	Montagem de produto	Geração de embalagem de cola	Peças de alumínio e vidro, terminais elétricos e cola	Embalagem de cola
A32	Montagem de produto	Geração de sobras de cola	Peças de alumínio e vidro, terminais elétricos e cola	Sobras de cola
A33	Montagem de produto	Geração de peças não conformes	Peças de alumínio e vidro, terminais elétricos e cola	Peças não conformes
A34	Montagem de produto	Geração de embalagens de terminais elétricos	Peças de alumínio e vidro, terminais elétricos e cola	Embalagem de terminais elétricos
A35	Serviços gerais	Varrição	Vassouras	Resíduo de varrição
A36	Serviços gerais	Limpeza de áreas comuns	produtos de limpeza e água	Panos contaminados
A37	Serviços gerais	Limpeza de áreas comuns	produtos de limpeza e água	Embalagem de produtos de limpeza
A38	Serviços gerais	Limpeza de áreas comuns	produtos de limpeza e água	Efluente de limpeza
A39	Geral	Uso de sanitários	Água e papel	Efluente sanitário
A40	Geral	Uso de sanitários	Água e papel	Papel higiênico usado
A41	Geral	Consumo de água e café para beber	Copos, Água, Café	Copos plásticos usados
A42	Geral	Uso de lâmpadas	Lâmpadas novas	Lâmpadas usadas
A43	Geral	Uso de EPIs	EPIs novos	EPI
A44	Copa	Consumo de alimentos	Café, alimentos diversos	Resíduo orgânico
A45	Copa	Consumo de alimentos	Café, alimentos diversos	Plástico de embalagens
A46	Escritório	Impressão de papéis	Papel, tinta	Papel
A47	Escritório	Impressão de papéis	Papel, tinta	Cartucho impressora
A48	Escritório	Impressão de papéis	Papel, tinta	Plástico de embalagens
A49	Escritório	Uso de Computadores	Computadores	Uso de computador

QUADRO 17 - Levantamento de processos, Aspectos Ambientais, entradas e saída / resíduos da Indústria C.

Fonte: O Autor (2015)

Para o cálculo dos Custos de Perda Material (CPM) foram levantados os dados das quantidades de matérias prima e insumos utilizados em cada aspecto ambiental, as quantidades de saída de produtos ou resíduos, os tipos de materiais e as quantidades individuais deles nestas saídas e o custo unitário de cada material. Estas informações levantadas seguem TABELA 18.

TABELA 18 - Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização do cálculo dos custos de perda material (CPM) para a Indústria C.

ID(n)	Un	Quantidade MP/insumos	Quantidade de Saída/Resíduos	Materiais nas Saídas/ Resíduos	Quantidade Material	Custo Material (R\$/Un)
A01	kg	1600,0	35,0	Papelão	35,0	0,00
A02	kg	1600,0	10,0	Plástico	10,0	0,00
A03	kg	1600,0	5,0	Fita adesiva	5,0	0,00
A04	kg	150,0	125,0	Peças	125,0	0,00
A05	kg	150,0	25,0	Sobra chapa	25,0	10,80
A06	kg	125,0	115,0	Peça cortada	115,0	0,00
A07	kg	125,0	10,0	Sobra peça estampada	10,0	10,80
A08	kg	115,0	115,0	Peça conformada	115,0	0,00
A09	kg	125,0	124,5	Peça conformada	115,0	0,00
				Arame	9,5	83,56
A10	kg	125,0	0,5	Arame de solda	0,5	83,56
A11	kg	125,0	0,0	Gás Ar	0,04	112,00
A12	kg	125,0	1,1	Fumo	1,1	83,56
A13	kg	127,4	117,8	Peça	117,8	0,00
A14	kg	127,4	2,9	Lixa	2,9	75,00
A15	kg	127,4	6,7	Pó metálico	6,7	10,80
A16	kg	2137,8	117,8	Peças limpas	117,8	0,00
A17	kg	2137,8	1969,5	Água	1950,0	0,006
				Limpador	19,5	16,30
A18	kg	2137,8	1,2	Embalagem	1,2	0,00
A19	kg	168,3	50,5	Água	50,0	0,006
				Limpador	0,5	16,30
A20	kg	167,8	156,3	Peça	117,8	0,00
				Tinta	38,5	0,00
A21	kg	167,8	2,8	Embalagem	2,8	0,00
A22	kg	167,8	6,1	Filtro	0,1	155,00
				Tinta	6,0	25,00
A23	kg	167,8	5,5	Pó tinta	5,5	25,00
A24	kg	162,8	156,3	Peças curadas	156,3	0,00
A25	kg	162,8	6,5	GLP	6,5	3,24
A26	kg	162,8	6,5	Gases	6,5	0,00
A27	kg	162,8	6,7	Botijão	6,7	0,00
A28	kg	1365,0	1350,0	Vidro	1320,0	3,76
				Esfera de vidro	30,0	7,90
A29	kg	1365,0	15,0	Vidro e esfera	15,0	7,90
A30	kg	1365,0	0,6	Embalagem	0,6	0,00
A31	kg	1506,3	0,5	Embalagem	0,5	0,00
A32	kg	1506,3	1,1	Cola	1,1	114,90
A33	kg	1506,3	90,0	Peças não conformes	90,0	4,54
A34	kg	1506,3	2,0	Embalagem	2,0	0,00
A35	kg	0,0	30,0	Resíduo varrição	30,0	0,00

Continuação da Tabela 18

A36	kg	657,5	2,5	Panos contaminados	2,5	2,30
A37	kg	657,5	1,2	Embalagem	1,2	0,00
A38	kg	657,5	655,0	Água Produto de limpeza	600,0 55,0	0,006 1,40
A39	kg	9532,2	9504,0	Água	9504,0	0,006
A40	kg	9532,2	28,2	Papel usado	28,2	9,90
A41	kg	352,4	0,4	Copos sujos	0,4	10,10
A42	kg	6,0	5,0	Lâmpada	5,0	0,00
A43	kg	1,0	1,0	EPI	1,0	21,20
A44	kg	0,0	95,6	Resíduo Orgânico	95,6	0,00
A45	kg	0,0	22,5	Plástico	22,5	0,00
A46	kg	4,2	4,2	Papel usado	4,2	5,65
A47	kg	4,2	0,2	Cartucho	0,2	0,00
A48	kg	4,2	0,0	Plástico	0,0	0,00
A49	Un	3,0	3,0	Computador	0,0	0,00

Fonte: O Autor (2015)

Também foram levantados os dados de energia gasta por equipamento e custo unitário da energia para o cálculo dos Custos de Energia Consumida (CEC), e a quantidade de resíduos para gerenciamento, os tipos de destino realizadas para cada um deles e o custo unitário do destino do resíduos para o cálculo dos Custos de Destino Material (CDM). Estes dados levantados são apresentados na TABELA 19.

Em relação aos valores dos Custos de Gestão Localizada (CGL) e os Custos de Pesquisa e Desenvolvimento (CPD), assim como no caso da Indústria B, não foram gastos realizados pela empresa no último ano visando a melhoria ambiental. Desta forma, o cálculo destas variáveis não foi considerado na análise pela EPIP.

Após do levantamento dos dados de quantidades materiais, de energia e de custos, foi realizada a análise dos impactos ambientais para cada aspecto em relação as 17 categorias de impacto presentes na AICV conforme a ferramenta EPIP. Os resultados da classificação dos aspectos ambientais para as categorias de impacto Resíduos Gerados (RG), Uso de Água (UA), Energia Não Renovável (ENR), Toxicidade Humana (TH) e Respiração de compostos Inorgânicos (RIn) são apresentados no QUADRO 18. As categorias de impacto de Respiração de compostos Orgânicos (ROr), Depleção da camada de Ozônio (DO), Radiação Ionizante (RI), Ecotoxicidade (Eco), Acidificação (Aci), Eutrofização (Eut), Solo Ocupado (SO), Solo Transformado (ST), uso de Minerais (Mi), uso de Combustíveis fósseis (Com) e Energia Renovável (ER) não foram apresentadas no QUADRO 18 por não terem apresentado compostos ou energias aplicados aos aspectos ambientais levantados.

TABELA 19 - Dados de entrada da ferramenta EPIP para realização dos cálculos dos Custos de Energia Consumida (CEC) e dos Custos de Destino Material (CDM) para a Indústria C. (NA = Não aplicado por não ser resíduo, por ser material lançado sem tratamento e sem exigência para tratamento ou por ser devolvido pelo fornecedor como embalagem vazia).

ID (n)	CEC			CDM			Custo de Destino (R\$/Un)
	EG (kW.h)	CE (R\$/kW.h)	PE (%)	Un	Quantidade de Resíduo	Tipo de destino (d)	
A01	0,0	0,76	0,02	kg	35,0	5	0,000
A02	0,0	0,76	0,01	kg	10,0	5	0,000
A03	0,0	0,76	0,00	kg	5,0	5	0,000
A04	10,0	0,76	0,83	kg	125,0	NA	0,000
A05	10,0	0,76	0,17	kg	25,0	5	-3,500
A06	35,0	0,76	0,92	kg	115,0	NA	0,000
A07	35,0	0,76	0,08	kg	10,0	5	-3,500
A08	5,0	0,76	1,00	kg	115,0	NA	0,000
A09	100,0	0,76	0,99	kg	124,5	NA	0,000
A10	100,0	0,76	0,00	kg	0,5	5	-3,500
A11	100,0	0,76	0,00	kg	0,04	NA	0,000
A12	100,0	0,76	0,01	kg	1,1	9	2,100
A13	100,0	0,76	0,92	kg	117,8	NA	0,000
A14	30,8	0,76	0,02	kg	2,9	9	0,900
A15	30,8	0,76	0,05	kg	6,7	5	-3,500
A16	0,0	0,76	0,05	kg	117,8	NA	0,000
A17	0,0	0,76	0,92	kg	1969,5	10	0,004
A18	0,0	0,76	0,00	kg	1,2	9	2,100
A19	0,0	0,76	0,30	kg	50,5	10	0,004
A20	20,0	0,76	0,93	kg	156,3	NA	0,000
A21	20,0	0,76	0,02	kg	2,8	9	2,100
A22	20,0	0,76	0,04	kg	6,1	9	2,100
A23	20,0	0,76	0,03	kg	5,5	9	2,100
A24	200,0	0,76	0,96	kg	156,3	NA	0,000
A25	200,0	0,76	0,04	kg	6,5	NA	0,000
A26	200,0	0,76	0,04	kg	6,5	NA	0,000
A27	200,0	0,76	0,04	kg	6,7	4	0,000
A28	22,0	0,76	0,99	kg	1350,0	NA	0,000
A29	22,0	0,76	0,01	kg	15,0	9	2,100
A30	22,0	0,76	0,00	kg	0,6	9	2,100
A31	0,0	0,76	0,00	kg	0,5	9	2,100
A32	0,0	0,76	0,00	kg	1,1	9	2,100
A33	0,0	0,76	0,06	kg	90,0	5	0,000
A34	0,0	0,76	0,00	kg	0,5	9	0,900
A35	0,0	0,76	0,00	kg	30,0	9	0,900
A36	0,0	0,76	0,00	kg	2,5	9	2,100
A37	0,0	0,76	0,00	kg	1,2	9	2,100
A38	0,0	0,76	1,00	kg	655,0	8	0,004
A39	0,0	0,76	1,00	kg	9504,0	8	0,004
A40	0,0	0,76	0,00	kg	28,2	9	0,900
A41	0,0	0,76	0,00	kg	0,4	9	0,900
A42	0,0	0,76	0,83	kg	5,0	8	12,500
A43	0,0	0,76	1,00	kg	1,0	9	2,100
A44	0,0	0,76	0,00	kg	95,6	9	0,900
A45	0,0	0,76	0,00	kg	22,5	9	0,900
A46	18,0	0,76	1,00	kg	4,2	9	0,900
A47	18,0	0,76	0,06	kg	0,2	9	2,100
A48	18,0	0,76	0,01	kg	0,0	9	0,900
A49	60,0	0,76	1,00	Unidade	3,0	10	0,000

Fonte: O Autor (2015)

ID (n)	RG*	UA*	ENR*	TH*	RIn*
A01	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A02	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A03	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A04	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A05	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A06	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A07	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A08	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A09	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A10	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A11	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A12	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	Alumínio	Partículas PM <sub>2,5</sub>
A13	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A14	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A15	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total
A16	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A17	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A18	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A19	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A20	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A21	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A22	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A23	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	Particulado total
A24	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A25	NA	NA	Energia Não renovável	NA	NA
A26	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A27	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A28	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A29	Resíduo Não Perigoso	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A30	Resíduo Não Perigoso	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A31	Resíduo Perigoso	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A32	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A33	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A34	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A35	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A36	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A37	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A38	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A39	NA	Água usada	Energia elétrica, BR	NA	NA
A40	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A41	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A42	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A43	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A44	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A45	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A46	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A47	Resíduo Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A48	Resíduo Não Perigoso	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA
A49	NA	NA	Energia elétrica, BR	NA	NA

QUADRO 18 - Dados de entrada selecionadas para categoria de impacto da AICV em relação a cada aspecto ambiental *n*. \* RG (Resíduo Gerado); UA (Uso de Água); ENR (Energia Não Renovável); TH (Toxicidade Humana); RIn (Respiração de compostos inorgânicos). NA = Não aplicável

Fonte: O Autor (2015)

TABELA 20 - Dados de entrada da MFCA para a indústria C.

CQ	Material	Entrada (kg)	Saída/ Produto (kg)	Saída/ Resíduo (kg)	Custo (R\$/kg)	Custo de destino (R\$/kg)	Energia (kW.h)	Mão-de-obra	
CQ 1	Chapas	150	125	25	10,80	-3,50	10	Nº	2
								Tempo (h)	40
								Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 2	Chapas	125	115	0	10,80	0	35	Nº	2
	Sobra Alumínio	0	0	10	10,80	-3,50		Tempo (h)	120
								Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 3	Peças	115	115	0	10,80	0	5	Nº	2
								Tempo (h)	20
								Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 4	Peça	115	115	0	10,80	0	100	Nº	2
	Arame	10	9,5	0,5	83,56	-3,50		Tempo (h)	100
	Argônio	0,04	0	0,04	112,00	0		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	16,60
	Fumo	0	0	1,1	83,56	2,10			
CQ 5	Peça soldada	124,5	117,8	0	16,35	0	30,8	Nº	2
	Lixa	2,88	0	2,88	75,00	0,90		Tempo (h)	80
	Pó	0	0	6,7	16,35	-3,50		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	16,60
CQ 6	Peça lixada	117,8	117,8	0	16,35	0	0	Nº	1
	Água	2000	0	2000	0,00542	0,00432		Tempo (h)	180
	Limpador	20	0	20	16,30	0,00432		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 7	Peça	117,8	117,8	0	16,35	0	20	Nº	1
	Tinta	50	38,5	11,5	25,00	2,10		Tempo (h)	120
	Filtro	0,1	0	0,1	155,00	2,10		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 8	Peça	156,3	156,3	0	18,48	0	200	Nº	1
	GLP	6,5	0	0	3,24	0		Tempo (h)	60
	Gases	0	0	6,5	3,24	0		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 9	Vidro	1320	1320	0	3,76	0	22	Nº	1
	Esferas de vidro	45	30	15	7,90	2,10		Tempo (h)	180
	Embalagem	2,1	0	2,1	0	2,10		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12
CQ 10	Peça	1506,3	1416,3	90	4,54	0	0	Nº	2
	Cola	3	1,9	1,1	114,90	2,1		Tempo (h)	180
	Embalagem	0,5	0	0,5	0	2,1		Custo (R\$.h <sup>-1</sup> )	11,12

Fonte: O Autor (2015)

Por fim, os dados levantados anteriormente para a Indústria C foram adaptados para utilização no modelo de Cercal e na MFCA. Para a utilização na MFCA os dados organizados na forma de CQs seguem TABELA 20.

<b>ID (n)</b>	<b>Severidade</b>	<b>Ocorrência</b>	<b>Detecção</b>	<b>Abrangência</b>
A01	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A02	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A03	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A04	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A05	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A06	Difícil	Global	Irreversível	Frequente
A07	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A08	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A09	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A10	Média	Global	Reversível	Frequente
A11	Reversível	Frequente	Média	Global
A12	Fácil	Local	Reversível	Frequente
A13	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A14	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A15	Desprezível	Frequente	Média	Local
A16	Difícil	Global	Desprezível	Frequente
A17	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A18	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A19	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A20	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A21	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A22	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A23	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A24	Média	Global	Reversível	Frequente
A25	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A26	Fácil	Global	Reversível	Frequente
A27	Reversível	Frequente	Fácil	Global
A28	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A29	Desprezível	Frequente	Fácil	Global
A30	Fácil	Global	Desprezível	Frequente
A31	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A32	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A33	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A34	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A35	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A36	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A37	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A38	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A39	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A40	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A41	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A42	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A43	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A44	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A45	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A46	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A47	Desprezível	Frequente	Fácil	Local
A48	Fácil	Local	Desprezível	Frequente
A49	Desprezível	Frequente	Fácil	Local

QUADRO 19 - Dados de entrada para o cálculo de risco através da ASAIA para a Indústria C.  
Fonte: O Autor (2015)

Para o cálculo dos resultados da AICV, foi definido como método de cálculo o próprio método apresentado na EPIP, conforme já na sua aplicação nas Indústrias A e B. Os cálculos dos resultados da ASAIA foram obtidos pela classificação de cada aspecto ambiental em relação ao seu nível de severidade, ocorrência, detecção e abrangência, sendo estes dados de classificação apresentados no QUADRO 19. Por fim, os dados necessários para os cálculos da Análise de Resíduo por Valor (ARV), da Análise de Resíduo por Risco (ARR), da Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização (ARFM) e da Análise Global de Resíduo (AGR) são apresentados na TABELA 21.

TABELA 21 - Dados de entrada para o cálculo do ARV (Análise de Resíduo por Valor), ARR (Análise de Resíduo por Risco), ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização) e AGR (Análise Global de Resíduo) através do modelo de Cercal para a Indústria C.

ID (n)	Análise de Resíduo por Valor	Análise de Resíduo por Risco		Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização	
	Índice de Priorização Hierárquica de Minimização de Resíduos ( $\xi_b$ )	Risco a Saúde Humana	Classe do Resíduo (Periculosidade)	Facilidade de Minimização ( $F_i$ )	Custo da Minimização ( $CM_i$ )
A01	-0,20	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar processo?	Alto
A02	-0,20	Isento	N Perigoso Inerte	Modificar processo?	Muito alto
A03	-0,20	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A04	NA	NA	NA	NA	NA
A05	-0,20	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Muito alto
A06	NA	NA	NA	NA	NA
A07	-0,20	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Baixo
A08	NA	NA	NA	NA	NA
A09	NA	NA	NA	NA	NA
A10	-0,20	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Alto
A11	-0,60	Isento	N Perigoso Inerte	Modificar equipamento?	Alto
A12	-0,60	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Baixo
A13	NA	NA	NA	NA	NA
A14	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A15	-0,20	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Alto
A16	NA	NA	NA	NA	NA
A17	-0,40	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A18	-0,60	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A19	-0,40	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A20	NA	NA	NA	NA	NA

Continuação da Tabela 21

A21	-0,60	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A22	-0,60	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Muito alto
A23	-0,60	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Alto
A24	NA	NA	NA	NA	NA
A25	-0,60	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Alto
A26	-0,60	Potencial	Perigoso	Modificar equipamento?	Baixo
A27	0,82	Isento	N Perigoso N Inerte	Modificar equipamento?	Baixo
A28	NA	NA	NA	NA	NA
A29	-0,60	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Muito alto
A30	-0,60	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A31	-0,20	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A32	-0,60	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A33	-0,20	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A34	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A35	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A36	-0,60	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A37	-0,60	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A38	-0,40	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A39	-0,40	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Muito alto
A40	-0,60	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Alto
A41	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A42	-0,60	Potencial	Perigoso	Tecnologia disponível?	Baixo
A43	-0,60	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A44	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A45	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A46	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A47	0,82	Potencial	Perigoso	Mão de obra disponível?	Baixo
A48	-0,60	Isento	N Perigoso N Inerte	Mão de obra disponível?	Baixo
A49	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: O Autor (2015)

### 6.3.3 Resultados da Indústria C para as ferramentas EPIP, MFCA, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal

Pelo levantamento realizado para a Indústria C, foi possível identificar um total de 49 aspectos ambientais, os quais foram analisados em relação ao resultado de desempenho ambiental através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA e Modelo de Cercal. Pela adaptação dos dados dos aspectos ambientais, foram construídos 10 centros de quantidade para aplicação na MFCA. Os resultados obtidos para cada uma destas 5 ferramentas são apresentados na FIGURA 40.

Dado que os cinco primeiros aspectos ambientais classificados em cada ferramenta, e também os cinco primeiros centros de quantidade para a MFCA, corresponderam ao menos a 44 % do desempenho ambiental total calculado para o processo da Indústria C, estes aspectos ambientais foram organizados no QUADRO 20, com a finalidade de comparação dos resultados entre as ferramentas.

<b>Posição</b>	<b>EPIP</b>	<b>AICV</b>	<b>ASAIA</b>	<b>Cercal</b>	<b>MFCA</b>
1	A23	A15	A12	A39	CQ 10
2	A12	A23	A26	A17	CQ 05
3	A15	A12	A39	A33	CQ 06
4	A22	A22	A17	A05	CQ 07
5	A33	A42	A38	A40	CQ 04

QUADRO 20 - Resultado da classificação dos aspectos ambientais obtido através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, Modelo de Cercal e MFCA para a Indústria C.

Fonte: O Autor (2015)

Para melhor entender as respostas de classificação apresentadas na QUADRO 20 para as cinco ferramentas, foram elaborados gráficos para possibilitar a análise da diferenciação da classificação e os motivos desta diferenciação entre as ferramentas. Em relação a ferramenta EPIP, foram elaboradas a FIGURA 41 com os resultados de cada aspecto ambiental em relação aos custos por classes separadas, e FIGURA 42, com os resultados da aplicação da AICV com a ferramenta EPIP.

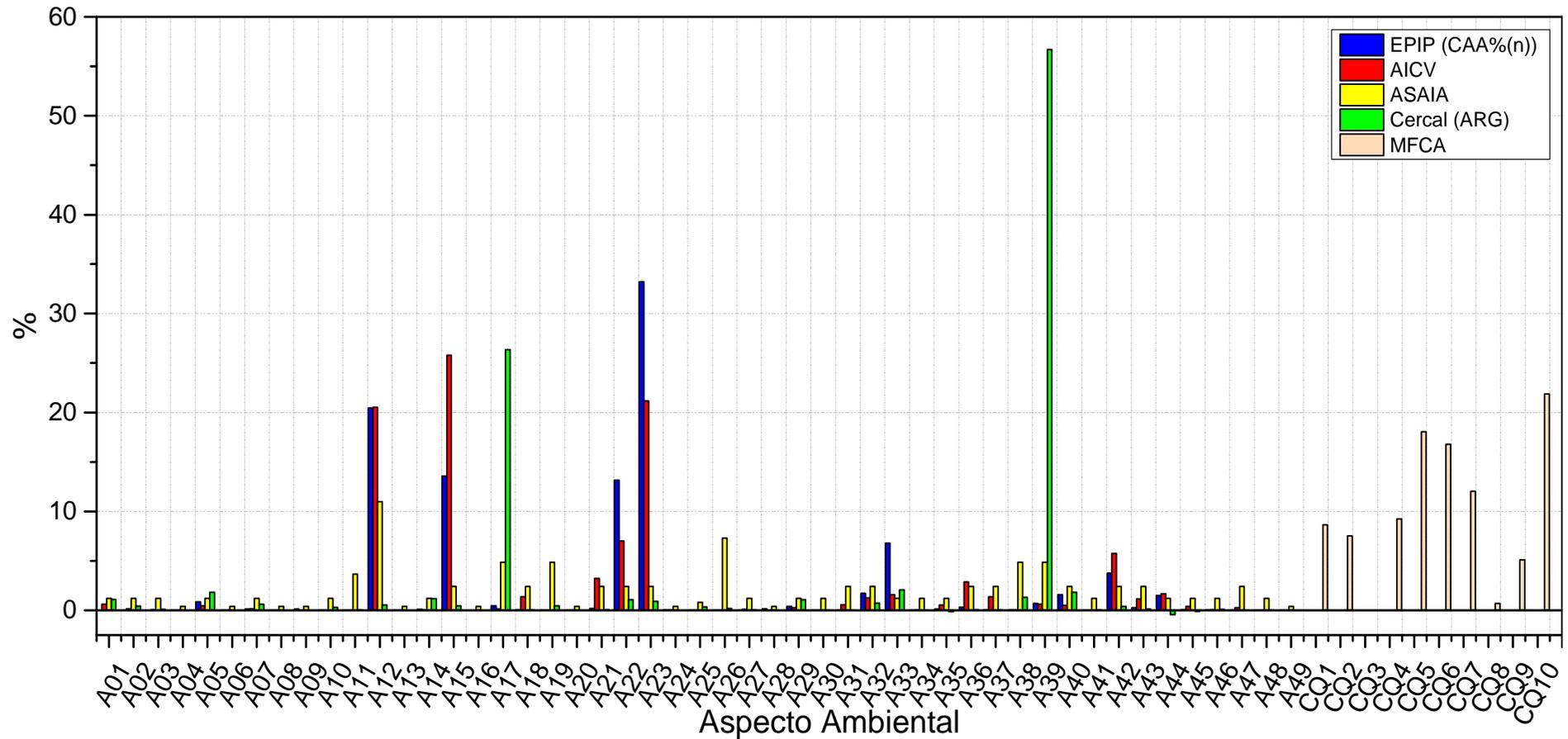


FIGURA 40 - Resultados do desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria C através da aplicação das ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, modelo de Cercal e do desempenho ambiental dos centros de quantidade para a MFCA.  
 Fonte: O Autor (2015)

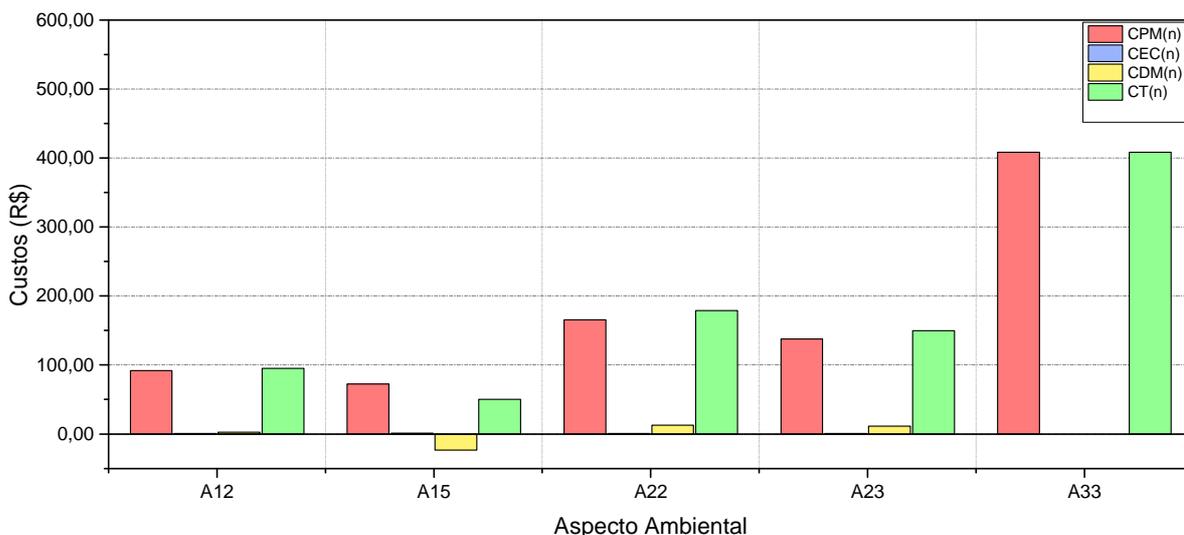


FIGURA 41 - Resultados obtidos dos Custo de Perda Material (CPM), Custo de Energia Consumida (CEC) e Custo de Destino Material (CDM) para cada aspecto ambiental através da EPIP aplicada a Indústria C.  
 Fonte: O Autor (2015)

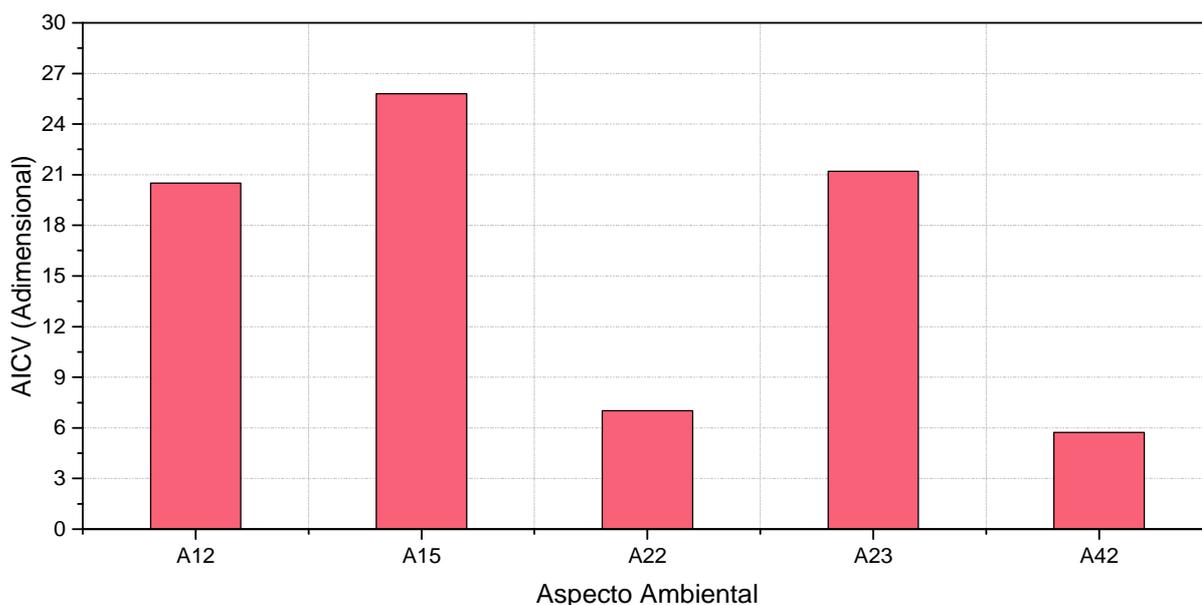


FIGURA 42 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria C através da aplicação da ferramenta AICV.  
 Fonte: O Autor (2015)

Pela análise dos custos e da AICV pela EPIP, foi verificado que os aspectos A23 (Geração de pó de tinta de varrição), A12 (Geração de fumo de solda), A15 (Geração de pó metálico de lixamento), classificados nas três primeiras posições, respectivamente, pela análise com a EPIP, tiveram como principais variáveis de influência para esta classificação os custos de perda material e principalmente os impactos ambientais potenciais a saúde humana e a qualidade de ecossistema pela

geração de resíduos perigosos. Estes três aspectos corresponderam a aproximadamente 67 % do total de desempenho ambiental calculado para o processo desta indústria. Já o aspecto A22 (geração de filtro contaminado de pintura) foi classificado na quarta posição da classificação devido a influência das variáveis de custo de perda material e também do impacto ambiental potencial devido à geração de resíduo perigoso. Por fim, o aspecto A33 (geração de peças não conformes) foi classificado na quinta posição da classificação de desempenho ambiental pois, apesar deste aspecto ter apresentado os maiores custos de perda material quando comparado com os outros quatro aspectos, a influência da variável de impacto ambiental potencial foi baixa, deslocando o resultado deste aspecto para a quinta posição.

Para o resultado da AICV, foi verificado que os três primeiros aspectos classificados foram o A15 (Geração de pó metálico de lixamento), A23 (Geração de pó de tinta de varrição) e A12 (Geração de fumo de solda), respectivamente, sendo que estes aspectos foram os mesmos obtidos no resultado da EPIP, porém com diferente ordenamento. A influência de materiais com potencial de danos a saúde humana e a geração de resíduos perigosos foram fatores predominantes para os maiores resultados de desempenho ambiental destes aspectos. O quarto aspecto na classificação obtida pela AICV foi o A22 (geração de filtro contaminado de pintura). Como para este aspecto foi verificado apenas o potencial de impacto por geração de resíduos perigosos, sem impactos relacionados aos danos a saúde, que corresponde a categoria de maior peso na AICV, sua posição na classificação acabou sendo posterior àqueles aspectos com danos potenciais a saúde humana. Por fim, o aspecto que obteve o quinto lugar na classificação pela AICV, o A42 (geração de lâmpadas usadas), não apareceu nas cinco primeiras posições das outras ferramentas utilizadas. Este resultado possivelmente ocorreu devido ao potencial de periculosidade deste resíduo para impactos ambientais.

Os resultados pela ferramenta ASAIA foram apresentados na FIGURA 43 em relação a sua significância. Foi percebido que os aspectos ambientais com maior significância foram aqueles classificados com a maior severidade. Desta forma, o aspecto A12 (Geração de fumo de solda) foi o de maior significância para a busca de melhorias ambientais. O aspecto A26 (Geração de gases de queima) obteve a segunda posição na classificação dos resultados da ASAIA pela dificuldade de detecção e pelo seu nível de abrangência. Por fim, os aspectos A39 (geração de

efluente sanitário), A17 (geração de solução de banho de peças) e A38 (geração de efluente de limpeza) obtiveram a terceira, quarta e quinta posições, respectivamente, devido a severidade do efluente e o seu nível de detecção.

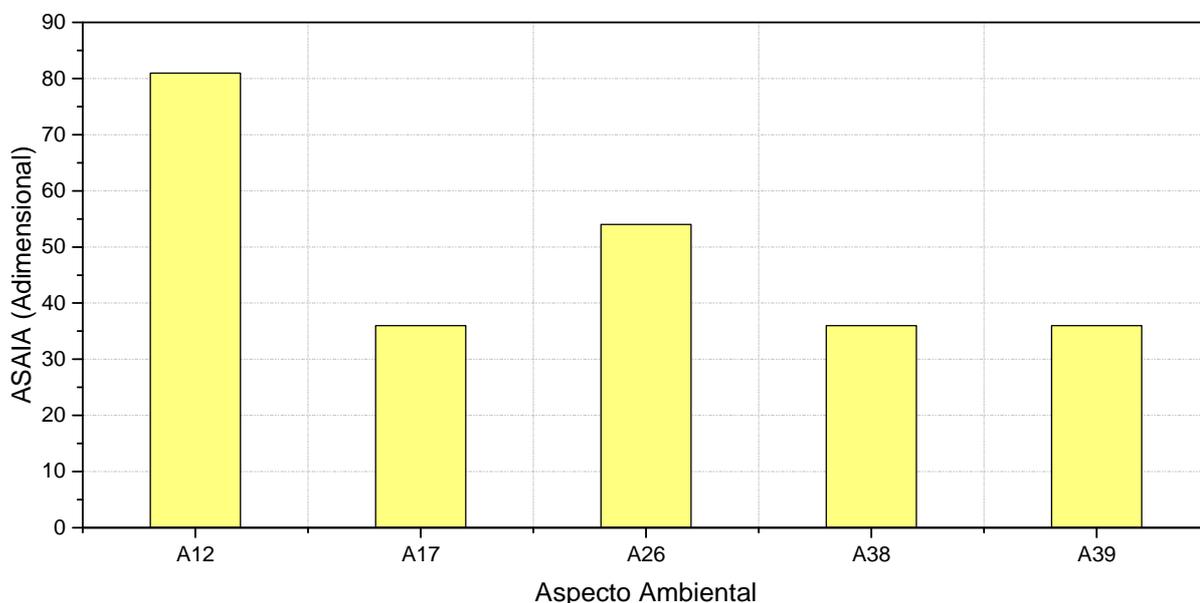


FIGURA 43 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais levantados para Indústria C através da aplicação da ferramenta ASAIA.  
Fonte: O Autor (2015)

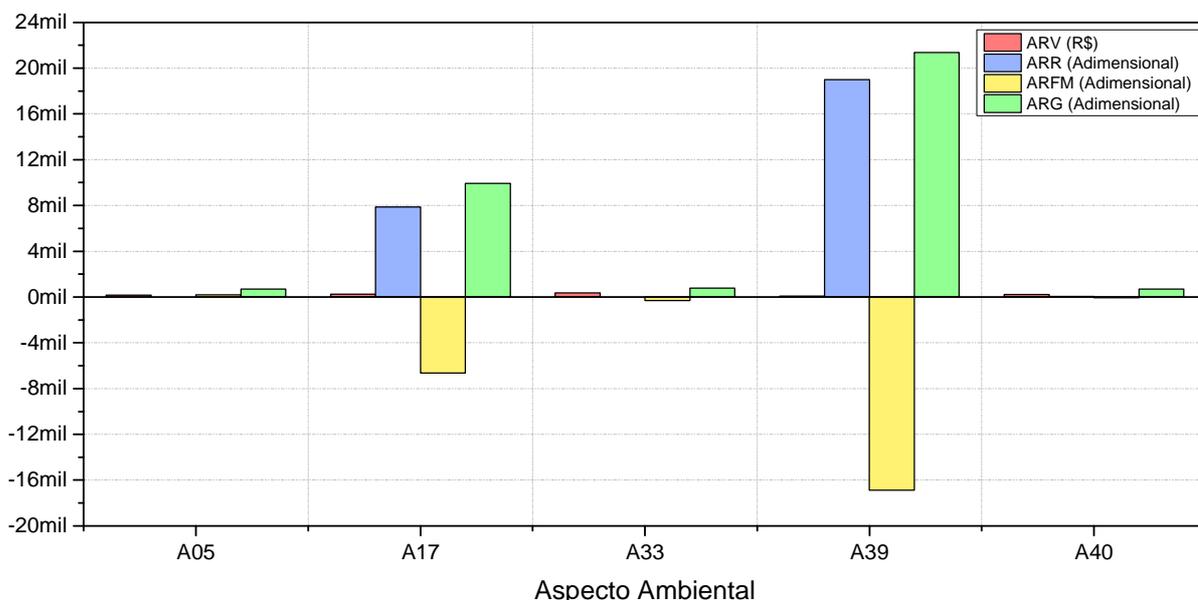


FIGURA 44 - Resultados de desempenho ambiental dos aspectos ambientais obtidos para as variáveis ARV (análise de resíduo por valor), ARR (análise de resíduo por risco), ARFM (análise de resíduo por facilidade de minimização) e ARG (análise de resíduo global) para Indústria C através da aplicação do Modelo de Cercal.  
Fonte: O Autor (2015)

Os resultados obtidos com o modelo de Cercal mostraram como os aspectos de maiores valores do desempenho ambiental, ou seja, os classificados nas cinco primeiras posições, o A39 (efluente sanitário), o A17 (geração de solução de banho de peças), o A33 (geração de peças não conformes), o A05 (geração de sobras de chapas) e o A40 (geração de resíduos de sanitário), respectivamente. Os dois primeiros aspectos classificados foram influenciados positivamente pelo risco deles e negativamente pela facilidade de minimização, considerando que seria fácil a busca desta minimização. Já os outros três aspectos foram influenciados tanto pelos custos perda de material (ARV) como pelos valores obtidas da ARFM. Apesar disso, como realizado nos resultados da EPIP, foi considerado que o aspecto A17 foi classificado como o prioritário para a busca de melhorias, ou seja, o de pior desempenho ambiental, dado que este aspecto corresponde a geração de efluente industrial que é enviado diretamente para a rede de esgoto, sendo uma ação irregular.

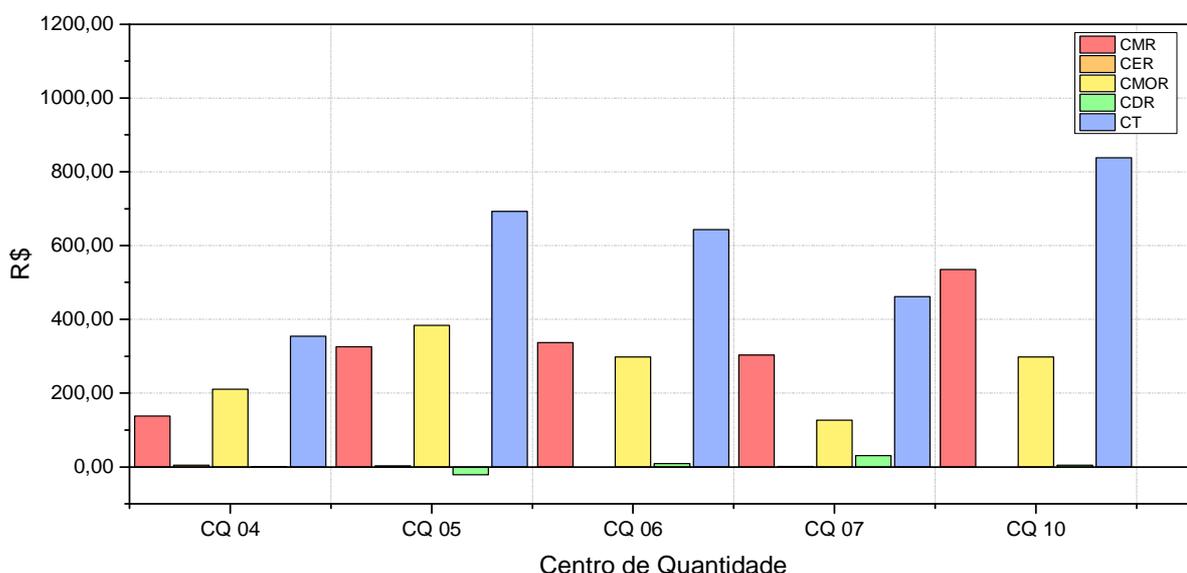


FIGURA 45 - Resultados de desempenho ambiental dos centros de quantidade obtidos para as variáveis CMR (custo de perda material no resíduo), CER (custo da energia no resíduo), CMOR (custo de mão de obra no resíduo), CDR (custo do destino do resíduo) e CT (custo total do resíduo) para Indústria C através da aplicação da ferramenta MFCA.  
Fonte: O Autor (2015)

Por fim, os resultados dos CQs pela MFCA em relação aos custos de perda de materiais, custos de energia, custos de sistema e custos de gestão dos resíduos foram organizados na FIGURA 45. Estes resultados mostraram que a classificação dos centros de quantidade foi obtido principalmente pela influência dos resultados

dos custos de perda de material no resíduo e do custo com a mão de obra nos processos.

Desta forma, o estudo de caso desta Indústria C, assim como nos outros dois estudos de caso, também mostrou para cada uma das ferramentas influências específicas que definiram a organização da classificação dos aspectos ambientais e dos centros de quantidade em relação ao desempenho ambiental calculado para esta Indústria. Assim, como já dito anteriormente, foi realizada a análise das influências dos parâmetros e a análise de sensibilidade para comparação das respostas das ferramentas estudadas, a qual é apresentada no item 5.4.

#### 6.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA EPIP EM RELAÇÃO AS FERRAMENTAS AICV, MFCA, ASAIA E MODELO DE CERCAL

As simulações realizadas com as ferramentas EPIP, AICV, ASAIA, modelo de Cercal e MFCA para os três estudos de casos mostraram diferenças nos resultados da classificação obtido para cada ferramenta, classificação esta que serve como elemento direcionador para auxiliar tomadores de decisão em relação a itens a serem melhorados em desempenho pela indústria, com o objetivo de tornar o processo industrial mais eficiente, com menor impacto ambiental. Segundo Carvalho *et al.* (2014) e Ahlroth *et al.* (2011), a adequada classificação de aspectos ambientais e seus consequentes impactos é importante no auxílio a tomada de decisão por possibilitar o foco de ação em itens considerados mais críticos, reduzindo o tempo e os gastos para obtenção da melhoria.

Desta forma, foram avaliadas as respostas da classificação obtidos pelas diferentes ferramentas para as três indústrias estudadas, bem como foi realizada a análise de sensibilidade para cada um destes casos de estudo. Para a Indústria A, foi elaborada a TABELA 22, com os valores quantificados do coeficiente de correlação de Spearman entre os parâmetros de entrada MAA (Massa do Aspecto Ambiental), CPM (Custo de Perda Material), CEC (Custo de Energia Consumida), CDM (Custo de Destino Material), CT (Custo Total, que é a soma dos três custos anteriores), e IA (Impacto Ambiental), e as quatro ferramentas EPIP, AICV, Modelo de Cercal e MFCA. Estes parâmetros de entrada selecionados correspondem as relações de custos e quantidades mássicas levantados para aplicação nas quatro ferramentas.

TABELA 22 - Resultado do Coeficiente de Correlação de Spearman obtido entre os parâmetros de entrada considerados essenciais para uma ADA robusta e as quatro ferramentas analisadas para a Indústria A. Nível de confiança  $\alpha \leq 0,05$ .

	EPIP	AICV	Cercal	MFCA
MAA	0,388 (V)	-0,047 (F)	0,233 (F)	0,657 (V)
CPM	0,236 (F)	-0,054 (F)	0,251 (F)	0,319 (V)
CEC	-0,224 (F)	-0,087 (F)	-0,154 (F)	0,117 (F)
CDM	0,162 (F)	0,188 (F)	-0,072 (F)	-0,098 (F)
CT	0,822 (V)	0,143 (F)	0,679 (V)	0,971 (V)
IA	0,603 (V)	1,000 (V)	0,193 (F)	0,143 (F)

MAA: Massa do Aspecto Ambiental; CPM: Custo de Perda Material; CEC: Custo de Energia Consumida; CDM: Custo de Destino Material; CT: Custo Total (Soma dos três custos anteriores); IA: Impacto ambiental; (V): Teste de hipótese Verdadeiro; (F): Teste de hipótese Falso.  
 Fonte: O Autor (2015)

Conforme os resultados apresentados nesta TABELA 22, foi verificado que a classificação obtida pela EPIP sofreu influência de três variáveis principais, sendo elas a MAA, o CT e o IA, sendo que o coeficiente de correlação de Spearman foi forte para estas duas últimas variáveis citadas.

Já para a ferramenta AICV, apenas a variável de Impacto Ambiental teve uma correlação forte e positiva, dado que esta variável é o próprio resultado desta ferramenta. Não era esperado uma correlação significativa entre os parâmetros de custos e a AICV, pois esta ferramenta não considera estes custos para a avaliação do desempenho ambiental. Apesar disso, a massa de aspecto ambiental, que é um parâmetro de entrada desta ferramenta, não apresentou correlação significativa, indicando que, para o caso desta Indústria A, os valores das categorias de impacto presentes nos aspectos ambientais se sobressaiu em relação a quantidade mássica.

Para o modelo de Cercal, praticamente houve influência única da variável de Custo Total, isto porque uma das principais variáveis deste modelo é o ARV (Análise de Resíduo por Valor). Apesar disso, quando se olha para os cinco primeiros aspectos ambientais classificados por esta ferramenta, a maior influência, conforme FIGURA 27, é da ARFM (Análise de Resíduo por Facilidade de Minimização).

A MFCA apresentou correlações verdadeiras para as variáveis MAA, CPM e CT, sendo que a única correlação forte obtida foi com a variável CT, que corresponde a soma de três dos quatro custos analisados por esta ferramenta.

Na sequência, para a Indústria B, foi elaborado a TABELA 23, com os valores quantificados do coeficiente de correlação de Spearman.

TABELA 23 - Resultado do Coeficiente de Correlação de Spearman obtido entre os parâmetros de entrada considerados essenciais para uma ADA robusta e as quatro ferramentas analisadas para a Indústria B. Nível de confiança  $\alpha \leq 0,05$ .

	EPIP	AICV	Cercal	MFCA
MAA	0,395 (V)	0,086 (F)	0,265 (V)	0,659 (V)
CPM	0,531 (V)	0,282 (F)	0,691 (V)	0,385 (V)
CEC	-0,504 (V)	-0,098 (F)	-0,082 (F)	-0,168 (F)
CDM	0,190 (F)	0,223 (F)	0,148 (F)	0,028 (F)
CT	0,708 (V)	0,180 (F)	0,505 (V)	0,950 (V)
IA	0,720 (V)	1,000 (V)	0,491 (V)	0,180 (F)

MAA: Massa do Aspecto Ambiental; CPM: Custo de Perda Material; CEC: Custo de Energia Consumida; CDM: Custo de Destino Material; CT: Custo Total (Soma dos três custos anteriores); IA: Impacto ambiental; (V): Teste de hipótese Verdadeiro; (F): Teste de hipótese Falso.  $p=0,05$   
 Fonte: O Autor (2015)

Os resultados apresentados nesta TABELA 23 mostraram que o desempenho ambiental quantificado pela EPIP para a Indústria B sofreu influência de cinco das seis variáveis analisadas, sendo elas a MAA, a CPM, a CEC, a CT e o IA. Apesar disso, assim como na Indústria A, as correlações fortes ocorreram apenas para os parâmetros CT e IA.

A ferramenta AICV, assim como na Indústria A, sofreu influência apenas do parâmetro de IA. Já o Modelo de Cercal apresentou as mesmas variáveis de influência em seu resultado que as apresentadas pela EPIP, sendo que a variável que apresentou o maior coeficiente de correlação de Spearman foi a CPM. Apesar disso, considerando os cinco primeiros aspectos ambientais classificados por este modelo, foi verificado que a ARFM manteve maior influência no resultado destes aspectos para a Indústria B, assim como na Indústria A, tendo também a influência a ARR no resultado destes cinco primeiros aspectos classificados.

Por fim, a MFCA apresentou correlações verdadeiras para as variáveis MAA, CPM e CT, assim como na análise da Indústria A, sendo que a única correlação forte obtida foi com a variável CT.

A última análise de parâmetros de influência foi realizada para a Indústria C, sendo que foi elaborada a TABELA 24, com os valores quantificados do coeficiente de correlação de Spearman.

TABELA 24 - Resultado do Coeficiente de Correlação de Spearman obtido entre os parâmetros de entrada considerados essenciais para uma ADA robusta e as quatro ferramentas analisadas para a Indústria C. Nível de confiança  $\alpha \leq 0,05$ .

	EPIP	AICV	Cercal	MFCA
MAA	0,089 (F)	-0,176 (F)	0,621 (V)	0,398 (V)
CPM	0,260 (V)	-0,294 (F)	0,140 (F)	0,491 (V)
CEC	-0,521 (V)	-0,056 (F)	-0,213 (F)	-0,109 (F)
CDM	0,372 (V)	0,427 (V)	-0,466 (F)	0,008 (F)
CT	0,787 (V)	0,254 (F)	0,523 (V)	0,551 (V)
IA	0,738 (V)	1,000 (V)	-0,056 (F)	0,254 (F)

MAA: Massa do Aspecto Ambiental; CPM: Custo de Perda Material; CEC: Custo de Energia Consumida; CDM: Custo de Destino Material; CT: Custo Total (Soma dos três custos anteriores); IA: Impacto ambiental; (V): Teste de hipótese Verdadeiro; (F): Teste de hipótese Falso.

Fonte: O Autor (2015)

Estes resultados mostraram que o desempenho ambiental quantificado pela EPIP para a Indústria C foi influenciado pelas variáveis CPM, CEC, CDM, CT e IA, sendo que as correlações fortes ocorreram apenas para os parâmetros CT e IA, como já verificado nas outras duas análises, das Indústrias A e B.

A ferramenta AICV, sofreu influência das variáveis de IA e de CDM. Apesar da correlação verdadeira apresentada pelo parâmetro CDM, possivelmente este comportamento foi ao acaso, dado que a AICV não analisa os custos.

O Modelo de Cercal apresentou influência em seu resultado apenas das variáveis MAA e CT, sendo que a maior correlação encontrada foi em relação a massa de aspecto ambiental.

Por fim, a MFCA apresentou correlações verdadeiras para as variáveis MAA, CPM e CT, assim como na análise da Indústria A, sendo que, neste terceiro caso, não houve nenhuma correlação forte obtida, possivelmente devido o custo de mão de obra ter contribuído mais para o resultado final, custo este que não foi introduzido

na análise de sensibilidade, pois não foi considerado como um critério que impacta no desempenho ambiental da indústria.

Vale observar aqui que não foi quantificado o coeficiente de correlação de Spearman para o ASAIA, dado que nenhum dos parâmetros de entrada considerados na Análise de Sensibilidade são utilizados por esta ferramenta.

Em uma análise geral do resultado da Análise de Sensibilidade através da utilização do coeficiente de correlação de Spearman para as quatro ferramentas, EPIP, AICV, Modelo de Cercal e MFCA, e para as três Indústrias, foi verificado que a EPIP apresentou influência de um maior número de parâmetro de entrada nos três casos estudados. Isto ocorreu, dado que EPIP possui um maior número de variáveis de análise, apresentando maior abrangência nos parâmetros de avaliação do desempenho ambiental em uma Indústria. Neste contexto, a EPIP mostrou mais robustez para avaliar o desempenho ambiental em relação as outras ferramentas comparadas, para os três estudos de caso analisados.

## CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO DA TESE

A construção e aplicação da EPIP envolveu uma análise em paralelo de outras ferramentas analíticas já existentes, sendo destacadas a AICV, a ASAIA, o modelo de Cercal e a MFCA. Através dos estudos de caso utilizados para implementação destas ferramentas analíticas, foi percebido que a EPIP apresenta respostas de desempenho ambiental mais aprofundada entre a análise econômica e a análise ambiental, avaliando de uma forma mais robusta este desempenho ambiental em relação aos aspectos ambientais do processo industrial em estudo. Desta forma, foi possível concluir que a EPIP conseguiu quantificar com maior sensibilidade o desempenho ambiental das indústrias estudadas, auxiliando a tomada de decisão pela indicação dos aspectos críticos em desempenho ambiental.

Apesar disso, foram também constatadas algumas limitações da EPIP, sendo aqui destacado a falta do cálculo das externalidades, o qual pode influenciar o resultado final da classificação do desempenho ambiental dos aspectos ambientais analisados. Neste contexto, como considerações finais, percebeu-se que este estudo abriu uma janela de pesquisa ainda a ser aperfeiçoada e aprofundada, cabendo estudos futuros com o interesse de obter melhorias da ferramenta EPIP proposta, afim de torná-la mais abrangente e robusta para avaliar o desempenho ambiental em relação ao objeto indústria.

Desta forma, foram aqui recomendadas as seguintes investigações como forma de aperfeiçoar a ferramenta EPIP e, até mesmo, buscar uma ferramenta com maior amplitude, não apenas focada na análise ambiental, mas também na análise dos pilares econômico e social da sustentabilidade:

- a) Aplicação da ferramenta EPIP em outros setores da indústria para verificar seu comportamento, afim de possibilitar melhor ajuste de parâmetros, tal como a ponderação dos fatores de caracterização de impactos ambientais.
- b) Aperfeiçoamento ou desenvolvimento de uma forma de mensuração dos custos de externalidades, com reduzida interferência de fatores subjetivos, afim de ser introduzido na variável CEx da ferramenta EPIP.
- c) Analisar e propor adaptações da ferramenta EPIP como forma de estendê-la a uma ferramenta de quantificação da sustentabilidade, envolvendo os pilares social, econômico e ambiental, da indústria.

- d) Analisar e propor adaptações da ferramenta EPIP afim de estendê-la para aplicação em relação ao ciclo de vida produtivo que envolve a indústria principal a ser estudada, como forma de obter uma ferramenta ampla de sustentabilidade na Cadeia de Suprimentos da indústria foco.

## REFERÊNCIAS

AHLROTH, S. The use of valuation and weighting sets in environmental impact assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, 85, 34-41, 2014.

AHLROTH, S.; FINNVEDEN, G. Ecovalue08 – a new valuation set for environmental systems analysis tools. **Journal of Cleaner Production**, 19, 1994-2003, 2011.

AHLROTH, S., NILSSON, M., FINNVEDEN, G., HJELM, O., HOCHSCHORNER, E. Weighting and valuation in selected environmental systems analysis tools – suggestions for further developments. **Journal of Cleaner Production**, 19, 145-156, 2011.

ALAZZANI, A.; WAN-HUSSIN, W.N. Global reporting initiatives environmental reporting: a study of oil and gas companies. **Ecological Indicators**, 32, 19-24, 2013.

ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Modelo de decisão multicritério para priorização de sistemas de informação com base no método Promethee. **Gestão & Produção**. v. 9, n. 2, p. 201-214, 2002.

ANGELAKOGLU, K., GAIDAJIS, G. A review of methods contributing to the assessment of the environmental sustainability of industrial systems. *Journal of Cleaner Production*, 1-23, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.001**: Sistema de Gestão Ambiental – requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14031**: Gestão Ambiental – Avaliação de Desempenho Ambiental – Diretrizes. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14051**: Gestão Ambiental – Contabilidade dos custos de fluxos de material – Estrutura Geral. Rio de Janeiro, 2013.

ATKINSON, G.; MOURATO, S. Environmental cost-benefit analysis. **Annual Review Environmental Resources**, 33, 317-344, 2008.

BEER, P.; FRIEND, F. Environmental accounting: a management tool for enhancing corporate environmental and economic performance. **Ecological Economics**, 58, 548-560, 2006.

BEJAN, A. **Advances engineering thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

BIERER, A.; GÖTZE, U.; MEYNERTS, L.; SYGULLA, R. Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. **Journal of Cleaner Production**, 108, 1289-1301, 2015.

BORNIA, A. C.; WERNKE, R. A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. **Revista Contabilidade & Finanças**. v. 14, n. 25, p. 60-71, 2001.

CAMPOS, V. R. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento**. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

CAMPOS, L.M.S.; HEIZEN, D.A.M.; VERDINELLI, M.A.; MIGUEL, P.A.C. Environmental performance indicators: a study on ISO 14001 certified companies. **Journal of Cleaner Production**, 99, 286-296, 2015.

CARVALHO, A., MIMOSO, A.F., MENDES, A.N., MATOS, H.A. From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index. **Journal of Cleaner Production**, 64, 36-62, 2014.

CERCAL, S. R. **Proposição de modelo matemático de seleção de prioridades de minimização de resíduos industriais**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Setor de Tecnologia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

CHAPAGAIN, A.K.; ORR, S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: a case of Spanish tomatoes. **Journal Environmental Management**, 90, 1219-1228, 2009.

CHOMPU-INWAI, R.; JAIMJIT, B.; PREMSURIYANUNT, P. A combination of material flow cost accounting and design of experiments techniques in an SME: the case of a wood products manufacturing company in northern Thailand. **Journal of Cleaner Production**, 108, 1352-1364, 2015.

CHRIST, K.L.; BURRIT, R.L. Material flow cost accounting: a review and agenda for future research. **Journal of Cleaner Production**, 108, 1378-1389, 2015.

CHRISTOFOLETTI A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1ª Ed. São Paulo: Blücher, 1999.

CLOQUELL-BALLESTER, V.; MONTERDE-DÍAZ, R.; CLOQUELL-BALLESTER, V.; SANTAMARINA-SIURANA, M. Systematic comparative and sensitivity analysis of additive and outranking techniques for supporting impact significance assessments. **Environmental Impact Assessment Review**, 27, 62-83, 2007.

COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio a decisão**. Niterói: HCG, 2002.

CRITTENDEN, B., KOLACZKOWSKI, S. **Waste minimization: a practical guide**. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 1995.

DARNALL, N.; HENRIQUES, I.; SADORSKY, P. Do environmental management systems improve business performance in an international setting? **Journal of International Management**, 14, 364-376, 2008.

DENG, L.; BABBITT, C.W.; WILLIAMS, E.D. Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainly analysis: case study of a laptop computer. **Journal of Cleaner Production**, 19, 1198-1206, 2011.

DOMINGUES, A.R.; MARQUES, P.; GARCIA, R.; FREIRE, F.; DIAS, L.C. Applying multi-criteria decision analysis to the life cycle assessment of vehicles. **Journal of Cleaner Production**, 107, 749-759, 2015.

DUFLOU, J.R., SUTHERLAND, J.W., DORNFELD, D., HERRMANN, C., JESWIET, J., KARA, S., HAUSCHILD, M., KELLENS, K. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, 61, 587-609, 2012.

EDENS, B.; HEIN, L. Towards a consistent approach for ecosystem accounting. **Ecological Economics**, 90, 41-52, 2013.

ELDUQUE, A.; ELDUQUE, D.; JAVIERRE, C.; FERNÁNDEZ, A.; SANTOLARIA, J. Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts. **Journal of Cleaner Production**, 108, 80-89, 2015.

FAKOYA, M. B.; POLL, B. V. D. The feasibility of applying material flow cost accounting as an integrative approach to brewery waste-reduction decisions. **African Journal of Business Management**, v. 6, n. 35, p. 9783-9789, 2012.

FINKBEINER, M. *et al.* The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 80-85. 2006.

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

FINNVEDEN, G.; MOBERG, A. Environmental systems analysis tools – an overview. **Journal of Cleaner Production**, 13, 1165-1173, 2005.

FINNVEDEN, G., HOFSTETTER, P., BARE, J., BASSON, L., CIROTH, A., METTIER, T., SEPPÄ-LA, J., JOHANSSON, J., NORRIS, G., VOLKWEIN, S. **Normalization, grouping and weighting in life cycle impact assessment**. SETAC Press, Pensacola, 2002.

FINNVEDEN, G. **A critical review of operational valuation/weighting methods for life cycle assessment**. Swedish Environmental Protection Agency: Stockholm, 1999.

FREY, H.C.; PATIL, S.R. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Journal of Risk Analysis**. 22, 3, 553-578, 2002.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N. *et al.* Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. **Final report ecoinvent 2000**, 2003.

FRUGOLI, P.A.; ALMEIDA, C.M.V.B.; AGOSTINHO, F.; GIANNETTI, B.F.; HUISINGH, D. Can measures of well-being and progress help societies to achieve sustainable development? **Journal of Cleaner Production**. 90, 370-380, 2015.

GIANNETTI, B.F. *et al.* Inventário de ciclo de vida da manufatura de seringas odontológicas. **Revista Produção**, 18, 1, 155-169, 2008.

GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., SCHRYVER, A.D., STRUIJS, J., ZELM, R.V. ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoints and endpoint level, <http://www.lcia-recipe.net/>; 2013.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos de apoio multicritério**. São Paulo: Thomson, 2004.

GREEN DESIGN INITIATIVE. Environmental Input–Output Life Cycle Assessment. Carnegie Mellon University, 2002. Disponível em: <http://www.eiolca.net>, Acesso em: 15 de maio de 2015.

GRI. G4 Sustainability reporting guidelines – Reporting principles and standard disclosures, <https://www.globalreporting.org>; 2015.

HAMBY, D.M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Journal Environmental Monitoring and Assessment**, 32, 135-154, 1994.

HAUSCHILD, M., POTTING, J. Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. Institute for Product Development Technical University of Denmark. 2005.

HEIJUNGS, R.; SETTANNI, E.; GUINÉE, J. Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC. **International Journal Life Cycle Assessment**, 18, 1722-1733, 2013.

HERBOHN, K. A full cost environmental accounting experiment. **Accounting Organizations and Society**, 30, 519-536, 2005.

Hermann, B.G., Kroeze, C., Jawjit, W. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. **Journal of Cleaner Production**, 15, 1787-1796, 2007.

HERVA, M., FRANCO, A., CARRASCO, E.F., ROCA, E. Review of corporate environmental indicators. **Journal of Cleaner Production**, 19, 1687-1699, 2011.

HERVA, M.; ÁLVAREZ, A.; ROCA, H. Combined application of energy and material flow analysis and ecological footprint for the environmental evaluation of a tailoring factory. **Journal of Hazardous Materials**, 237, 238, 231-239, 2012.

HERVA, M., ROCA, E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. **Journal of Cleaner Production**, 39, 355-371, 2013.

HÖJER, M., AHLROTH, S., DREBORG, K., EKVALL, T., FINNVEDEN, G., HJELM, O., HOCHSCHORNER, E., NILSSON, M., PALM, V. Scenarios in selected tools for environmental systems analysis. **Journal of Cleaner Production**, 16, 1958-1970, 2008.

HOURNEAUX JR., F.; HRDLICKA, H.A.; GOMES, C.M.; KRUGLIANSKAS, I. The use of environmental performance indicators and size effect: a study of industrial companies. **Ecological Indicators**, 36, 205-212, 2014.

HUMBERT, S., SCHRYVER, A.D., BENGGOA, X., MARGNI, M., JOLLIET, O. IMPACT 2002+: User Guide, <http://www.quantis-intl.com/impact2002.php>; 2015.

HYRŠLOVÁ, J; VÁGNER, M; PALÁSEK, J. Material Flow Cost Accounting (MFCA): Tool for the optimization of corporate production processes. **Business, Management and Education**, v. 9, n. 1, p. 5-18, 2011.

IRMÃOS ABAGE. 2015. Disponível em: [www.irmaosabage.com.br](http://www.irmaosabage.com.br), Acesso em: 01 de agosto de 2015.

ISSA, I.I.; PIGOSSO, D.C.A.; MCALOONE, T.C.; ROZENFELD, H. Leading product-related environmental performance indicators: a selection guide and database. **Journal of Cleaner Production**, 108, 321-330, 2015.

JASCH, C. **Environmental and Material Flow Cost Accounting: Principles and Procedures**. Springer:Berlin, 2009.

JASCH, C. The use of environmental management accounting (EMA) for identifying environmental costs. **Journal of Cleaner production**, 11, 667-676, 2003.

JASCH, C. Environmental Performance evaluation and indicators. **Journal of Cleaner production**, v. 8, n. 1, p. 79-88, 2000.

JESWANI, H., K.; AZAPAGIC, A.; SCHEPELMANN, P.; RITTHOFF, M. Options for broadening and deepening the LCA Approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 120–127, 2010.

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

KARA, S.; MANMEK, S.; KAEBERNICK, H. An integrated methodology to estimate the external environmental costs of products. **Annals of the CIRP**, 56, 1, 9-12, 2007.

KANIA, A.; ROSZAK, M.; SPILKA, M. Evaluation of FMEA methods used in the environmental management. **Archives of Materials Science and Engineering**, 65, 1, 37-44, 2014.

KIKUCHI, Y.; HIRAO, M. Practical method of assessing local and global impacts for risk-based decision making: a case study of metal degreasing processes. **Environmental Science Technology**, 42, 4527-4533, 2008.

KIM, J.; YANG, Y.; BAE, J.; SUH, S. The importance of normalization references in interpreting life cycle assessment results. **Journal of Industrial Ecology**, 17, 3, 385-395, 2013.

KOKUBO, K. **Material Flow Cost Accounting MFCA Case Examples**. Tokyo: METI, 2010. Disponível em : <[http://www.jmac.co.jp/mfca/thinking/data/MFCA\\_Case\\_exam ple\\_e.pdf](http://www.jmac.co.jp/mfca/thinking/data/MFCA_Case_exam ple_e.pdf)>. Acesso em: 08/09/2014.

KOTAS, T.J. **The exergy method of thermal plant analysis**. Flórida: Krieger Publishing Company, 1995.

KRAEMER, T. **Modelo econômico de controle e avaliação de impactos ambientais – MECAIA**. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KUMAR, R., PAL, P. Turning hazardous waste into value-added products: production and characterization of struvite from ammoniacal waste with new approaches. **Journal of Cleaner Production**, 43, 59-70, 2013.

LIU, Y., LANGER, V., HOGH-JENSEN, H., EGELYNG, H. Life Cycle Assessment of fossil energy use and greenhouse gas emissions in Chinese pear production. **Journal of Cleaner Production** 18, p.1423 - 1430, 2010.

LAMBERTON, G. Sustainability accounting d A brief history and conceptual framework. **Accounting Forum**, 29, 1, 7-26, 2005.

LAWRENCE, D.P. Impact significance determination – designing an approach. **Environmental Impact Assessment Review**, 27, 730-754, 2007.

LCIA-RECIPE. 2014. Disponível em: <http://www.lcia-recipe.net/>, Acesso em: 12 de junho de 2015.

LEITE, I. M. S. L.; FREITAS, F. F. T. Análise comparativa dos métodos de apoio multicritério a decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 32., 2012. **Anais...** Bento Gonçalves: ABEPRO, 2012, p. 1-11.

LIU, Y., LANGER, V., HOGH-JENSEN, H., EGELYNG, H. Life Cycle Assessment of fossil energy use and greenhouse gas emissions in Chinese pear production. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1423-1430, 2010.

LOPES, C. L. **A escolha de um custodiante para a Administradora Financeira: Análise multiatributo por medições conjuntas e troca justa**. 68 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Administração e Economia) – IBMEC, Rio de Janeiro, 2008.

MAJOR, G. L. A.; BELDERRAIN, M. C. N. Problemas de seleção de fornecedores: uma abordagem através do método de apoio multicritério à decisão ANP (*analytic network process*). In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XIV ENCITA, 14., 2008. **Anais ...** São José dos Campos: ITA, 2008, p. 1-11.

MARIMON, F.; ALONSO-ALMEIDA, M.M.; RODRÍGUEZ, M.P.; ALEJANDRO, K.A.C. The worldwide diffusion of the global reporting initiative: what is the point? **Journal of Cleaner Production**, 33, 132-144, 2012.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. In: XLI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009. **Anais...** Porto Seguro, 2009, p. 1778-1788.

MAY, J.R.; BRENANN, D.J. Application of data quality assessment methods to an LCA of electricity generation. **International Journal Life Cycle Assessment**, 8, 4, 215–225, 2003.

MIMOSO, A.F.; CARVALHO, A.; MENDES, A.N.; MATOS, H.A. Roadmap for environmental impact retrofit in chemical processes through the application of life cycle assessment methods. **Journal of Cleaner Production**, 90, 128-141, 2015.

MOLINOS-SENANTE, M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Economic feasibility study for wastewater treatment: a cost-benefit analysis. **Science of the Total Environment**, 408, 4396-4402, 2010.

MORÓN, A.B.; CALVO-FLORES, D.; MARTÍN RAMOS, J.M.; POLO ALMOHANO, M.P. AIEIA: Software for fuzzy environmental impact assessment. **Expert Systems with Applications**, 36, 9135-9149, 2009.

MOURAD, A.L.; GARCIA, E.E.C; VILHENA, A. **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações**. Campinas :CETEA/CEMPRE, 2002.

MOYA, C.; DOMÍNGUES, R.; LANGENHOVE, H.V.; HERRERO, S.; GIL, P.; LEDÓN, C.; DEWULF, J. Exergetic analysis in cane sugar production in combination with life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, 59, 43-50, 2013.

NAÇÕES UNIDAS. **Contabilidade da Gestão Ambiental – Procedimentos e princípios**. 2001. Disponível em: <<http://www.un.org/esa/sustdev/publications/emaportuguese.pdf>>. Acesso em: 12/05/2014.

NETO, J. A. A.; OLIVEIRA, L. B.; BRAGA, R. C. S. Avaliação de Impactos ambientais. In: ADISSI, *et al.* **Gestão Ambiental de Unidades Produtivas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

NGUYEN, T.L.T.; HERMANSEN, J.E.; MOGENSEN, L. Environmental costs of meat production: the case of typical EU pork production. **Journal of Cleaner Production**, 28, 168-176, 2012.

NIEMEIJER, D.; DE GROOT, R.S. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. **Ecological Indicators**, 8, 14-25, 2008.

NILSSON, M.; JORDAN, A.; TURNPENNY, J.; HERTIN, J.; NYKVIST, B.; RUSSEL, D. The use and non use of policy appraisal tools in policy making: empirical patterns across three European countries and the European Commission. *Policy Sciences*, 4, 335-355, 2008.

NUCCI, B.; PUCCINI, M.; PELAGAGGE, L.; VITOLO, S.; NICOLELLA, C. Improving the environmental performance of vegetable oil processing through LCA. **Journal of Cleaner Production**, 64, 310-322, 2014.

ODUM, H.T. **Environmental accounting, emergy and decision making**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

OLSON, D.L. **Decision aids for selection problems**. New York: Springer, 1996.

OMETTO, A.R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 209 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ONG, H.C.; MAHLIA, T.M.I.; MASJUKI, H.H.; HONNERY, D. Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. **Fuel**, 98, 131-139, 2012.

PAPASPYROPOULOS, K.G.; BLIOUMIS, V.; CHRISTODOULOU, A.; BIRTSAS, P.K.; SKORDAS, K.E. Challenges in implementing environmental management accounting tools: the case of a nonprofit forestry organization. **Journal of Cleaner Production**, 29, 30, 132-143, 2012.

PASTAKIA, C.M.R.; JENSEN, A. The rapid impact assessment matrix (RIAM) for EIA. **Environmental Impact Assessment Review**, 18, 461-482, 1998.

PEROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, 16, 517-530, 2008.

PFISTER, S., KOEHLER, A., HELLWEG, S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. **Environmental Science and Technology**, 43 (11), 4098–4104, 2009.

PIZER, W.A., MORGENSTERN, R., SHIH, J.S. The performance of industrial sector voluntary climate programs: climate wise and 1605(b), **Energy Policy**, 39, 7907-7916, 2011.

PRADO-LOPEZ, V.; SEAGER, T.P.; CHESTER, M.; LAURIN, L.; BERNARDO, M. TYLOCK, S. Stochastic multi-attribute analysis (SMAA) as an interpretation method for comparative life-cycle assessment (LCA). **International Journal Life Cycle Assessment**, 19, 405-416, 2014.

PRÉ CONSULTANTS. 2015. Disponível em: [www.pre-sustainability.com](http://www.pre-sustainability.com), Acesso em: 05 de maio de 2015.

REAP, J.; ROMAN, F.; DUNCAN, S.; BRAS, B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. **International Journal Life Cycle Assessment**, 13, 374-388, 2008.

REES, W., WACKERNAGEL, M. Our Ecological Footprint: Reducing human impact on Earth (Spanish edition, 2001), **Colección ecología & medio ambiente**, LOM edition, 1996.

RIGAMONTI, L.; GROSSO, M.; MOLLER, J.; MARTINEZ SANCHEZ, V.; MAGNANI, S.; CHRISTENSEN, T.H. Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. **Resources, Conservation and Recycling**, 85, 42-53, 2014.

ROCA, L.C.; SEARCY, C. An analysis of indicators disclosed in corporate sustainability reports. **Journal of Cleaner Production**, 20, 103-108, 2012.

ROGERS, K.; SEAGER, T.P. Environmental decision-making using life cycle impact assessment and stochastic multiattribute decision analysis: a case study on alternative transportation fuels. **Environmental Science Technology**, 43, 1718-1723, 2009.

ROWLEY, H.V.; PETERS, G.M.; LUNDIE, S.; MOORE, S.J. Aggregating sustainability indicators: beyond the weighted sum. **Journal of Environmental Management**, 111, 24-33, 2012.

SEN, P., ROY, M., PAL, P. Exploring role of environmental proactivity in financial performance of manufacturing enterprises: a structural modeling approach. **Journal of Cleaner Production**, 1-12, 2015.

SILVA, P.R.S., AMARAL, F.G. An integrated methodology for environmental impacts and costs evaluation in industrial processes. **Journal of Cleaner Production**, 17, 1339-1350, 2009.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991.

SAATY, T. L. **Decision making for leaders**. Pittsburg: WS. Publications, 2000.

SALOMON, V. P.; MONTEVECHI, J. A. B.; PAMPLONA, E. O. Justificativas para aplicação do método de análise hierárquica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 19., 1999. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 1999.

SALTELLI, A. Non-parametric statistics in sensitivity analysis for model output: a comparison of selected techniques. **Journal of Reliability Engineering and System Safety**. 28, 229-253, 1990.

SCIPIONI, A.; MAZZI, A.; ZULIANI, F.; MASON, M. The ISO 14031 standard to guide the urban sustainability measurement process: an Italian experience. **Journal of Cleaner Production**, 16, 1247-1257, 2008.

SCHMIDT, M. The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis. **Journal of Cleaner Production**, 108, 1310-1319, 2015.

SCHMIDT, M.; NAKAJIMA, M. Material Flow Cost Accounting as an approach to improve resource efficiency in manufacturing companies. **Resources**, 2, 358-369, 2013.

SEIFFERT, M. E. B. **Sistemas de Gestão Ambiental (SGA – ISO 14001): Melhoria contínua e produção mais limpa na prática e experiência de 24 empresas brasileiras**. 1ª Ed. São Paulo: Atlas, 2011.

SEPPALA, J.; HAMALAINEN, R.P.; On the meaning of the distance-to-target weighting method and normalisation in life cycle impact assessment. **International Journal Life Cycle Assessment**, 6, 4, 211-218, 2001.

SHANDONG ROPE NET MACHINERY CO. Disponível em: <[http://en.ropenetmachine.com/products\\_list.html](http://en.ropenetmachine.com/products_list.html)>. Acesso em: 02/03/2015.

SHOKRAVI, S.; SMITH, A.J.R.; BURVILL, C.R. Industrial environmental performance evaluation: a markov-based model considering data uncertainty. **Environmental Modelling & Software**, 60, 1-17, 2014.

SILALERTRUKSA, T.; BONNET, S.; GHEEWALA, S.H. Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, 28, 225-232, 2012.

SILVA, P. R. S.; AMARAL, F. G. MAICAPI – Metodologia para avaliação de impactos e custos ambientais em processos industriais: Estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 212-222, 2006.

SILVA, W. R. C. Métricas para avaliação de desempenho organizacional baseadas em indicadores da qualidade. **Revista Fibra e ciência**. v. 3, n. 2, 2010.

SILVA, E. **Proposta de método para gerenciamento de riscos ambientais utilizando as ferramentas FMEA e RCM**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SLAPNIK, M.; ISTENIC, D.; PINTAR, M.; UDOVC, A. Extending life cycle assessment normalization factors and use of machine learning – a Slovenian case study. **Ecological Indicators**, 50, 161-172, 2015.

SLATER, D.; JONES, H. Environmental risk assessment and the environment agency. **Journal of Hazardous Materials**, 65, 77-91, 1999.

SOARES, S.R.; TOFFOLETTO, L.; DESCHÊNES, L. Development of weighting factors in the context of LCIA. **Journal of Cleaner Production**, 14, 649-660, 2006.

SOLYON, G. J. P. 2009. **Minimização e reaproveitamento de resíduos de uma indústria de tintas e impressão de papéis decorativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR. Curitiba, 143 p.

STANO, L. C. **Avaliação do ciclo de vida: uma ferramenta que merece ser mais conhecida**, 2008. Disponível em: <[www.brasilpnuma.org.br/pordentro/artigos/](http://www.brasilpnuma.org.br/pordentro/artigos/)>. Acesso em: 04/03/2014.

SYGULLA, R.; BIERER, A.; GÖTZE, U. Material Flow Cost Accounting – Proposals for Improving the Evaluation of Monetary Effects of Resource Saving Process Designs. In: CIRP CONFERENCE ON MANUFACTURING SYSTEMS, 44., 2011. **Anais...** Madison, Wisconsin. Estados Unidos. Disponível em: <[https://www.tuchernitz.de/wirtschaft/bwl3/DownloadAllgemeinOffen/Publikationen/44thCIRP\\_MFCA.pdf](https://www.tuchernitz.de/wirtschaft/bwl3/DownloadAllgemeinOffen/Publikationen/44thCIRP_MFCA.pdf)>. Acesso em: 18/09/2014.

TRAPPEY, A. J. C; YEH, M. F. M.; WU, S. C.; KUO, A. Y. F ISO 14051-based material flow cost accounting system framework for collaborative green manufacturing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SUPPORTED COOPERATIVE WORK IN DESIGN – IEEE, 17., 2013. **Anais...** Whistler – Canadá: SMC Society, 2013.

TREVIZANO, W. A.; FREITAS, A. L. P. Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na seleção de processadores. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP. 25., 2005. **Anais...** Porto Alegre-RS: ABEPRO, 2005.

TIMOFIECSYK, F. R. **Minimização de resíduos numa indústria de alimentos da Região Metropolitana de Curitiba - PR**. Curitiba, 2001. 161 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Setor de Tecnologia Química, Universidade Federal do Paraná.

UNEP. Desalination Resource and Guidance Manual for Environmental Impact Assessments. **United Nations Environment Programme**, 2008.

VILAS BOAS, C. L. Métodos multicritérios de análise de decisão (MMAD) para as decisões relacionadas ao uso múltiplo de reservatórios: Analytic Hierarchy Process (AHP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2006. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2006.

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. New York: John Wiley, 1992.

WESTON, J. EIA, decision-making theory and screening and scoping in UK practice. **Journal of Environmental Planning Management**, 43, 2, 185–203, 2000.

WOOD, G. Thresholds and criteria for evaluating and communicating impact significance in environmental statements: “See no evil, hear no evil, speak no evil?” **Environmental Impact Assessment Review**, 28, 22-38, 2008.

YANG, S.; YANG, S.; QIAN, Y. The inclusion of economic and environmental factors in the ecological cumulative exergy consumption analysis of industrial processes. **Journal of Cleaner Production**, 108, 1019-1027, 2015.

YANG, J.L.; TZENG, G. An integrated MCDM technique combined with DEMATEL for a novel cluster-weighted with ANP method. **Expert Systems with Applications**. v. 38, p. 1417-1424, 2011.

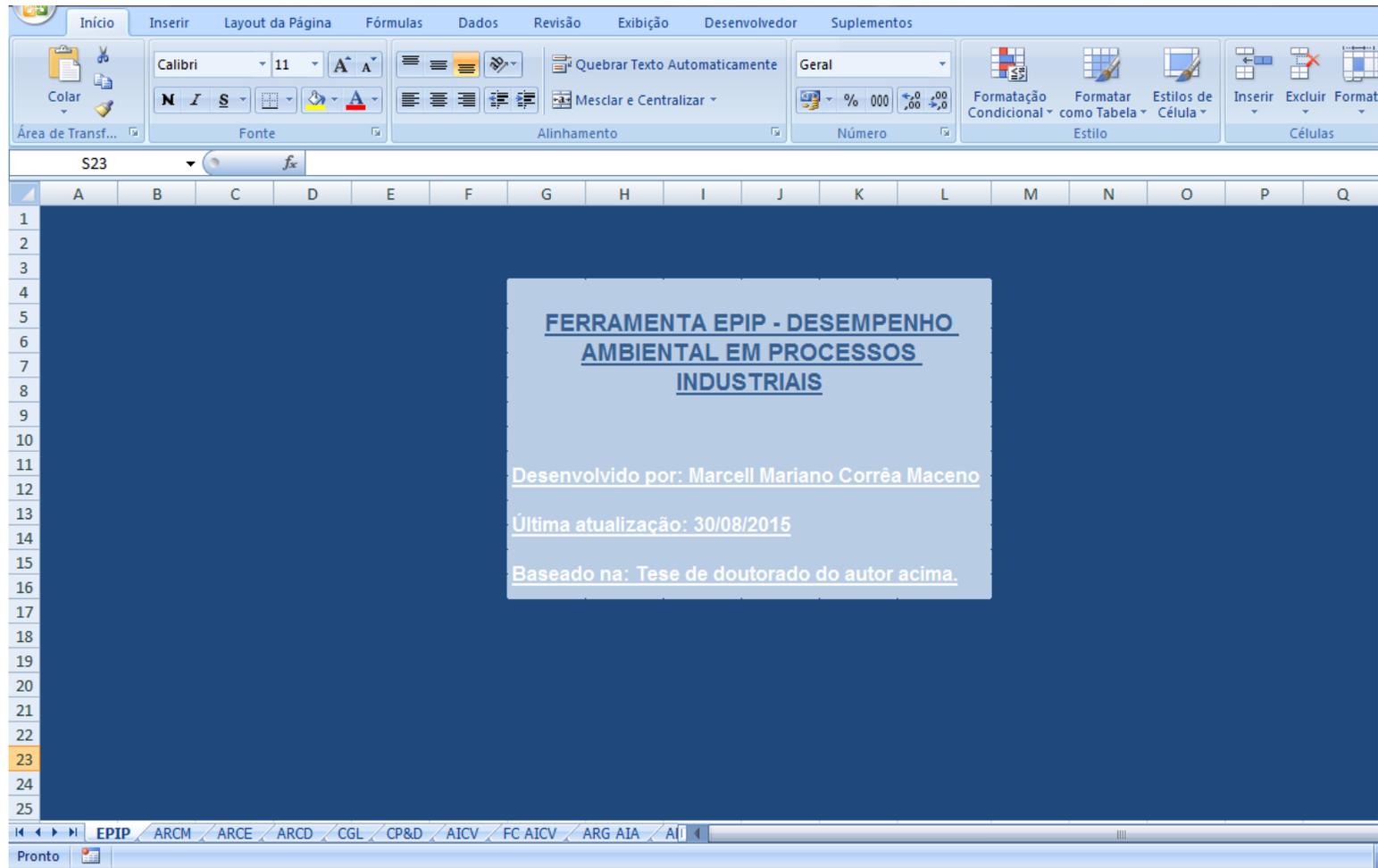
ZAMBRONA, T.F.; MARTINS, M.F. Utilização do método FMEA para avaliação do risco ambiental. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 2, p. 295-309, 2007.

ZAR, J.H. **Biostatistical Analysis**. Pearson, New York.1999.

ZOBEL, T.; ALMROTH, C.; BRESKY, J.; BURMAN, J-O. Identification and assessment of environmental aspects in an EMS context: an approach to a new reproducible method based on LCA methodology. **Journal of Cleaner Production**, 10, 381-396, 2002.

# I - APÊNDICE I – IMAGENS DA FERRAMENTA EPIP PROGRAMADA EM EXCEL

## TELA INICIAL DA FERRAMENTA EPIP



### CUSTO DE PERDA MATERIAL (CPM)

ANÁLISE DO RESÍDUO POR CUSTO DO MATERIAL																		
Nº Aspecto	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Unidade	Entrada	MP/Insumo Total	Resíduo	Saída/Resíduo	Material	Material	Material	Material	Material	Material	Material	Material	Material	n	ARCM (R\$ <sub>eq</sub> )
A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	kg	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	103320	Pallets de madeira para descarte	400	Material no resíduo	Madeira								A01	528
								Qtdade Material (QM)	400	0	0	0	0	0	0	0		
								CM (R\$/Unidade)	1,32	0	0	0	0	0	0	0		
A02	Silo Misturador	Consumo de PP	kg	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	103320	PP granulado	103320	Material no resíduo	PP								A02	0
								Qtdade Material (QM)	103320	0	0	0	0	0	0	0		
								CM (R\$/Unidade)	0	0	0	0	0	0	0	0		
A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	kg	Pallets de madeira, saco de rafia, fitilho de PP, PP granulado	103320	Saco de rafia de polipropileno	241,5	Material no resíduo	Sacos								A03	72,45
								Qtdade Material (QM)	241,5	0	0	0	0	0	0	0		
								CM (R\$/Unidade)	0,3	0	0	0	0	0	0	0		

### CUSTO DE ENERGIA CONSUMIDA (CEC)

ANÁLISE DO RESÍDUO POR CUSTO DE ENERGIA							
Nº Aspecto	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Resíduo	EG(KW.h)	CE(R\$/KW.h)	PR(%) <sup>(1)</sup>	ARCE (R\$ <sub>eq</sub> ) <sup>(0)</sup>
A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	Pallets de madeira para descarte	0,00	0,6621	0,004	0
A02	Silo Misturador	Consumo de PP	PP granulado	250,00	0,6621	1,000	165,525
A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	Saco de rafia de polipropileno	0,00	0,6621	0,002	0
A04	Silo Misturador	Geração de fitilho de amarração	Fitilho PP de amarração	0,00	0,6621	0,000	0,00
A05	Extrusão e bobinamento de chapas	Produção de chapas de PP	Chapas de PP	61650,00	0,6621	0,099	4033,68

### CUSTO DE DESTINO MATERIAL (CDM)

ANÁLISE DE RESÍDUO POR CUSTO DE DESTINAÇÃO																	
Nº Aspecto	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Resíduo	Qtdade	Unidade	Reuso na Fonte	Reuso na Empresa	Reciclo na Empresa	Reuso externo	Reciclo externo	Transporte e tratamento na Empresa	Transporte e Tratamento na Empresa, Destino	Transporte e Tratamento externo	Transporte e disposição o externo	Disposição inadequada (irregular)	n	ARCD (R\$ <sub>eq</sub> )
A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	Pallets de madeira para descarte	400	kg	D <sup>x</sup>	0	0	0	400	0	0	0	0	0	A01	-150,00
							CD (R\$/kg)	0	0	-0,375	0	0	0	0	0		
A02	Silo Misturador	Consumo de PP	PP granulado	103320	kg	D <sup>x</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A02	0,00
							CD (R\$/kg)	0	0	0	0	0	0	0	0		
A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	Saco de rafia de polipropileno	241,5	kg	D <sup>x</sup>	0	0	0	241,5	0	0	0	0	0	A03	-72,45
							CD (R\$/kg)	0	0	-0,3	0	0	0	0	0		
A04	Silo Misturador	Geração de fitilho de amarração	Fitilho PP de amarração	14,65	kg	D <sup>x</sup>	0	0	0	14,65	0	0	0	0	0	A04	-4,40
							CD (R\$/kg)	0	0	-0,3	0	0	0	0	0		

### CUSTO DE GESTÃO LOCALIZADA (CGL)

CUSTO DE GESTÃO LOCALIZADA											
Nº Aspecto	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Resíduo	Descrição do Custo	MPI/Insumo Total	Saída/Resíduo Total	Massa Total Equivalente	CGL1	CGL2	CGL3	CGL(T)
A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	Pallets de madeira para descarte		103320,0	400,0	103320,0	0	0	0	0,00
A02	Silo Misturador	Consumo de PP	PP granulado		103320,0	103320,0	103320,0	0	0	0	0,00
A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	Saco de rafia de polipropileno		103320,0	241,5	103320,0	0	0	0	0,00
A04	Silo Misturador	Geração de fitilho de amarração	Fitilho PP de amarração		103320,0	14,7	103320,0	0	0	0	0,00
A05	Extrusão e bobinamento de chapas	Produção de chapas de PP	Chapas de PP		925320,0	91440,0	925320,0	0	0	0	0,00
A06	Extrusão e bobinamento de chapas	Geração de sobras de PP	Sobra de polipropileno (PP)		925320,0	11880,0	925320,0	0	0	0	0,00

### CUSTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CPD)

CUSTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO											
Nº Aspecto	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Resíduo	Descrição do Custo	CP&D1	Nº	CP&D2	Nº	CP&D3	Nº	CP&D(T)
A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	Pallets de madeira para descarte			1		1		1	0
A02	Silo Misturador	Consumo de PP	PP granulado			1		1		1	0
A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	Saco de rafia de polipropileno			1		1		1	0
A04	Silo Misturador	Geração de fitilho de amarração	Fitilho PP de amarração			1		1		1	0

### AICV (PARTE 1)

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)														
Nº Aspecto	Resíduo	Saída/Resíduo Total	Energia	PE	Resíduo gerado	Uso de Água	Energia renovável	% Ene. Ren.	Energia não renovável	% Ener. N Ren.	Combustível pl/ Energia	Aq. Global	Toxicidade Humana	Resp. inorgânicos
A01	Pallets de madeira para descarte	400	0,00	0,00	Resíduo Não Perigoso	Não aplicável	Não aplicável	0	Não aplicável	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A02	PP granulado	103320	250,00	1,00	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0	Energia elétrica, BR	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A03	Saco de rafia de polipropileno	241,5	0,00	0,00	Resíduo Não Perigoso	Não aplicável	Não aplicável	0	Não aplicável	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A04	Fitilho PP de amarração	14,55	0,00	0,00	Resíduo Perigoso	Não aplicável	Não aplicável	0	Não aplicável	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A05	Chapas de PP	91440	61650,00	0,10	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0	Energia elétrica, BR	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A06	Sobra de polipropileno (PP)	11880	61650,00	0,01	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0	Energia elétrica, BR	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A07	Água quente	411000	61650,00	0,44	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0	Energia elétrica, BR	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
A08	Vapor de água	411000	61650,00	0,44	Não aplicável	Água usada	Não aplicável	0	Energia elétrica, BR	100	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

## AICV (PARTE 2)

Rad. ionizante	Depleção O3	Resp. orgânicos	Ecotoxicidade	Acidificação	Eutrofização	Solo ocupado	Solo transformado	Rec. Minerais	Res Qtdade	Res Energia	Res T
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	2,67E+00	0,00E+00	2,67E+00
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	1,34E-02	1,34E-02
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	1,61E+00	0,00E+00	1,61E+00
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	6,39E+00	0,00E+00	6,39E+00
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	3,26E-01	3,26E-01
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	4,24E-02	4,24E-02
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	1,47E+00	1,47E+00
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	1,02E+01	1,47E+00	1,16E+01
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	2,02E-02	2,02E-02
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	1,33E+01	1,33E+01
Não se aplica	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	0,00E+00	6,81E+00	6,81E+00

C<sub>AA</sub>, C<sub>AA</sub>T, CR<sup>%</sup>

## ANÁLISE DE RESÍDUO GLOBAL

CTR (R\$..)	Nº Aspect	Processo/Atividade	Aspecto Ambiental	Saída/Rejeito	ARCM (R\$)	ARCE (R\$)	ARCD (R\$)	CGL (R\$)	CP&D(R\$)	CT(R\$eq)	Cx	AIA	CR (R\$..)	RR <sup>2</sup> (%)
<b>7277730,19</b>	A01	Silo Misturador	Geração de Pallet de madeira	Pallets de madeira para descarte	528,00	0,00	-150,00	0,00	0,00	378,00	0,13	2,67	<b>1010,95</b>	<b>0,0139</b>
	A02	Silo Misturador	Consumo de PP	PP granulado	0,00	165,53	0,00	0,00	0,00	165,53	0,06	0,01	2,22	<b>0,0000</b>
<b>CET (R\$..)</b>	A03	Silo Misturador	Geração de saco de rafia	Saco de rafia de polipropileno	72,45	0,00	-72,45	0,00	0,00	0,00	0,00	1,61	<b>0,00</b>	<b>0,0000</b>
<b>299324,60</b>	A04	Silo Misturador	Geração de fitilho de amarração	Fitilho PP de amarração	4,40	0,00	-4,40	0,00	0,00	0,00	0,00	6,39	<b>0,00</b>	<b>0,0000</b>
	A05	Extensão e bobinamento de chapas	Produção de chapas de PP	Chapas de PP	0,00	4033,68	0,00	0,00	0,00	4033,68	1,35	0,33	<b>1316,93</b>	<b>0,0181</b>
	A06	Extensão e bobinamento de chapas	Geração de sobras de PP	Sobras de polipropileno (PP)	70448,40	524,06	-70448,40	0,00	0,00	524,06	0,18	0,04	22,23	<b>0,0003</b>
	A07	Extensão e bobinamento de chapas	Consumo de água para resfriamento	Água quente	2227,62	18130,36	-2227,62	0,00	0,00	18130,36	6,06	1,47	<b>26605,66</b>	<b>0,3656</b>
	A08	Extensão e bobinamento de chapas	Geração de vapor de água	Vapor de água	2227,62	18130,36	0,00	0,00	0,00	20357,98	6,80	11,63	<b>236790,71</b>	<b>3,2536</b>
	A09	Resfriamento de água	Resfriamento de água em torre p	Água resfriada	2227,62	250,17	-2227,62	0,00	0,00	250,17	0,08	0,02	5,07	<b>0,0001</b>
	A10	Termoformagem	Produção dos copos de PP	Copos	0,00	163756,70	0,00	-658,09	0,00	157158,62	52,50	13,25	<b>2170496,86</b>	<b>29,8238</b>
	A11	Termoformagem	Geração de grelha de PP	Grelha de polipropileno	183927,25	84185,30	-183927,25	-3391,99	0,00	80793,31	26,99	6,81	<b>573632,22</b>	<b>7,8820</b>
	A12	Termoformagem	Geração de copos não conformes	Copos plásticos não conformes	358,17	163,34	-358,17	-6,61	0,00	157,33	0,05	0,42	68,38	<b>0,0009</b>
	A13	Termoformagem	Geração de copos contaminados	Copos plásticos contaminados c	194,68	86,31	56,60	-3,48	0,00	334,12	0,11	13,87	<b>4683,63</b>	<b>0,0644</b>
	A14	Trituração	Produção de PP granulado	PP granulado	0,00	883,90	0,00	0,00	0,00	883,90	0,30	0,07	63,24	<b>0,0009</b>
	A15	Acerto de Impressão dry offset	Geração de copos de teste	Copos de teste	902,79	13,01	83,39	0,00	0,00	999,18	0,33	0,32	914,30	<b>0,0126</b>
	A16	Acerto de Impressão dry offset	Geração de embalagens de tinta	Embalagem de tinta	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,36	0,00	0,09	0,03	<b>0,0000</b>
	A17	Acerto de Impressão dry offset	Geração de pano contaminado d	Pano com tinta e solvente	8,56	0,00	2,53	0,00	0,00	11,09	0,00	0,62	6,87	<b>0,0001</b>
	A18	Acerto de Impressão dry offset	Geração de embalagem de solvente	Embalagem de solvente	0,00	0,00	4,45	0,00	0,00	4,45	0,00	1,09	4,85	<b>0,0001</b>
	A19	Acerto de Impressão dry offset	Geração de COVs de teste	COVs de acerto	12,39	0,10	0,00	0,00	0,00	12,49	0,00	4,96	61,97	<b>0,0009</b>
	A20	Impressão dry offset	Produção de copos impressos	Copos pintados	0,00	3061,89	0,00	0,00	0,00	3061,89	1,02	0,25	758,82	<b>0,0104</b>
	A21	Impressão dry offset	Geração de embalagens de tinta	Embalagens de tinta	0,00	0,00	179,78	0,00	0,00	179,78	0,06	44,04	7917,77	<b>0,1088</b>
	A22	Impressão dry offset	Geração de pano contaminado d	Pano com tinta e solvente	398,50	0,00	133,50	0,00	0,00	530,00	0,18	32,70	17333,14	<b>0,2382</b>
	A23	Impressão dry offset	Geração de copos não conformes	Copos plásticos não conformes	1680,00	11,53	155,18	0,00	0,00	1846,71	0,62	1,70	3142,90	<b>0,0432</b>
	A24	Impressão dry offset	Geração de blaqueta	Blaqueta usada	100,75	0,00	5,82	0,00	0,00	106,57	0,04	0,02	2,20	<b>0,0000</b>