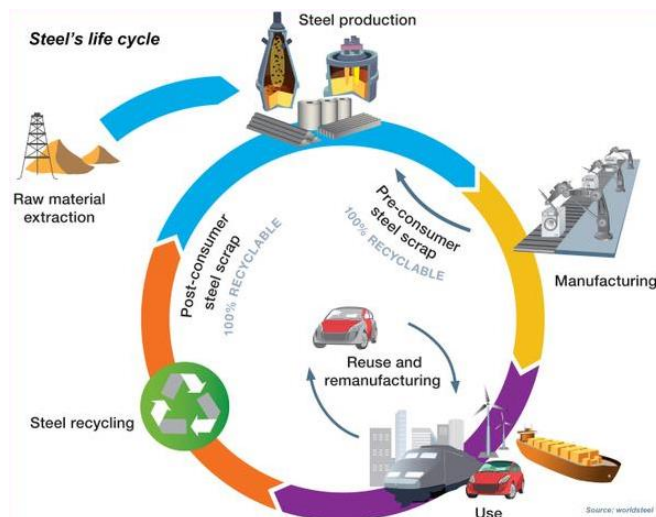




**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA**



## **Seleção de Ferramenta para Avaliação do Desempenho Ambiental de Produtos.**

### **Estudo de Caso na Indústria Automóvel**

**ANA ISABEL CÔCO GONÇALVES MARQUÊS**  
(Licenciada em Engenharia Química e Biológica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Química e Biológica

Orientadores:

Prof.<sup>a</sup> Doutora Isabel Maria João

Eng. Miguel Pereira

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Gomes

Vogais:

Prof. Eng. António Carreira de Oliveira

Eng. Miguel Pereira

**Dezembro de 2015**

## **Agradecimentos**

No final desta tese, tenho o maior prazer em expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos, que de uma maneira ou de outra, me apoiaram na sua realização, nomeadamente:

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Doutora Isabel Maria João, por toda a sua disponibilidade, ajuda e paciência.

Ao meu co-orientador, Eng. Miguel Pereira, que me abriu as portas de sua “casa” e me disponibilizou toda a informação solicitada sobre o processo de produção de molas de lâmina da sua empresa.

A todos os meus professores do ISEL pela sua transmissão de conhecimentos.

A todos os meus colegas do ISEL que me têm acompanhado e apoiado desde a licenciatura, com destaque para a Andreia Pires, a Elizabeth Silva, o Hélder Miguel e o Ramiro Évora.

A todos os meus amigos agradeço o apoio e a amizade.

Aos meus sogros pelo apoio e pela compreensão que têm tido por não podermos estar mais vezes juntos devido a razões académicas.

Aos meus irmãos, Nuno e Guigui, e à minha sobrinha por me ajudarem a ser a pessoa que sou hoje.

Aos meus pais, que do céu ou da terra, nunca desistiram de mim.

E, por último, aos dois grandes homens da minha vida, o meu marido Miguel e o meu mano Jorge, que sempre estiveram incondicionalmente do meu lado, sempre tiveram uma palavra amiga e que são a minha alegria de viver.



## Resumo

Hoje em dia, existe cada vez mais a consciência de que o ambiente é de todos e para todos e que se não for tratado convenientemente pode pôr em causa o bem-estar das gerações futuras. A indústria tem preocupações constantes com o design dos seus produtos, pois quanto mais eco-eficientes eles forem, mais satisfazem os clientes e as necessidades do mercado. A procura de processos de fabrico que tenham menos impactes ambientais é uma característica crescente nos objetivos estratégicos definidos pelas empresas.

O objetivo deste trabalho prende-se com a necessidade que uma empresa, que produz molas de lâmina utilizadas na suspensão de carroçarias de camiões, tem de conhecer os potenciais impactes ambientais relacionados com alterações ao design do seu produto. Assim, efetuou-se uma análise de ciclo de vida (ACV) do "berço ao túmulo" às molas de lâmina utilizando uma ferramenta informática.

No entanto, antes da realização desse estudo, foi necessário escolher a melhor ferramenta informática para a ACV. Existem inúmeras ferramentas que podem ser mais ou menos adequadas ao estudo pretendido consoante o tipo de indústria, o tipo de produto, a área geográfica coberta, o suporte técnico fornecido, entre outros. Para tal, utilizou-se a metodologia multicritério de apoio à decisão MACBETH e o *software* M-MACBETH que suporta esta metodologia. Após a sua aplicação definiu-se que a ferramenta GaBi é a mais adequada à ACV de molas de lâmina na indústria automóvel.

Após a realização do estudo de ACV, utilizando a ferramenta informática GaBi, concluiu-se que a alteração do design das molas de lâmina que as torna 10 % mais leves implica uma redução dos impactes ambientais, trazendo assim benefícios para a sociedade.

**Palavras-chave:** ACV, AICV, ecodesign, ciclo de vida, GaBi, ICV, indústria automóvel, MACBETH, molas de lâmina.

## **Abstract**

Today, there's a growing awareness that the environment belongs to everyone and it's for everyone. Therefore, if the environment isn't well protected, the future of new generations may be involved. The industry concerns with their design of products, because a more eco-efficient product leads to satisfied customers and meets the market needs. Demand for less environmental impact manufacturing processes is a growing feature of the corporate goals.

This report describes the need to know of the potential environmental impacts are related to changes to the product design. Thus, it was performed a "cradle to grave" life cycle assessment (LCA) to the leaf springs, used in body suspension trucks, using a software tool.

However, prior to this study, should be chosen the best LCA's software tool. There are several tools that may be more or less appropriate depending the industry type, product type, geographical area covered, technical support provided, among others. To do this, was used a multi-criteria approach to decision support, the MACBETH approach, and the software M-MACBETH that supports this methodology. Was realized that the most appropriate LCA's tool to leaf springs in the automotive industry is the GaBi software.

The conclusions of this work was that if leaf springs design changes, so that they become 10% lighter, the environmental impacts are lower. Thus bringing benefits to society.

**Keywords:** automotive industry, ecodesign, GaBi, life cycle, LCA, LCI, LCIA, leaf springs, MACBETH.

## Abreviaturas

<b>ACV</b>	Avaliação de Ciclo de Vida
<b>AICV</b>	Análise de Inventário de Ciclo de Vida
<b>ASCV</b>	Análise de Sustentabilidade de Ciclo de Vida
<b>BF</b>	Processo Integrado de Alto-forno com Forno Básico de Oxigénio ( <i>Blast Furnace-Basic Oxygen</i> )
<b>CALCAS</b>	Ação de Coordenação para a Inovação na ACV para a Sustentabilidade ( <i>Co-ordination Action for Innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability</i> )
<b>CEC</b>	Comissão das Comunidades Europeias
<b>COVs</b>	Compostos Orgânicos Voláteis
<b>CPS</b>	Consumo e Produção Sustentáveis ( <i>SCP - Sustainable Consumption and Production</i> )
<b>CTU</b>	Unidade Tóxica Comparativa ( <i>Comparative Toxic Unit</i> )
<b>DE</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para a Alemanha
<b>EAF</b>	Processo de Forno de Arco Elétrico ( <i>Electric Arc Furnace</i> )
<b>EMPA</b>	Swiss Federal Laboratories de Materiais Testing e Research
<b>EPD</b>	Declaração Ambiental de Produto ( <i>Environmental Product Declaration</i> )
<b>ES</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para Espanha
<b>EU-27</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para a União Europeia (27 países)
<b>FAZ</b>	Frauenthal Automotive Azambuja, S. A.
<b>GLO</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para Global
<b>GWP</b>	Potencial de Aquecimento Global ( <i>Global Warming Potential</i> )
<b>ICV</b>	Inventário de Ciclo de Vida
<b>ILCD</b>	Sistema Internacional de Dados de Referência de Ciclo de Vida ( <i>International Reference Life Cycle Data System</i> )
<b>IPCC</b>	Painel Internacional sobre Alterações Climáticas ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
<b>ISO</b>	Organização Internacional para Normalização ( <i>International Standard Organization</i> )

<b>ISSP</b>	Sociedade Internacional de Profissionais de Sustentabilidade ( <i>International Society of Sustainability Professionals</i> )
<b>L</b>	Comprimento ( <i>Length</i> )
<b>MCDA</b>	Metodologias Multicritério de Apoio á Decisão ( <i>Multiple-Criteria Decision Analysis</i> )
<b>NOx</b>	Óxidos de Azoto (Nitrogen Oxides)
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>PCV</b>	Pensamento do Ciclo de Vida ( <i>LCT - Life Cycle Thinking</i> )
<b>PEF</b>	Pegada Ecológica de Produto ( <i>Product Environmental Footprint</i> )
<b>PIP</b>	Política Integrada de Produto
<b>PSI</b>	Índice de Sustentabilidade de Produto ( <i>Product Sustainability Index</i> )
<b>PT</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para Portugal
<b>REPA</b>	Análise de Recursos e Perfil Ambiental ( <i>Resource and Environmental Profile Analysis</i> )
<b>RIBs</b>	Resíduos Industriais Banais
<b>RIPs</b>	Resíduos Industriais Perigosos
<b>RNA</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para América do Norte
<b>SETAC</b>	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental ( <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> )
<b>Th</b>	Espessura ( <i>Thickness</i> )
<b>UNEP</b>	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente ( <i>United Nations Environment Programme</i> )
<b>US</b>	Código Geográfico do <i>software</i> GaBi para Estados Unidos ( <i>United States</i> )
<b>W</b>	Largura ( <i>Width</i> )
<b>µm</b>	Micrómetro

## ÍNDICE

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Avaliação de Ciclo de Vida .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Normalização.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Fases de ciclo de vida .....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Fase de definição do objetivo e âmbito.....	8
1.3.2 Fase de inventário.....	9
1.3.3 Fase de avaliação de impacte .....	10
1.3.3.1 Metodologias de AICV.....	13
1.3.3.2 Categorias de impactes .....	19
1.3.4 Fase de interpretação .....	25
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>28</b>
<b>3. Escolha de uma ferramenta informática para ACV na indústria automóvel.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Revisão bibliográfica .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 Metodologias multicritério de apoio à decisão.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3 Metodologia MACBETH .....</b>	<b>43</b>
3.3.1 Estrutura do problema.....	45
3.3.2 Avaliação das ferramentas informáticas.....	49
3.3.3 Seleção das ferramentas informáticas – Análises.....	58
3.3.3.1 Análise de sensibilidade no peso dos critérios.....	60
3.3.3.2 Análise de robustez das opções .....	62
3.3.3.3 Análise de benefício-custo .....	64
3.3.3.4 Conclusão .....	66
<b>3.4 A ferramenta informática GaBi .....</b>	<b>67</b>
<b>4. Estudo de ACV na indústria automóvel – Estudo de caso .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 Objetivo do estudo de caso .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2 Apresentação da empresa .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3 Descrição do processo produtivo .....</b>	<b>70</b>
<b>4.4 Avaliação do ciclo de vida.....</b>	<b>73</b>
4.4.1 Fase de definição do objetivo e âmbito.....	73

4.4.2 Fase do inventário.....	73
4.4.3 Fase de avaliação de impacte .....	109
4.4.4 Fase de interpretação .....	122
<b>5. Conclusões finais .....</b>	<b>124</b>
<b>6. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>127</b>
<b>7. Referências bibliográficas .....</b>	<b>128</b>
7.1 Bibliografia .....	128
<b>8. Anexos .....</b>	<b>135</b>
8.1. Anexo I - Descritores qualitativos de performance para cada um dos critérios .....	135
8.2. Anexo II - Matrizes de julgamentos e escalas de cada um dos critérios.....	139
8.3. Anexo III -Análises de sensibilidade no peso para cada um dos critérios .....	142
8.4. Anexo IV -Análises de robustez para as opções em estudo .....	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – FASES DE UMA ACV .....	7
FIGURA 1.2 – EXEMPLO DE CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS DE DETERMINADAS CORRENTES .....	11
FIGURA 2.1 - TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL DE VEÍCULOS AUTOMÓVEIS ENTRE 1960 E 2002 .....	28
FIGURA 2.2 – PRINCIPAIS ELEMENTOS QUE CONTRIBUEM PARA O DFS .....	30
FIGURA 3.1 – FASES DO MODELO MCDA MACBETH .....	45
FIGURA 3.2 – ÁRVORE DE VALORES PARA A ESCOLHA DE UMA FERRAMENTA INFORMÁTICA PARA O ESTUDO DE ACV NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL .....	48
FIGURA 3.3 – OPÇÕES DE FERRAMENTAS INFORMÁTICAS QUE SE PRETENDEM AVALIAR .....	49
FIGURA 3.4 – EXEMPLO DO DESCRIÇÃO CONSTRUÍDO DO CRITÉRIO “TÓPICOS DE DESEMPENHO ABRANGIDOS” .....	53
FIGURA 3.5 - MATRIZ DE JULGAMENTOS PARA O CRITÉRIO “TÓPICOS DE DESEMPENHO ABRANGIDOS” .....	54
FIGURA 3.6 – ESCALA TERMOMÉTRICA PARA O CRITÉRIO “TÓPICOS DE DESEMPENHO ABRANGIDOS” .....	54
FIGURA 3.7 – REPRESENTAÇÃO DA TABELA DE PERFORMANCES DAS FERRAMENTAS INFORMÁTICAS PARA CADA UM DOS CRITÉRIOS CONSIDERADOS.....	55
FIGURA 3.8 – REPRESENTAÇÃO DA TABELA DE REFERÊNCIAS DE PONDERAÇÃO PARA OS CRITÉRIOS CONSIDERADOS .....	55
FIGURA 3.9 – REPRESENTAÇÃO DA TABELA DE ORDENAÇÕES DAS DIVERSAS OPÇÕES SEGUNDO OS CRITÉRIOS CONSIDERADOS.....	56
FIGURA 3.10 – MATRIZ DE PONDERAÇÃO .....	56
FIGURA 3.11 – ESCALA DE PESOS MACBETH PARA OS CRITÉRIOS CONSIDERADOS.....	57
FIGURA 3.12 – PERFIS DE PONDERAÇÃO NORMALIZADOS PARA CADA CRITÉRIO .....	58
FIGURA 3.13 – TABELA DE PONTUAÇÕES DAS OPÇÕES .....	59
FIGURA 3.14 – TERMÓMETRO DE PONTUAÇÕES GLOBAIS.....	59
FIGURA 3.15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PERFIL DE DIFERENÇAS PONDERADAS DAS OPÇÕES MAIS ATRATIVAS GABI E SIMAPRO .....	60
FIGURA 3.16 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO PESO PARA O CRITÉRIO “LINGUAGENS DISPONÍVEIS” PARA A GABI E SIMAPRO.....	61
FIGURA 3.17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO PESO PARA O CRITÉRIO “UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE PELA COMUNIDADE CIENTÍFICA” PARA A GABI E SIMAPRO .....	62
FIGURA 3.18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ANÁLISE DE ROBUSTEZ .....	63
FIGURA 4.1 – REPRESENTAÇÃO DE UMA MOLA DE LÂMINA PARABÓLICA.....	69
FIGURA 4.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO PRODUTIVO DE PRODUÇÃO DE MOLAS DE LÂMINA .....	72
FIGURA 4.3 - FLUXOGRAMA DO CICLO DE VIDA DAS MOLAS DE LÂMINA CONSTRUÍDO ATRAVÉS DA FERRAMENTA INFORMÁTICA GABI.....	75
FIGURA 4.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇO EAF. ....	77
FIGURA 4.5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO INTEGRADO DE PRODUÇÃO DE AÇO.....	78
FIGURA 4.6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS CONTRIBUIÇÕES DE DIFERENTES FONTES DE ENERGIA PARA A REDE ELÉTRICA NACIONAL PARA O ANO DE 2014 .....	87

FIGURA 4.7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS CONTRIBUIÇÕES DE DIFERENTES FONTES DE ENERGIA PARA A REDE ELÉTRICA ESPANHOLA PARA O ANO DE 2014 .....	87
FIGURA 4.8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PAÍSES QUE FORNECEM GÁS NATURAL A PORTUGAL .....	90
FIGURA 4.9 – FLUXOS DE ENTRADA E SAÍDA DO PROCESSO “PRODUÇÃO DE MOLAS DE LÂMINA” .....	97
FIGURA 4.10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS E SAÍDAS DE FLUXOS ELEMENTARES PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS.....	102
FIGURA 4.11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS DE FLUXOS ELEMENTARES PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS.....	103
FIGURA 4.12 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS SAÍDAS DE FLUXOS ELEMENTARES PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS .....	103
FIGURA 4.13 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS DE FLUXOS ELEMENTARES PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS SEM SE CONSIDERAR O FLUXO RECURSOS.....	104
FIGURA 4.14 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS SAÍDAS DE FLUXOS ELEMENTARES PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS SEM SE CONSIDERAR O FLUXO “EMISSIONES PARA A ÁGUA DOCE” .....	104
FIGURA 4.15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS DE FLUXOS DE “RECURSOS” (MATERIAIS, ENERGÉTICOS E USO DO SOLO) PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS .....	105
FIGURA 4.16 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS DE FLUXOS DE “RECURSOS MATERIAIS” (RECURSOS RENOVÁVEIS, RECURSOS NÃO RENOVÁVEIS E ELEMENTOS NÃO RENOVÁVEIS) PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS .....	106
FIGURA 4.17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS DE FLUXOS DE “RECURSOS ENERGÉTICOS” (RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS) PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS .....	107
FIGURA 4.18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ENTRADAS DE FLUXOS DE “RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS” PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS.....	107
FIGURA 4.19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS SAÍDAS DOS FLUXOS DE “EMISSIONES PARA A ÁGUA DOCE” PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS.....	108
FIGURA 4.20 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS SAÍDAS DE FLUXOS ELEMENTARES PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS SEM SE CONSIDERAR O FLUXO “EMISSIONES PARA A ÁGUA DOCE” .....	108
FIGURA 4.21 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS SAÍDAS DE DIFERENTES FLUXOS QUE CONSTITUEM O FLUXO “EMISSIONES PARA A ÁGUA DOCE” PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS.....	109
FIGURA 4.22 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA PARA A CATEGORIA DE IMPACTE “TOXICIDADE HUMANA, EFEITOS CANCERÍGENOS”, EM CTUH .....	112
FIGURA 4.23 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA PARA A CATEGORIA DE IMPACTE “AQUECIMENTO GLOBAL, INCLUINDO O CARBONO BIOGÉNICO”, EM EQ-KG CO <sub>2</sub> .....	113
FIGURA 4.24 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA PARA A CATEGORIA DE IMPACTE “DIMINUIÇÃO DA CAMADA DE OZONO”, EM EQ-KG DE CFC-11.....	113
FIGURA 4.25 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA PARA A CATEGORIA DE IMPACTE “MATÉRIA PARTICULADA/INORGÂNICOS RESPIRÁVEIS”, EM EQ-KG DE PM <sub>2,5</sub> .....	114

FIGURA 4.26 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA PARA A CATEGORIA DE IMPACTE “DEPLEÇÃO DE RECURSOS”, EM EQ-KG DE SB.....	114
FIGURA 4.27 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “TOXICIDADE HUMANA, EFEITOS CANCERÍGENOS”, EM CTUH, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 1.....	115
FIGURA 4.28 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “AQUECIMENTO GLOBAL IPCC, INCLUINDO O CARBONO BIOGÉNICO”, EM EQ-KG CO <sub>2</sub> , PARA O ESTUDO COMPARATIVO 1.....	116
FIGURA 4.29 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZONO”, EM EQ-KG CFC-11, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 1.....	116
FIGURA 4.30 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “MATÉRIA PARTICULADA / INORGÂNICOS RESPIRÁVEIS”, EM EQ-KG PM <sub>2,5</sub> , PARA O ESTUDO COMPARATIVO 1.....	116
FIGURA 4.31 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “DEPLEÇÃO DE RECURSOS, FÓSSEIS E MINERAIS”, BASEADO EM RESERVAS, EM EQ-KG Sb, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 1 .....	117
FIGURA 4.32 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS RESULTADOS NORMALIZADOS (CML2001 – APR. 2013, EU 25+3), PARA O ESTUDO COMPARATIVO 1 .....	117
FIGURA 4.33 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “TOXICIDADE HUMANA, EFEITOS CANCERÍGENOS”, EM CTUH, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	118
FIGURA 4.34 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “AQUECIMENTO GLOBAL IPCC, INCLUINDO O CARBONO BIOGÉNICO”, EM EQ-KG CO <sub>2</sub> , PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	118
FIGURA 4.35 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZONO”, EM EQ-KG CFC-11, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	119
FIGURA 4.36 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “MATÉRIA PARTICULADA / INORGÂNICOS RESPIRÁVEIS”, EM EQ-KG PM <sub>2,5</sub> , PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	119
FIGURA 4.37 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “DEPLEÇÃO DE RECURSOS, FÓSSEIS E MINERAIS, BASEADO EM RESERVAS”, EM EQ-KG Sb, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	119
FIGURA 4.38 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “TOXICIDADE HUMANA, EFEITOS CANCERÍGENOS”, EM CTUH, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 3.....	120
FIGURA 4.39 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “AQUECIMENTO GLOBAL IPCC, INCLUINDO O CARBONO BIOGÉNICO”, EM EQ-KG CO <sub>2</sub> , PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	120
FIGURA 4.40 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE” DIMINUIÇÃO DA CAMADA DE OZONO”, EM EQ-KG CFC-11, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	121
FIGURA 4.41 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE “MATÉRIA PARTICULADA / INORGÂNICOS RESPIRÁVEIS”, EM EQ-KG PM <sub>2,5</sub> , PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	121
FIGURA 4.42 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CATEGORIA DE IMPACTE ”DEPLEÇÃO DE RECURSOS, FÓSSEIS E MINERAIS, BASEADO EM RESERVAS”, EM EQ-KG Sb, PARA O ESTUDO COMPARATIVO 2.....	121

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 – COMBINAÇÕES UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO DOS DESCRITORES .....	52
TABELA 3.2 – MARGENS DE INCERTEZAS PARA CADA UM DOS CRITÉRIOS .....	64
TABELA 3.3 – CUSTO ANUAL ESTIMADO PARA CADA FERRAMENTA INFORMÁTICA.....	65
TABELA 4.1 – DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DO ESTUDO .....	73
TABELA 4.2 – DEFINIÇÃO DO ÂMBITO DO ESTUDO .....	73
TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE AÇO DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	76
TABELA 4.4 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DOS LINGOTES DE AÇO DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	79
TABELA 4.5 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE EM CAMIÕES ARTICULADOS DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	80
TABELA 4.6 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE MISTURA DE GASÓLEO NA REFINARIA DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	81
TABELA 4.8 – CONSUMOS DE ÁGUA TOTAL, POTÁVEL E DE FUROS DA FAZ DURANTE O ANO DE 2014 .....	83
TABELA 4.9 – ALGUNS TIPOS DE CORRENTES DISPONIBILIZADAS PELO <i>SOFTWARE GABI</i> PARA OS GRUPOS DE OBJETOS <i>OPERATING MATERIALS E WATER</i> .....	84
TABELA 4.10 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS QUE PODERÃO PRODUIR A CORRENTE <i>PROCESS AND COOLING WATER</i> .....	85
TABELA 4.11 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE ELETRICIDADE CONSUMIDA DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	86
TABELA 4.12 – CONSUMOS DE ENERGIA ELÉTRICA DA FAZ DURANTE O ANO DE 2014 .....	88
TABELA 4.13 – CONSUMOS DE GÁS NATURAL DA FAZ DURANTE O ANO DE 2014 .....	89
TABELA 4.14 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE FORNECIMENTO DE GÁS NATURAL A PORTUGAL DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	89
TABELA 4.15 – ALGUNS TIPOS DE TINTAS DO GRUPO DE OBJETOS <i>PAINTS</i> DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	91
TABELA 4.16 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS PINTURA DE PARTES DE VEÍCULOS AUTOMÓVEIS DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	91
TABELA 4.17 – ALGUNS TIPOS DE SISTEMAS DE PINTURA DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	92
TABELA 4.18 – PRODUÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS BANAIS (RIBs) PELA FAZ DURANTE O ANO DE 2014.....	93
TABELA 4.19 – PRODUÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PERIGOSOS (RIPs) PELA FAZ DURANTE O ANO DE 2014.....	94
TABELA 4.20 – ALGUNS TIPOS DE CORRENTES DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PERIGOSOS (TINTAS E SOLVENTES) DISPONIBILIZADOS PELO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	94
TABELA 4.21 – PRODUÇÃO DE SUCATA DE AÇO PELA FAZ DURANTE O ANO DE 2014 .....	95
TABELA 4.22 – PRODUÇÃO DE EMISSÕES GASOSAS (PARTÍCULAS, COVs E NOx) POR ZONAS DA FÁBRICA DA FAZ DURANTE O ANO DE 2014 .....	96
TABELA 4.23 – CONCENTRAÇÃO E QUANTIDADE POR MOLA DE EMISSÕES GASOSAS (PARTÍCULAS, COVs E NOx).....	96
TABELA 4.24 – DISTÂNCIA MÉDIA PONDERADA RELATIVA AO TRANSPORTE DAS MOLAS DA FAZ AOS CLIENTES .....	98
TABELA 4.25 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO <i>USE PHASE – CARBON STEEL PRODUCT</i> DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	99
TABELA 4.26 – DISTÂNCIA MÉDIA PONDERADA RELATIVA AO TRANSPORTE DA SUCATA DE AÇO ATÉ AO SEU DESTINO FINAL.....	100
TABELA 4.27 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO AUXILIAR <i>CREDIT FOR RECYCLING OF STEEL SCRAP</i> DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	100
TABELA 4.28 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO <i>VALUE OF SCRAP</i> DO <i>SOFTWARE GABI</i> .....	101
TABELA 4.29 – FLUXOS DE ENTRADA DE “RECURSOS MATERIAIS RENOVÁVEIS PARA AS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS ATUAIS .....	106

## 1. Introdução

Existe hoje em dia uma consciencialização crescente da importância da proteção do ambiente e dos possíveis impactos associados aos produtos, produzidos ou consumidos. Devido a isto, o interesse no desenvolvimento de métodos para um melhor entendimento e uma melhor abordagem destes impactos tem vindo a aumentar, como é o caso da técnica que estuda o balanço do somatório das entradas e saídas durante todo o período de vida de um determinado produto e os impactos que esse produto gera para o ambiente e para a sociedade em geral, ou seja, a avaliação de ciclo de vida (ACV) ou, em inglês, *Life Cycle Assessment* (LCA). (NP EN ISO 14040, 2008)

A ACV aborda os aspetos ambientais e os potenciais impactos ambientais (por exemplo, utilização de recursos e consequências ambientais das emissões e descargas) ao longo do ciclo de vida do produto, desde a obtenção das matérias-primas, passando pela produção, utilização, tratamento no fim de vida, reciclagem e deposição final (ou seja, do “berço ao túmulo”). (NP EN ISO 14044, 2010)

A ACV e o Pensamento do Ciclo de Vida são as abordagens científicas por detrás das modernas políticas ambientais e de apoio à decisão de empresas relacionadas com o Consumo e Produção Sustentáveis (CPS). O Sistema Internacional de Dados de Referência de Ciclo de Vida (ILCD) fornece uma base comum consistente, robusta e de qualidade garantida para os dados e estudos de ciclo de vida. Estes dados e estudos suportam coerentemente os instrumentos do CPS, como o Rótulo Ecológico (*Ecolabelling*), o Ecodesign, a pegada de carbono (ou pegada ecológica) e os contratos públicos ecológicos (*Green Public Procurement*). (ILCD, março 2010)

A ACV pode ter uma grande importância e utilidade:

- Na identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida;
- Na informação aos decisores na indústria, em organizações governamentais e não-governamentais (por exemplo, no planeamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou reformulação de produtos ou processos);

- Na seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição;
- No marketing (por exemplo, na implementação de esquemas de rotulagem ecológica, realização de alegação ambiental ou elaboração de declaração ambiental de produto). (NP EN ISO 14040, 2008)

### **1.1 Avaliação de Ciclo de Vida**

A ACV é um método estruturado, abrangente e padronizado internacionalmente que quantifica todas as emissões pertinentes e os recursos consumidos, assim como os impactes ambientais, os impactes na saúde e as questões relacionadas com o esgotamento de recursos que estão associadas à produção de bens ou serviços, ou genericamente, a “produtos”. (ILCD, março 2010)

A ACV é uma técnica de gestão ambiental que tem em consideração o ciclo de vida completo de um produto: desde a extração de recursos ou matérias-primas, passando pela produção, utilização desse produto e pela sua reciclagem, até à eliminação dos resíduos resultantes de todo o ciclo. (ILCD, março 2010)

O estudo dos impactes ambientais de produtos de consumo começaram a surgir no final da década de 60 e início da década 70 do século XX, onde esse estudo visava essencialmente a comparação entre produtos alternativos com, tipicamente, uma série de características distintas. Um dos primeiros estudos (que na altura não foi publicado por questões de confidencialidade) que quantificava as necessidades de recursos e as emissões e resíduos de diferentes embalagens de Coca-Cola foi desenvolvido em 1969 pela MRI (*Midwest Research Institute*) que utilizou o termo REPA (*Resource and Environmental Profile Analysis - Análise de Recursos e Perfil Ambiental*) para este tipo de estudo baseado numa análise de sistemas da cadeia de produção dos produtos investigados "do berço ao túmulo". (Guinée *et al.*, 2011)

Nos anos 1980 e 1990 começou a existir a perceção de que grande parte dos impactes ambientais desses produtos não era devida à sua utilização, mas sim à sua produção, transporte e deposição. Então, a importância de se abordar o ciclo de vida de um produto, ou de vários produtos alternativos, começou a ter significância, aparecendo a ideia de

compilar e avaliar as entradas e saídas e os potenciais impactes ambientais de um sistema de produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. (Guinée *et al.*, 2011)

Assim, segundo os autores do artigo referido no parágrafo anterior, a ACV tem um passado, um presente e um futuro que, de uma forma resumida, se traduzem:

- Passado da ACV (1970-2000), que pode ser dividido em dois períodos distintos:

1970-1990: Décadas da Conceção, em que aparecem os primeiros estudos que são agora reconhecidos como dados (parciais) de ACV. Neste período, as questões ambientais como a limitação de recursos, a eficiência energética e o controlo da poluição tornaram-se de grande interesse público. Após um período de desinteresse público em que pouco se publicou sobre ACV, surge um crescente interesse por este tema a partir de anos 80 do século passado, tendo o Swiss Federal Laboratories de Materials Testing e Research (EMPA) em 1984 publicado um relatório onde apresentava uma lista abrangente dos dados necessários para estudos de ACV. Este período ficou marcado por abordagens, terminologias, métodos e resultados divergentes, devido à falta de plataformas internacionais para discussão da ACV.

1990-2000: Década de Normalização, em que se verificou um notável crescimento científico e coordenação de atividades em todo o mundo, que se refletiu no número de encontros e artigos científicos produzidos, começando a aparecer as primeiras revistas científicas da especialidade. Através das suas filiais norte-americanas e europeias, a Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) começou a coordenar e a reunir profissionais, utilizadores e cientistas para colaborarem na melhoria contínua e harmonização da metodologia e terminologia da ACV. Também a Organização Internacional para Normalização (ISO) tem estado envolvida desde 1994 na ACV, adotando a tarefa formal de normalização de métodos e procedimentos. Durante este período, a ACV passou a fazer parte da legislação, como é exemplo da Diretiva 94/62/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 20 de Dezembro de 1994 relativa a embalagens e resíduos de embalagens.

➤ Presente da ACV (2000-2010): Década de Elaboração.

Na primeira década do século XXI foi dada uma crescente atenção à ACV: por exemplo, em 2002, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e a SETAC lançaram uma parceria internacional de ciclo de vida, conhecida como Iniciativa de Ciclo de Vida, cujos principais objetivos foram a colocação do conceito de ciclo de vida em prática e o melhoramento das ferramentas de apoio, através de dados mais viáveis e melhores indicadores. O pensamento de ciclo da vida começou a ter cada vez mais importância na Política Europeia, como demonstrado através da Comunicação da Comissão das Comunidades Europeias sobre Política Integrada de Produtos. O conceito de ciclo de vida também foi incorporado, por exemplo, na temática estratégica sobre a Utilização Sustentável dos Recursos e Prevenção e Reciclagem de Resíduos. Em 2005 foi criada a Plataforma Europeia sobre a Avaliação do Ciclo de Vida com a missão de promover a disponibilidade, o intercâmbio e a utilização de dados de ciclo de vida com garantia de qualidade, métodos e estudos de apoio à decisão na política pública e nos negócios da União Europeia. Em 2006, a Comissão Europeia patrocinou o projeto CALCAS, de modo a estruturar as diversas abordagens de ACV e definir linhas de orientação e programas para promover a ACV, quando necessário. Um dos principais resultados deste estudo foi a necessidade do estabelecimento de um quadro para a Análise de Sustentabilidade de Ciclo de Vida (ASCV).

➤ Futuro da ACV (2010-2020): Década da Análise de Sustentabilidade de Ciclo de Vida.

O quadro da ASCV amplia o âmbito da aplicação da atual ACV, principalmente a partir de impactos ambientais para cobrir todas as três dimensões da sustentabilidade (pessoas, planeta e prosperidade). Isto também alarga o âmbito de questões predominantemente relacionadas com o produto (nível de produto) para questões relacionadas com o setor (nível de setor) ou mesmo para níveis económicos ainda mais abrangentes (nível económico). Além disso, aprofunda a atual ACV de forma a incluir diferentes relações tecnológicas, como são exemplos, as físicas (incluindo limitações nos recursos e solo disponível), as relações económicas e as comportamentais, entre outras. Pode aprofundar também aspetos normativos e ponderação, sendo que a sustentabilidade fraca *versus* forte também pode ser explicitamente incorporada. Ao contrário da ACV que é apenas um

modelo por si só, uma ASCV é uma integração transdisciplinar de modelos que trabalha com uma infinidade de disciplinas de modelos e guias, selecionando os mais adequados, dada uma questão específica de sustentabilidade. (Guinée *et al.*, 2011)

Para se atingir uma produção mais sustentável e os padrões de consumo têm que consideradas as implicações ambientais de toda a cadeia de fornecimento de produtos, bens e serviços, os seus usos e a gestão de resíduos, ou seja, todo o seu ciclo de vida "do berço ao túmulo" (*Cradle to grave*). (ILCD, março 2010)

No entanto, nem sempre é possível escolher fonteiras que incluam todo o ciclo de vida de um produto "do berço ao túmulo". Para se definir os limites do sistema corretamente existe, por vezes, a necessidade de se considerar certos critérios de corte. Assim, além, da opção "do berço ao túmulo", existem mais três opções principais para definir os limites do sistema utilizados e que são:

- "Do berço à porta da fábrica" (*Cradle to Gate*): inclui todos os processos desde a extração de matérias-primas até à fase de produção do produto; utilizada para determinar o impacte ambiental da produção de um produto.
- "Da porta da fábrica ao túmulo" (*Gate to Grave*): inclui os processos de uso e as fases de fim de vida; usada para determinar os impactes ambientais de um produto após sair da fábrica que o produz;
- "Da porta à porta" (*Gate to Gate*): inclui os processos a partir apenas da fase de produção; é utilizada para determinar os impactes ambientais de uma única etapa de produção ou processo. (GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1)

Na comunicação sobre Política Integrada do Produto (PIP), a Comissão Europeia comprometeu-se a produzir um manual de boas práticas em ACV. O Consumo Sustentável e o Plano de Ação de Produção confirmou que "(...) os dados consistentes e confiáveis e os métodos são necessários para avaliar o desempenho ambiental global dos produtos (...)". O Manual do Sistema Internacional de Dados de Referência do Ciclo de Vida fornece a governos e empresas uma base para assegurar a qualidade e a consistência dos dados do ciclo de vida, métodos e avaliações. (ILCD, março 2010)

A ACV é uma ferramenta vital e poderosa de apoio à decisão que complementa outros métodos que são igualmente necessários para ajudar eficaz e eficientemente o consumo e a produção mais sustentáveis. (ILCD, março 2010)

## **1.2 Normalização**

Os princípios e enquadramento da metodologia de ACV são definidos na norma NP EN ISO 14040:2008 e os requisitos e linhas de orientação, para quem pretende efetuar um estudo deste tipo, estão normalizados através da norma NP EN ISO 14044:2010.

A ACV é também uma componente importante das declarações ambientais de produto que são efetuadas para os mais diversos materiais, seguindo as recomendações da norma NP EN ISO 14025:2009 onde são definidos os princípios e procedimentos para a elaboração de rótulos e declarações ambientais do Tipo III.

## **1.3 Fases de ciclo de vida**

A metodologia ACV baseia-se na construção de um modelo, no qual as etapas do ciclo de vida são representadas por processos unitários, que estão interligados por fluxos de produtos, energia e materiais. Ao conjunto de processos unitários designa-se por sistema do produto, que está relacionado com o ambiente, uma vez que utiliza os seus recursos naturais e liberta, para o ambiente, emissões e resíduos.

Um estudo de ACV é constituído por quatro etapas:

- Etapa 1: Fase de definição do objetivo e do âmbito

Nesta primeira fase são definidos o objetivo e o âmbito do estudo de ACV. O objetivo inclui a aplicação pretendida e as razões que levam à realização da ACV, bem como o público-alvo; o âmbito, por sua vez, é onde se define a fronteira do sistema e o nível de detalhe de uma ACV que depende do objeto e da utilização pretendida para o estudo.

➤ Etapa 2: Fase do inventário

A fase do inventário do ciclo de vida (ICV) constitui a segunda fase da ACV. É um inventário dos dados de entrada/saída, relativos ao sistema em estudo. Envolve a recolha dos dados necessários para atingir os objetivos do estudo definido.

➤ Etapa 3: Fase de avaliação de impacto

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase da ACV. A finalidade da AICV é fornecer informação adicional que auxilie a avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto para melhor compreender a sua significância ambiental.

➤ Etapa 4: Fase de interpretação.

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento da ACV na qual os resultados de um ICV ou de uma AICV, ou ambos, são reunidos e discutidos como uma base para conclusões, recomendações e tomada de decisões de acordo com a definição do objetivo e do âmbito. (NP EN ISO 14040:2008).

Na figura 1.1 estão representadas as diversas fases de uma ACV, assim como as suas interligações.

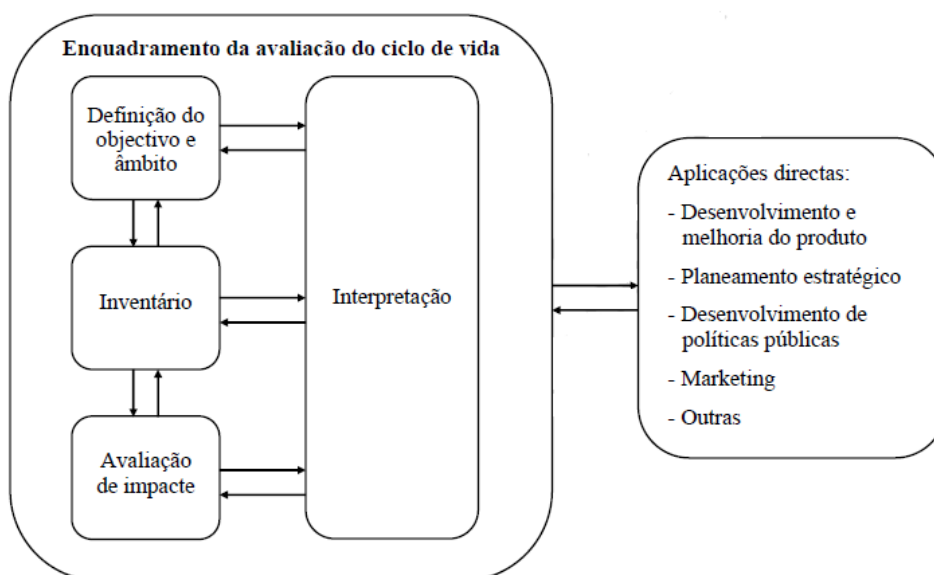


Figura 1.1 – Fases de uma ACV

(NP EN ISO 14044: 2010)

Descrevem-se, de seguida, estas quatro fases de uma ACV com mais pormenor.

### **1.3.1 Fase de definição do objetivo e âmbito**

Nesta primeira fase, relativamente aos objetivos da ACV, devem ser definidas, de forma clara, as razões pelas quais se vai elaborar esta análise. Também deve ser definida a aplicação pretendida, pois uma ACV pode ser utilizada em muitas aplicações (marketing, desenvolvimento de produto, melhoria de produto, planeamento estratégico, entre outras). O público-alvo, ou seja, os destinatários do relatório da ACV, que podem ser acionistas, executivos, engenheiros, consumidores ou outros, é outro item que deve estar claro logo que se inicia o processo de análise.

Os objetivos também vão influenciar o âmbito, pois caso o estudo de destine a ser publicado, o âmbito será mais abrangente e requer um maior esforço na recolha de dados e um processo de revisão final, designada por revisão crítica.

Na definição do âmbito da ACV, o sistema produto que está a ser analisado, assim como as funções do sistema de produto (ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas), devem ser caracterizados. Também se devem detalhar todos os pressupostos, as escolhas de valor e elementos opcionais, os requisitos de dados e de qualidade de dados. A metodologia de AICV (e os impactes) a usar deve ser definida, assim como:

- A unidade funcional, ou seja, o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência;
- A fronteira do sistema, isto é, o conjunto de critérios que especificam quais os processos unitários que fazem parte de um sistema de produto;
- Os procedimentos de alocação, que são procedimentos de imputação dos fluxos de entrada ou de saída de um processo, ou de um sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e, um ou mais, outros sistemas de produto.

Além disto, devem ser descritas as limitações, tipo de revisão crítica (caso seja necessário efetuar-las); o tipo e o formato do relatório requerido para o estudo; e, a interpretação a ser usada.

O objetivo e o âmbito poderão ter que ser revistos durante a elaboração da ACV, devido à sua iteratividade. (NP EN ISO 14040:2008 e NP EN ISO 14044:2010)

### **1.3.2 Fase de inventário**

A análise de inventário é a fase ACV que envolve a recolha, compilação e quantificação de todas as entradas e saídas para um determinado sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

Os dados qualitativos e quantitativos a incluir no inventário devem ser recolhidos para cada processo unitário incluído na fronteira do sistema e, para diminuir o risco de más interpretações, deve ser registada uma descrição dos dados recolhidos de cada processo unitário. Esses dados recolhidos podem ser medidos, calculados ou estimados.

Uma vez que a recolha dos dados poderá abranger vários locais e referências publicadas, deverão ser tomadas medidas para se chegar a um entendimento uniforme e consistente dos sistemas de produto a serem modelados.

O processo de realização de um ICV é iterativo e deve incluir as principais rubricas segundo as quais os dados poderão ser classificados, que são:

- Entradas de energia, entradas de matérias-primas, entradas de auxiliares ou outras entradas físicas;
- Produtos, coprodutos e resíduos;
- Emissões e descargas para o ar, água e solo;
- Outros aspetos ambientais.

Todos os procedimentos de cálculo de dados devem ser explicitamente documentados e os pressupostos devem ser claramente afirmados e explicados. Deve ser realizado um controlo da validade dos dados aquando do seu processo de recolha, para confirmar e fornecer evidência de que foram satisfeitos os requisitos de qualidade dos dados para a aplicação pretendida. A validação de dados recolhidos é um processo contínuo, que pode ser realizado através de balanços de massa ou de energia ou através de uma comparação com dados semelhantes.

Deve ser determinado um fluxo apropriado para cada processo unitário, sendo que os dados quantitativos de entrada e saída do processo unitário devem ser calculados em relação a este fluxo. Com base no fluxograma e nos fluxos entre os processos unitários, os fluxos de todos os processos unitários são relacionados com o fluxo de referência. O cálculo do ICV, que é realizado através de ferramentas informáticas específicas, deverá resultar na referência de todos os dados de entrada e saída do sistema à unidade funcional. (NP EN ISO 14040:2008 e NP EN ISO 14044:2010)

### **1.3.3 Fase de avaliação de impacte**

O objetivo da fase de avaliação do impacte é interpretar o consumo de recursos e as emissões de ciclo de vida em termos de indicadores para as áreas de proteção, ou seja, avaliar o impacte sobre as entidades que queremos proteger.

De acordo com a NP EN ISO 14044:2010 uma AICV corresponde à “fase da avaliação do ciclo de vida com o objetivo de compreender e avaliar a magnitude e significância dos impactes ambientais potenciais para um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto”.

Uma AICV é uma abordagem que se baseia numa unidade funcional, ou seja, uma unidade de referência que quantifica o desempenho de um sistema de produto para utilização, e é este facto que a diferencia de outras técnicas, como por exemplo: a avaliação do desempenho ambiental, a avaliação de impacte ambiental ou a avaliação do risco. De referir que, no entanto, a AICV poderá utilizar informação recolhida por essas outras técnicas.

Quando se pretende realizar um estudo de ACV, a fase de AICV deve ser cuidadosamente planeada de modo a que o objetivo e âmbito desse estudo sejam respeitados. Uma vez que todo o processo de ACV é iterativo e de forma a ter em conta possíveis omissões e fontes de incerteza, a fase de AICV deve ser coordenada com as outras fases da ACV.

A AICV inclui a recolha de resultados do indicador (ou indicador da categoria de impacte), que é uma representação quantificável de uma categoria de impacte, ou seja, de uma classe que representa questões ambientais dignas de preocupação à qual os resultados do ICV

poderão ser atribuídos, para as diferentes categorias de impacto. O conjunto das categorias de impacto representam o perfil de AICV do sistema de produto.

De uma forma simplificada, a AICV identifica e avalia a quantidade e a significância dos potenciais impactos ambientais decorrentes do ICV. As correntes de entrada e de saída são, em primeiro lugar, atribuídas a uma ou mais categorias de impacto, isto é, são classificadas, e os seus potenciais impactos são quantificados de acordo com os fatores de caracterização.

Na classificação, quando uma substância de uma determinada corrente contribui para mais do que uma categoria de impacto, deve ser classificada como contribuinte para todas as categorias de impacto relevantes. Por exemplo, como se pode observar na figura 1.2, o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> são ambos atribuídos à categoria de impacto "potencial de aquecimento global" (GWP), mas as emissões de NO<sub>x</sub> podem ser classificadas como contribuidoras para a "eutrofização" (EP) e "acidificação" (AP) e, por isso, o fluxo total será totalmente atribuídas a estas duas categorias.

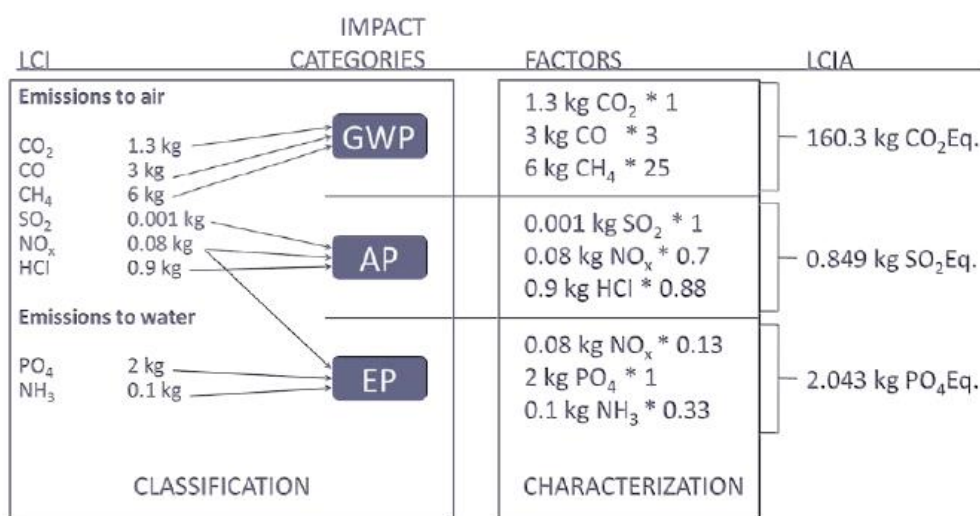


Figura 1.2 – Exemplo de classificação e caracterização de substâncias de determinadas correntes

(GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1)

Relativamente aos modelos de caracterização, que descrevem e quantificam o impacto ambiental do sistema de produto analisado, isto é, que refletem o mecanismo ambiental ao descrever a relação entre os resultados do ICV, indicadores de categoria e, em alguns

casos, do (s) impacte (s) final (ais) por categoria, são definidos os fatores de caracterização que dependem da corrente de emissão (cada emissão tem o seu próprio fator de caracterização) e do método de avaliação de categoria de impacte escolhido. Estes fatores têm que ser aplicados às quantidades relevantes. Como exemplo, observa-se através da figura 1.2 que a substância de referência para a categoria de impacte "potencial de aquecimento global" é o CO<sub>2</sub> e a unidade de referência é definida como "kg-equivalente de CO<sub>2</sub>", pelo que todas as emissões que contribuem para o "potencial de aquecimento global" são convertidos em kg-eq. de CO<sub>2</sub>.

A escolha das categorias de impacte, dos indicadores de categorias e dos modelos de caracterização dependem do objetivo do estudo de ACV. As categorias de impacte selecionadas devem abranger os efeitos ambientais do sistema de produto analisado. As escolhas das categorias de impacte e dos métodos de avaliação de impacte devem ser documentadas na definição do objetivo e âmbito da ACV.

Para cada categoria de impacte, os componentes necessários de uma AICV incluem:

- Identificação do(s) impacte(s) final(ais) por categoria;
- Definição do indicador de categoria para o(s) impacte(s) final(ais) por categoria;
- Identificação dos resultados do ICV apropriados que podem ser atribuídos à categoria de impacte, tendo em conta o indicador de categoria escolhido e o impacte(s) final(ais) por categoria identificado(s);
- Identificação do modelo de caracterização e dos fatores de caracterização.

A fase de AICV é composta por elementos obrigatórios e opcionais. Os elementos obrigatórios são:

- Seleção de categorias de impacte, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Imputação dos resultados do ICV às categorias de impacte selecionadas (classificação);
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

Quanto aos elementos opcionais, estes podem ser utilizados ou não consoante o objetivo e do âmbito da ACV. Podem facilitar a interpretação dos resultados de AICV e devem ser documentados de forma transparente. Estes elementos são descritos de seguida:

- **Normalização:** é o cálculo da magnitude dos resultados do indicador de categoria de impacte relativos à informação de referência - os resultados das categorias de impacte são comparados com referências a fim de distinguir o que é normal ou não, sendo estes resultados entidades não-dimensionais;

- **Agregação:** consiste em ordenar e possivelmente hierarquizar as categorias de impacte – podem ser ordenadas segundo as suas características (por exemplo: entradas e saídas, ou escalas espaciais locais, regionais ou globais) e classificadas segundo numa determinado critério (por exemplo: prioridade alta, média ou baixa) baseada em escolhas de valor;

- **Ponderação:** consiste em converter e possivelmente agregar os resultados do indicador nas categorias de impacte usando fatores numéricos baseados em escolhas de valor e não em princípios científicos, permanecendo os dados anteriores à ponderação disponíveis - é utilizada para comparar diferentes resultados dos indicadores de impacte de acordo com a sua importância e expressa em fatores de ponderação, que são avaliados através de inquéritos entre os diferentes grupos (por exemplo, especialistas, utilizadores, abordagem individual, população);

- **Análise da qualidade dos dados:** permite um melhor entendimento da fiabilidade da recolha de resultados do indicador, ou seja, permite uma melhor compreensão da significância, da incerteza e da sensibilidade dos resultados da AICV de forma a: permitir distinguir se estão presentes diferenças significativas; identificar resultados do ICV negligenciáveis; ou, orientar o processo iterativo da AICV. (NP EN ISO 14040:2008 e NP EN ISO 14044:2010)

### 1.3.3.1 Metodologias de AICV

Existem diferentes métodos que podem ser utilizados para realizar uma AICV. Estes métodos são continuamente investigados e desenvolvidos por diversos grupos científicos com base em diferentes metodologias.

Nos métodos de AICV são utilizadas duas abordagens principais para classificar e caracterizar os impactos ambientais: a orientada para o problema (*problem-oriented*) conhecida como abordagem de ponto médio (*midpoint*) e a orientada para os danos (*damage-oriented*) designada como abordagem de ponto final (*finalpoint*). Na abordagem orientada para o problema, os fluxos são classificados como pertencentes a categorias de impacto ambiental para a qual contribuem. Os métodos orientados para danos também têm início com classificação de fluxos de um sistema em várias categorias de impacto, mas as categorias de impacto são também agrupadas de modo a pertencerem a categorias de ponto final como, por exemplo, os danos para a saúde humana, danos para a qualidade do ecossistema ou os danos para recursos. (GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1)

Descrevem-se, de seguida, alguns métodos de AICV.

➤ CML2001

Este método foi criado em 2001 pela Universidade de Leiden, na Holanda, no seu Centro de Estudos Ambientais e está publicado num manual escrito por vários autores. É baseado numa série de categorias de impactos ambientais expressos em termos de emissões para o ambiente e restringe a modelação quantitativa aos estágios iniciais da cadeia de causa-efeito para limitar incertezas.

A metodologia CML2001 utiliza as abordagens de *midpoint* e *endpoint* para classificar e caracterizar os impactos ambientais. Os resultados são agrupados em categorias de ponto médio de acordo com mecanismos comuns (por exemplo, mudanças climáticas) ou agrupamentos normalmente aceites (por exemplo, ecotoxicidade). A metodologia inclui classificação, caracterização e normalização, sendo os fatores de caracterização atualizados quando estão disponíveis novos conhecimentos sobre determinada substância e os fatores de normalização calculados através de emissões totais de substância e fatores de caracterização por substância.

O método tem categorias de impacto base e não base, sendo as primeiras as categorias mais comuns utilizadas em ACV e que são: acidificação; alterações climáticas; depleção de recursos abióticos; ecotoxicidade; eutrofização; toxicidade humana; diminuição da camada de ozono e oxidação fotoquímica. (Guinée *et al.*, 2002; Acero *et al.*, 2014)



➤ Eco-Indicator 99

O Eco-Indicator 99 é, provavelmente, um dos métodos de avaliação de impactos mais utilizados em ACV. É uma substituição do método Eco-indicador 95, que foi o primeiro método de avaliação com abordagem orientada para os danos e foi desenvolvido pelo mesmo grupo de investigadores que desenvolveram o CML2001.

Esse método analisa três diferentes tipos de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos. Uma das suas características mais importantes é que a unidade padrão para todas as categorias de impacto é ponto (Pt) ou miliponto (mPt): como o objetivo deste método é a comparação de produtos ou componentes, o valor por si só não é mais relevante do que a comparação de valores.

O Eco-Indicator 99 distingue três perspetivas culturais diferentes: a hierárquica (H) que é a padrão e que se baseia na maioria dos princípios da política comum relativamente a prazos e outras questões (por exemplo, a categoria de impacto “aquecimento global a 100 anos”, GWP100); a individualista (I) que é baseada no interesse a curto prazo; e a igualitária (E) que é aquela que é mais preocupante, pois ao utilizar prazos de tempo mais alargados, os tipos de impacto podem ainda não estar totalmente estabelecidos (por exemplo, GWP500 ou o tempo infinito para a destruição da camada de ozono – ODOInf)

O método contém diferentes fatores de normalização e de ponderação para as várias perspetivas e uma abordagem de média para a Europa. Para o cálculo da categoria de danos do ecossistema, é aplicado um fator de 0,1 à categoria de impacto ecotoxicidade e para o resto das categorias de impacto é aplicado um fator de 1. (Acero *et al.*, 2014)

➤ Ecological Scarcity Method 2006

O Método da Escassez Ecológica calcula os impactos ambientais, como as emissões de poluentes e o consumo de recursos, através da aplicação dos chamados “eco-fatores” (ou fatores ecológicos) que dependem da substância e são definidos a partir do direito ambiental ou de metas políticas.

O principal objetivo deste método é comparar produtos e melhorar processos e/ou produtos e quanto mais o nível de emissões ou o consumo de recursos exceder os valores estabelecidos, maior é o eco-fator que é expresso em eco-pontos. (Acero *et al.*, 2014)

➤ EDIP 2003

O Desenvolvimento Ambiental de Produtos Industriais (*Environmental Development of Industrial Products*) é um método desenvolvido pelo Instituto de Desenvolvimento de Produto da Universidade Técnica da Dinamarca. O EDIP 2003 veio substituir o método EDIP 1997 e a principal inovação reside na possibilidade de exposição do modelo de caracterização das categorias de impacto não globais (acidificação, formação de ozono fotoquímico, ecotoxicidade, toxicidade humana, ruído).

O EDIP 2003 considera as características do meio recetor num esforço para aumentar a relevância dos impactos calculados. O método tem os seguintes grupos de categorias de impacto: acidificação; alterações climáticas; ecotoxicidade; eutrofização; toxicidade humana; diminuição da camada de ozono e oxidação fotoquímica. (Acero *et al.*, 2014)

➤ ILCD 2011

O ILCD é o resultado de um projeto realizado pelo Centro Comum de Investigação (JRC) da Comissão Europeia que analisou várias metodologias de avaliação de impactos do ciclo de vida de modo a chegar a um consenso sobre o método recomendado para cada tema ambiental, tanto de abordagem orientada para o problema como de abordagem orientada para os danos. As categorias de *endpoint* intermédias foram agrupadas em três áreas de proteção: saúde humana, esgotamento dos recursos e ecossistemas. (Acero *et al.*, 2014; ILCD, 2010)

➤ ReCiPe

A metodologia ReCiPe foi desenvolvida pelo mesmo grupo de investigadores das metodologias CML 2001 e Ecoindicator 99, podendo ser vista como uma fusão destas duas metodologias, pois tem os indicadores *midpoint* da CML e os indicadores de *endpoint* da Ecoindicator, permitindo ao utilizador a escolha do nível de resultados que pretende. Todos estes indicadores estão disponíveis em três versões, tendo em conta três perspetivas culturais diferentes: individualista, hierárquica e igualitária. Relativamente à abordagem baseada em danos, as categorias de *endpoint* foram agrupadas em três grupos de proteção: saúde humana, ecossistemas e disponibilidade de recursos. (Acero *et al.*, 2014)

➤ TRACI 2.1

A metodologia TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts* - Ferramenta para a Redução e Avaliação de Produtos Químicos e outros Impactes Ambientais) foi desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA – *Environmental Protection Agency*) com o objetivo de auxiliar as avaliações de impactes por métricas de sustentabilidade, avaliação do ciclo de vida, ecologia industrial, design de processos e prevenção da poluição.

Esta metodologia foi desenvolvida especificamente para os Estados Unidos através de parâmetros de entrada consistentes com localizações nos Estados Unidos para os seguintes grupos de categorias de impacte: acidificação, ecotoxicidade, eutrofização, alterações climáticas, toxicidade humana, diminuição da camada de ozono e depleção de recursos.

É uma metodologia orientada para o problema que utiliza simples sequências de causa-efeito para mostrar o ponto em que cada categoria de impacte é caracterizada. (Acero *et al.*, 2014)

➤ USEtox

A metodologia USEtox foi desenvolvida no âmbito do Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP) e da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) designado por “Iniciativa do Ciclo de Vida”.

USEtox é um método para calcular os impactes ambientais baseado no consenso científico de modo a identificar e a obter valores de impactes de toxicidade humana e de ecotoxicidade de produtos químicos na AICV, através de três etapas: destino ambiental, onde a distribuição e degradação de cada substância é modelado; exposição, onde a exposição dos seres humanos, animais e plantas são modelados; e, efeitos, onde os danos provocados por determinada substância são pesquisados.

O modelo USEtox opera em duas escalas: a escala continental e a escala global. A escala continental subdivide-se em: ar urbano, ar rural, solo agrícola, solo natural, água doce e água marinha costeira. A escala global tem a mesma estrutura, mas sem considerar o ar urbano.

Nesta metodologia, os fatores com efeito humano relacionam o risco potencial de efeitos cancerígenos e não-cancerígenos com a quantidade (kg) de produto químico emitido e a unidade final é Unidade Tóxica Comparativa - CTUh; por outro lado, os fatores com efeito para os ecossistemas aquáticos são baseados em dados específicos da concentração da espécie na qual 50% de uma população exhibe um efeito, expressa como uma estimativa da fração potencialmente afetada de espécies (PAF- *affected fraction of species*) ao longo do tempo e volume por unidade de massa de um produto químico emitido (PAF- $\text{m}^3 \text{ dia kg}^{-1}$ ), sendo a unidade final a Unidades Tóxicas Comparativas -CTUe. (Acero *et al.*, 2014)

### 1.3.3.2 Categorias de impactes

#### ➤ Acidificação

A categoria de impacte “Acidificação” refere-se literalmente a processos que aumentam a acidez dos sistemas de água e do solo por concentração de iões de hidrogénio e aborda os impactes decorrentes da acidificação gerada pela emissão de substâncias acidificantes transportados pelo ar. Estas substâncias são produzidas devido às emissões de óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e amoníaco (NH<sub>3</sub>), sendo o amoníaco depois nitrificado no solo. Estas substâncias ao reagirem com a água da atmosfera formam as chamadas “chuvas ácidas”, sendo este processo também conhecido como deposição de ácido.

O potencial de acidificação é expresso utilizando como unidade de referência o equivalente-kg de SO<sub>2</sub>. (ILCD, 2010)

#### ➤ Alterações climáticas

Esta categoria de impacte pode ser definida como a variação da temperatura global do planeta causada pelo efeito de estufa resultante da emissão de "gases com efeito de estufa", ou sejam, gases que contêm substâncias com a capacidade de absorver a radiação infravermelha da Terra e que são gerados pela atividade humana. Este aumento da temperatura global está fortemente associado às alterações climáticas da Terra, podendo muito provavelmente conduzir à desertificação, à subida do nível do mar e à propagação de doenças.

As alterações climáticas envolvem uma série de mecanismos ambientais que afetam as áreas de proteção “saúde humana” e “meio ambiente”. Traduzem um dos principais efeitos ambientais da atividade económica e é das categorias de impacte mais difíceis de modelar devido à sua ampla escala.

Os modelos de caracterização desenvolvidos para traduzir esta categoria de impacte têm, em geral, como objetivo avaliar o impacte futuro sobre o clima e são consequência de diferentes cenários políticos. Os mecanismos ambientais utilizados têm uma estrutura um pouco diferente quando comparados com os passos de destino, efeitos e danos aplicados a outras categorias de impacte, devido ao facto dos gases com efeito estufa serem substâncias com a capacidade de absorver a radiação infravermelha da Terra, capacidade esta designada como “forçamento radiativo”. Um dos modelos de caracterização da categoria de impacte “Alterações climáticas” é o mundialmente reconhecido Modelo de Berna que foi desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Este modelo calcula o forçamento radioativo de uma emissão (de qualquer gás com efeito de estufa) tendo em conta a concentração e particularmente o tempo de permanência da substância no ambiente, classificando estes gases como potenciais contribuidores para o aquecimento global (GWPs - *Global Warming Potentials*).

O IPCC recomenda os GWPs como os fatores de caracterização para a categoria de impacte “Alterações climáticas” e como unidade de referência o equivalente-kg CO<sub>2</sub>, em que o fator mais comumente utilizado é o potencial de aquecimento global a 100 anos (GWP100). (ILCD, 2010)

➤ Depleção de recursos

Existem muitos diferentes sub-impactes que podem ser considerados nesta categoria, mas de uma maneira geral, ela refere-se ao consumo de recursos não-biológicos, tais como combustíveis fósseis, minerais, metais, água, entre outros.

A depleção ou esgotamento de recursos abióticos é a diminuição da disponibilidade da reserva total de funções potenciais de recursos, devido à sua taxa de utilização para além do que é restituído.

Esta categoria de impacto engloba o efeito sobre os recursos renováveis e não renováveis: a depleção de minerais e combustíveis fósseis enquadra-se na categoria recursos não-renováveis; por outro lado, os recursos abióticos como, por exemplo, a extração de água e o vento, e a madeira (biótico) estão incluídos na categoria de recursos renováveis.

Os efeitos da extração de uma certa quantidade de um recurso podem ser modelados com base na energia ou massa, na entropia, nas consequências futuras da extração de recursos (escassez ou necessidade extra de energia para a extração) e na utilização de reservas.

O valor do consumo de recursos abióticos de uma substância (por exemplo, lenhite ou de carvão) é uma medida da escassez dessa substância, significando que depende da quantidade de recursos e da taxa de extração. Assim, esse valor é formado pela quantidade de recursos que estão esgotados e medidos em equivalentes de antimónio, em alguns modelos, ou pelo consumo de água (em m<sup>3</sup>), depleção mineral (em kg) e combustíveis fósseis (em MJ), noutros modelos. (ILCD, 2010)

#### ➤ Ecotoxicidade

A ecotoxicidade, ou toxicidade ambiental, deve-se ao facto da emissão de algumas substâncias, como os metais pesados, poderem ter impactos sobre o ecossistema. Esta categoria de impacto é medida com base em três categorias de impacto separadas que analisam os impactos das substâncias tóxicas sobre: a água doce de ecossistemas aquáticos, os ecossistemas marinhos e terrestres.

Os fatores de caracterização são expressos utilizando o equivalente-kg de 1,4 – diclorobenzeno (1,4-DB) como de unidade de referência.

Os modelos e fatores de caracterização para efeitos de toxicidade em ACV devem ser baseados em modelos que representem o destino de uma substância tóxica no ambiente, assim como a exposição, as espécies e as diferenças na resposta toxicológica (probabilidade de efeitos e gravidade), isto é, devem ser baseados no risco relativo e nas consequências que a libertação de substâncias tóxicas têm no ambiente. (ILCD, 2010)

#### ➤ Eutrofização

Esta categoria de impacto aparece muitas vezes designada como nutrificação ou enriquecimento de nutrientes. A eutrofização traduz-se nos impactes que a acumulação de macronutrientes, fósforo e azoto em formas biodisponíveis têm sobre ecossistemas aquáticos e terrestres. Esta acumulação leva a um crescimento excessivo de plantas, como as algas ou as macrófitas, em rios o que provoca uma diminuição da qualidade da água e uma redução das populações de animais.

A eutrofização é expressa em equivalente-kg de  $PO_4$  como unidade de referência. As emissões de amoníaco, nitratos, óxidos de azoto e fósforo para o ar ou para a água contribuem todas para esta categoria.

Nesta categoria de impacto, quer os impactes diretos de fertilizantes, quer os indiretos, estão incluídos no método: os impactes diretos são os resultantes da produção de fertilizantes e os indiretos são calculados utilizando o método do IPCC para estimar as emissões para a água que causam eutrofização. (ILCD, 2010)

➤ Toxicidade humana

O potencial de toxicidade humana é um índice calculado que reflete o dano potencial de uma unidade de uma substância química libertada no ambiente. Baseia-se na toxicidade inerente de um composto e na sua dose potencial. O potencial cancerígeno de uma substância é medido em equivalentes-kg de 1,4-diclorobenzeno.

O arsénio, o dicromato de sódio e o fluoreto de hidrogénio que são subprodutos provenientes, principalmente, da produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, são substâncias potencialmente perigosas para os seres humanos por inalação, ingestão e até mesmo contato com a pele.

Os modelos de caracterização e fatores de ACV para efeitos tóxicos devem representar o destino da substância química no ambiente, a exposição humana e as diferenças na resposta toxicológica (probabilidade e gravidade de efeitos). (ILCD, 2010)

➤ Radiação ionizante

Esta categoria de impacto está relacionada com as emissões de radionuclídeos durante o ciclo de vida de um produto. Provocam danos na saúde humana e nos ecossistemas.

As radiações ionizantes incluem os tipos de radiação  $\alpha$ -,  $\beta$ -, raios- $\gamma$  e neutrões. A modelação desta categoria de impactes começa com libertações no ponto de emissão, expressa em Becquerel (Bq), e calcula o destino radiativo e a exposição, com base no conhecimento detalhado da física nuclear. A unidade de referência do impacte é o kg de urânio-235 ( $U_{235}$ ).

Para a toxicidade humana, a análise da exposição calcula a dose que um ser humano realmente absorve, designada por dose eficaz. Esta tem como unidade o Sievert (Sv) e é determinada com base em fatores de equivalência do corpo humano para os diferentes tipos de radiação ionizante.

Para os impactes sobre os ecossistemas, a ecotoxicidade baseia-se na concentração de substâncias perigosas que afetam 50% das espécies ( $HC_{50}$ ) com 50% do seu efeito ( $EC_{50}$ ) e no conceito de mudança na fração potencialmente afetada (PAF), adaptado para substâncias radioativas. (ILCD, 2010)

➤ Uso do solo

A categoria de impacte “Uso do solo” reflete os danos nos ecossistemas devido aos efeitos da ocupação e transformação do solo, como são exemplo a produção agrícola, a extração mineral e a ocupação humana. A ocupação do solo pode ser definida como a manutenção de uma área num estado em particular ao longo de um determinado período de tempo e a transformação pode ser definida como a conversão de solos de um estado para outro. Muitas vezes, a transformação é seguida de ocupação, ou a ocupação tem lugar numa área que tenha sido previamente transformada.

O dano é expresso como "fração de espécies potencialmente desaparecidas" (PDF) por  $m^2$  ou  $m^2a$  (metro quadrado de solo por ano). Os impactes do uso do solo em estudos de ACV são calculados através da multiplicação desse fator de caracterização pela ocupação do solo, de acordo com a fórmula:

$$\text{Impacte ocupação} = \text{ocupação do solo} (m^2a) \times \text{fator caracterização} (PDF/m^2)$$

(ILCD, 2010)

➤ Diminuição da camada de ozono

O ozono é continuamente formado e destruído pela luz solar e por reações químicas na estratosfera. A diminuição da camada de ozono ocorre quando a sua taxa de destruição é maior do que a sua taxa de formação, situação que acontece devido à existência de substâncias antropogênicas que persistem na atmosfera e que destabilizam esse equilíbrio.

O ozono estratosférico corresponde a 90% do total do ozono existente na atmosfera e é vital para a vida, pois impede radiação solar UV-B, que é prejudicial, de penetrar nos níveis mais baixos da atmosfera. Esta radiação UV-B, abaixo dos 300 nm, atinge a troposfera e a superfície da terra podendo aumentar o risco de cancro e de cataratas, caso não sejam tomadas as devidas precauções. Além disto, a radiação UV-B é responsável pelo envelhecimento precoce, supressão do sistema imunitário e pode também danificar a vida das plantas terrestres e ecossistemas aquáticos.

O modelo de caracterização para esta categoria de impacto foi desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial e define o potencial de destruição da camada do ozono de diferentes gases em relação à substância de referência clorofluorcarbono-11 (CFC-11), expressos em equivalente-kg CFC-11.

Os gases que contribuem para a diminuição da camada de ozono são os provenientes de compostos clorados e bromados que são estáveis o suficiente para atingir a estratosfera. Os átomos de cloro provêm essencialmente de clorofluorcarbonetos (CFCs) e os átomos de bromo de hidrocarbonetos halogenados (halons). (ILCD, 2010)

➤ Matéria particulada / inorgânicos respiráveis

Esta categoria de impacto “matéria particulada” representa uma mistura complexa de partículas extremamente pequenas. A poluição por partículas é devida a várias substâncias, incluindo ácidos (tais como os nitratos e sulfatos), substâncias orgânicas, metais e partículas do solo ou de poeira.

O material particulado pode ser medido de várias formas: total de partículas em suspensão (PTS), partículas de diâmetro inferior a 10 µm (PM10), partículas em suspensão com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM2,5) ou partículas com diâmetro inferior a 0,1 µm (PM0,1).

A poluição devida a partículas é responsável por um grande número de problemas de saúde, especialmente do trato respiratório. O material particulado é medido em equivalentes de PM10. (ILCD, 2010)

➤ Formação fotoquímica de ozono (ou oxidação fotoquímica)

O ozono fotoquímico, também chamado de "ozono ao nível do solo", é formado devido à reação de compostos orgânicos voláteis e de óxidos de azoto na presença de calor e luz solar e, além de ser tóxico para o Homem concentrações elevadas, provoca danos na vegetação e nos materiais.

Esta categoria de impacto depende em grande medida das quantidades de monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), amónio e NMVOC (compostos orgânicos voláteis não metanados) existentes na atmosfera e do tempo e características das condições locais.

O potencial de formação fotoquímica de ozono (POCP - *Photo-chemical Ozone Creation Potential*), também conhecido como *smog* de Verão, para emissão de substâncias para a atmosfera é calculado através do modelo de trajetória (incluindo o destino) da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) e é expresso usando a unidade de referência o equivalente-kg de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). (ILCD, 2010)

### 1.3.4 Fase de interpretação

Na fase de interpretação do ciclo de vida de uma ACV ou de um estudo de ICV são avaliados e verificados os resultados obtidos de modo a observar a sua consistência relativamente à definição do objetivo e do âmbito do estudo

Esta fase compreende vários elementos, dos quais se destacam:

- Identificação dos aspetos significativos com base nos resultados das fases de ICV e de AICV da ACV;
- Avaliação que considere controlos de integralidade, sensibilidade e coerência;
- Conclusões, limitações e recomendações.

A interpretação deve também, em relação ao objetivo do estudo, considerar:

- A adequação das definições das funções do sistema, da unidade funcional e da fronteira do sistema;
- Limitações identificadas pela avaliação da qualidade dos dados e pela análise de sensibilidade. (NP EN ISO 14044:2010)

A definição do objetivo e do âmbito e as fases de interpretação da ACV enquadram o estudo, enquanto as outras fases da ACV (ICV e AICV) produzem informação sobre o sistema de produto.

A interpretação do ciclo de vida, tal como todas as outras fases, é um processo iterativo, que inclui duas etapas principais:

1. Identificação de questões importantes:

Nesta etapa são estruturados os resultados obtidos a partir do ICV e da AICV e identificadas as questões importantes ou elementos de dados que mais contribuem para os resultados. Esta identificação de questões significativas orienta a etapa de avaliação.

2. Avaliação

O seu objetivo é o de aumentar a confiabilidade do estudo. Para tal, devem se utilizadas seguintes técnicas:

- Controlo da integralidade: tem como objetivo assegurar que toda a informação e dados relevantes necessários para a interpretação estão disponíveis e completos, de modo a satisfazer o objetivo e o âmbito do estudo. Caso alguma informação esteja em falta ou incompleta deve ser adicionada ou recalculada ou, alternativamente, devem ser ajustadas as definições do objetivo e do âmbito. No caso de se concluir que a informação em falta não é necessária, devem ser registadas essas conclusões.
- Controlo da sensibilidade: determina a forma como os resultados são afetados devido às incertezas nos dados, suposições, métodos de alocação, procedimentos de cálculo, *etc.*. O seu objetivo é pois avaliar a fiabilidade dos resultados finais e conclusões. Esta técnica é importante quando se comparam diferentes alternativas.

- Controlo de coerência: o seu objetivo é determinar se os pressupostos, métodos e dados são coerentes com o objetivo e o âmbito do estudo. Devem ser tidas em conta algumas questões relevantes, relacionadas com: a qualidade dos dados, os limites do sistema, regras de alocação e avaliação de impactes. (NP EN ISO 14044:2010, GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1)

Após estas duas etapas, devem ser retiradas conclusões, identificadas limitações e devem ser feitas recomendações para o público-alvo da ACV.

Numa fase seguinte à interpretação deve ser elaborado um relatório, onde todos os resultados da ACV devem ser apresentados de forma clara, transparente e estruturada e estar de acordo com as recomendações da NP EN ISO 14044:2010.

Quando se realiza um estudo de ACV, especialmente quando essa ACV tem como objetivo a comparação de produtos para a divulgação pública, é aconselhável efetuar uma revisão crítica para evitar más interpretações ou efeitos negativos nas partes interessadas externas. Esta revisão crítica pode ser realizada por peritos externos ou internos, ou por um painel de partes interessadas.

## 2. Revisão bibliográfica

Hoje em dia, a indústria automóvel é considerada uma das indústrias mais influentes do Mundo. Por este motivo, quer os fabricantes de peças para a essa indústria, quer os seus clientes, procuram veículos mais sustentáveis em termos de eficiência de combustível e com menores impactes ambientais. Devido a este facto, muitos estudos de desempenho ambiental têm sido desenvolvidos na indústria automóvel.

A sustentabilidade na indústria automóvel é um tema cada vez mais proeminente na atualidade devido à grande dependência de combustíveis e produtos não renováveis à base de petróleo e à crescente necessidade de diminuição de impactes ambientais dos veículos automóveis. Além disto, têm-se verificado um crescimento global de veículos por todo o mundo como se pode observar na figura 2.1, o que resulta em acréscimos significativos na procura global de combustíveis e de materiais, bem como um aumento das emissões atmosféricas. (Mayyas *et al.*, 2012)

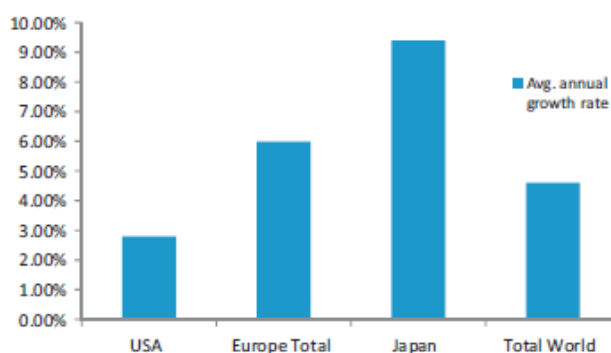


Figura 2.1 - Taxa de crescimento anual de veículos automóveis entre 1960 e 2002

(Mayyas *et al.*, 2012)

Com o objetivo de assegurar que um veículo automóvel é um produto ambientalmente sustentável, os fabricantes de componentes para a indústria automóvel são cada vez mais pressionados para chegar a novas soluções para minimizar o impacto ambiental através da utilização de processos mais eficientes que preservem os recursos, mas também para desenvolver métricas quantitativas para avaliar esses impactes e medir os esforços de melhoria.

O design para sustentabilidade envolve o equilíbrio de questões sociais, éticas e ambientais, juntamente com fatores económicos dentro do processo de desenvolvimento do

produto ou serviço, garantindo que as necessidades dos clientes e da sociedade são satisfeitas e simultaneamente o ecossistema é protegido. (Curtis and Walker, 2001),

Em 2012, Mayyas *et al.*, apresentaram um artigo científico de revisão que pretendeu refletir as pesquisas desenvolvidas sobre sustentabilidade na indústria automóvel, através de uma revisão abrangente dos diferentes estudos de ciclo de vida de veículos, das análises sobre deposição e fim de vida, e das diferentes métricas de sustentabilidade e modelos utilizados para quantificar o impacto ambiental. Neste estudo foram considerados não só os níveis ambientais, como também os níveis económicos e sociais.

Segundo os autores referenciados acima, a sustentabilidade na indústria automóvel, baseia-se em quatro áreas principais de investigação:

- A abordagem de ACV de veículos automóveis e seus componentes;
- O design para X;
- A perspetiva de fim de vida;
- Os estudos de seleção de materiais mais leves. (Mayyas *et al.*, 2012)

Apresenta-se, de seguida, um resumo de cada uma destas áreas de investigação na indústria automóvel.

#### ➤ **Abordagem de ACV de veículos automóveis e seus componentes**

Esta abordagem analisa o veículo desde a fase de pré-produção, ou seja, desde as matérias-primas, até à fase de fim da vida dos veículos. A metodologia de ACV aplicada à indústria automóvel apresenta diversos desafios como a diversidade de materiais que podem ser utilizados como matérias-primas, as técnicas de processamento desses materiais, o tempo de uso dos veículos, as formas de eliminação dos materiais após o seu uso e o tempo prolongado associado à ACV. Estes desafios permitem identificar não só o percurso real de um determinado material utilizado num veículo automóvel durante todo o seu ciclo de vida como também possibilita o estudo da degradação desse material na fase de uso, por exemplo, permite estudar a perda de eficiência do motor que leva a um maior consumo de combustível. No entanto, a ACV é um método que exige uma extensa quantidade de dados de inventário e quantifica principalmente os impactos ambientais do veículo durante o seu ciclo de vida. (Mayyas *et al.*, 2012)

### ➤ Design para X e design para a sustentabilidade

A estrutura do design para a sustentabilidade (DFS) foi estabelecida dentro dos princípios de design para X (DfX). O design para a sustentabilidade pode ser útil para explorar a metodologia DfX na conceção de produtos sustentáveis. Para os veículos e os seus sub-sistemas podem ser adotados os princípios do DfX para ajudar a analisar o seu impacto ambiental a partir de aspetos específicos do projeto, como a disposição-capacidade e a segurança operacional. (Jawahir et al., 2007)

Na figura 2.2 apresentam-se os principais elementos que contribuem para o DFS.



Figura 2.2 – Principais elementos que contribuem para o DFS

(Jawahir et al., 2007)

A metodologia DfX para o desenvolvimento de um veículo automóvel sustentável, envolve:

✓ Design para produção (DfM)

Na fase de produção de veículos a metodologia DfM compreende várias linhas orientadoras como, por exemplo, a escolha de matérias-primas, a estrutura do produto ou dos seus componentes. A utilização desta metodologia tem como objetivos a diminuição do tempo e dos custos de produção.

Uma metodologia derivada do DfM é o design para a montagem (DfA) que se concentra apenas na montagem de peças. As linhas orientadoras para esta metodologia incluem, por exemplo, a redução do número de peças e variações de peças através da eliminação de ajustamentos de peças. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Design para a reciclagem

O design para a reciclagem, também conhecido como design de fim de vida, compreende não só a reciclagem das peças, como a sua desmontagem e reutilização. Surgem assim metodologias de: design para a desmontagem, cujo objetivo é o de assegurar que um produto ou sistema pode ser desmontado com um custo e esforço mínimos, contribuindo para a recuperação de uma maior proporção dos componentes do sistema; design para a reutilização, que pretende melhorar o retorno das peças de veículos e subconjuntos para um nível de desempenho aceitável para re-montagem, permitindo que seus materiais possam voltar a ser utilizados, evitando assim o desperdício e reduzindo o uso de recursos naturais; e o design para a reciclagem, propriamente dito, que implica que os materiais são processados de uma determinada forma e transformados num novo produto e que tem como objetivo final a poupança de recursos, mas que também pode ser motivado por outras razões que visam economizar dinheiro ou preservar o meio ambiente. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Design para minimizar o uso de material

Reduzir a quantidade de material utilizado ao longo do ciclo de vida do produto é um método eficaz de reduzir os seus impactos ambientais. No caso de consumo de combustível, esta estratégia pode ser aplicada ao reduzir as dimensões físicas do veículo sempre que possível, a redução de peso, utilizando materiais alternativos, tais como alumínio, aço de alta resistência ou de fibra de carbono para carroçarias. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Design para a durabilidade

A durabilidade é a probabilidade de que um produto vai funcionar sem falhas ao longo de um determinado período de tempo. Assim, projetar produtos para durarem mais tempo reduz, normalmente, o uso de recursos e a produção de resíduos. No entanto, em alguns casos aumentar a durabilidade pode ter um efeito contrário, por exemplo, o uso de motores mais velhos, produzidos com tecnologias menos eficientes, prejudica o impacto ambiental do produto com o aumento do consumo de combustível. Assim, a adoção de tecnologias mais ambientalmente benéficas, torna-se crucial para aumentar a eficiência de utilização de energia ou o controlo das emissões de veículos. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Design para a eficiência energética

Uma importante fonte de impacto ambiental é a energia consumida por um produto durante a sua fase de utilização. Além de desenvolvimento de sistemas avançados de combustão para melhorar a eficiência térmica do motor, as aplicações de materiais leves alternativos têm sido alvo de investigação para melhorar a economia de combustível ao longo de todo o ciclo de vida do produto

Alguns fabricantes de equipamentos de veículos automóveis já começaram a usar algumas métricas integradas para avaliar o melhor uso de materiais leves nos seus veículos. Algumas dessas métricas incluem o custo adicional por unidade de peso ou o índice de engenharia de peso leve. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Design para o fim de vida do veículo

A quantidade de resíduos produzidos anualmente na UE devido ao fim de vida de veículos automóveis é muito grande, o que levou ao estabelecimento de novas políticas ambientais da UE, associadas com o conceito de "responsabilidade de produto alongada". Assim, o Parlamento Europeu aprovou a Diretiva 2000/53/CE que trata do fim de vida dos veículos. O produtor de peças para veículos automóveis deve em conta esta diretiva quando projeta uma determinada peça e deve estabelecer os requisitos técnicos como as taxas de reutilização e recuperação mínimas, desde que o produto é planeado. (Mayyas *et al.*, 2012)

### ➤ **Perspetiva de fim de vida**

Existem duas estratégias que podem ser implementadas pelos fabricantes de veículos ou de componentes para veículos automóveis de modo a melhorar a recuperação dos produtos no final da sua vida: ações corretivas, que incluem o desenvolvimento e aperfeiçoamento técnico e económico de processos de recuperação que serão aplicados a produtos na final da sua vida; ou ações preventivas, onde estão está incluído um melhor design de produto que permite uma maior recuperabilidade dos materiais na fase de fim de vida, através de fundamentados designs de reciclagem e desmontagem. (Mathieux *et al.*, 2008)

A fase de desmontagem tem particular importância por ser um processo difícil e pelo facto de uma eficiente desmontagem melhorar o comportamento do ciclo de vida. Por conseguinte, é necessário determinar o ótimo de fase de desmontagem, quando todos os componentes podem ser recuperados de forma economicamente viável, aumentando assim a capacidade de reutilização do produto. Go *et al.*, realizaram um caso de estudo no qual desenvolveram um modelo de otimização para a sequência de desmontagem de um bloco de motor, utilizando uma abordagem de algoritmos genéticos (AG) para resolver esse modelo de otimização, devido à sua grande capacidade para resolver problemas de otimização complexos quando comparado com outros métodos heurísticos. A função de otimização de AG implementada em Matlab é dependente do incremento do tempo de desmontagem. O modelo AG desenvolvido permitiu decidir qual a ordem da sequência de desmontagem ótima de um produto, designadamente um bloco de motor, em que essa sequência de desmontagem atinge um tempo mínimo, aumentando assim a probabilidade de uma eficaz recuperação de materiais e permitindo a separação seletiva de peças e materiais. (Go *et al.*, 2012)

Como já foi referido anteriormente, cada vez mais os fabricantes de peças para veículos automóveis integram nas fases iniciais de design da peça as considerações relativas à recuperação do material após o fim de vida dos veículos. Uma melhor compreensão do processo de reciclagem pode ajudar os designers de produto a evitarem os contaminantes no produto reciclado e a melhorar a eficiência dos métodos de triagem. Froelich *et al.* escreveram um artigo cujo principal objetivo foi a descrição do estado de arte da eficiência técnica de canais de recuperação de plásticos na Europa, a fim de definir os requisitos para o projeto de uma peça de plástico automóvel. Os autores verificaram no seu estudo que,

apesar de muitos fabricantes de automóveis, como por exemplo a Renault, terem implementado estratégias de melhoria contínua na reciclagem, a quantidade de materiais plásticos reciclados no mercado já não era suficiente para satisfazer as necessidades da indústria automóvel. Esta diferença é devida essencialmente às diferenças entre a composição de polipropileno dos veículos atuais e os que foram produzidos há uns anos atrás e à complexidade dos produtos atuais em fim de vida em relação às técnicas de triagem e reciclagem disponíveis. Os resultados do estudo indicaram a necessidade do desenvolvimento de técnicas de triagem e reciclagem mais específicas e direcionadas para as propriedades dos polímeros, de modo a melhorar o rácio da reciclagem de todos os materiais de plástico de um veículo e garantir um melhor valor para esses materiais reciclados. (Froelich *et al.*, 2007)

#### ➤ Estudos de seleção de materiais mais leves

As novas tendências da indústria automóvel para produzir veículos mais leves tem como objetivo não só melhorar a eficiência no consumo de combustível do veículo, como também aumentar a sua performance de condução, reduzindo simultaneamente as suas emissões gasosas para a atmosfera. O fabrico de veículos mais leves tem como base a utilização de um elevado grau de materiais mais leves, como o alumínio e os plásticos, bem como, se referiu anteriormente, uma maior preocupação relativamente ao design das peças que os constituem. (Mayyas *et al.*, 2012)

Apresentam-se abaixo alguns desses estudos.

Alves *et al.*, avaliaram os impactes ambientais resultantes da utilização de compósitos de fibra de juta (fibra têxtil de origem vegetal) no fabrico de caixas de um veículo “buggy” utilizado no Brasil. Para isso, compararam estes impactes com os resultantes da utilização do material utilizado atualmente que são os compósitos de fibra de vidro plástico reforçado (PRFV). Efetuaram uma ACV ao produto atual e ao produto alternativo (utilizaram fibras não tratadas, secas e secas/branqueadas), utilizando o *software* SimaPro. Concluíram que os compósitos de fibra de juta apresentam a solução com melhor desempenho ambiental. No entanto, verificaram que apesar do consumo de combustível ser menor devido à redução do peso do veículo, a ACV apontou alguns impactes desconhecidos nas fases de produção e de eliminação das capotas, especificamente relacionadas com os transportes

logísticos das fibras de juta e reciclagem das capotas. De realçar que a utilização das fibras de juta devem ser utilizadas de forma sustentável de modo a evitar a desflorestação na Amazónia. (Alves *et al.*, 2010)

Luz *et al.*, realizam dois estudos comparativos de ACV onde observaram o desempenho ambiental dos compósitos de bagaço de cana-polipropileno em comparação com compósitos talco-polipropileno, compósitos estes utilizados em veículos automóveis onde o fator peso é particularmente relevante. Para este estudo utilizaram dados recolhidos em diferentes indústrias do Brasil, usaram o *software* GaBi e consideraram o modelo de avaliação de impacte ambiental baseado no método CML 2001. Os resultados observados demonstraram que o desempenho ambiental dos compósitos de bagaço de cana-polipropileno é maior devido às seguintes razões: a produção de fibras de bagaço de cana origina impactes ambientais mais baixos em comparação com a produção de talco; os compósitos reforçados por bagaço de cana são mais leves e têm um desempenho equivalente ao utilizado para a cobertura estética dentro do carro; na fase de cultivo, consomem dióxido de carbono enquanto crescem; a reutilização económica dos resíduos de fim de vida desse material compósito é a melhor alternativa para minimizar os impactes ambientais. (Luz *et al.*, 2010)

Hakamada *et al.*, realizaram um estudo no qual evidenciaram a potencialidade da substituição de peças de aço convencionais num veículo automóvel por ligas de magnésio, por estas serem materiais adequados para a redução de peso em veículos, devido à sua baixa densidade de cerca de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  e à sua elevada resistência específica. Através de uma análise ICV a um veículo equipado com ligas de magnésio, os autores observaram que o efeito desta substituição melhorou o consumo de energia e diminui as emissões de  $\text{CO}_2$  quando comparado com veículos convencionais e equipados com peças de alumínio. No entanto, verificaram que a reciclagem de componentes de magnésio é indispensável para a eficiente redução de  $\text{CO}_2$  uma vez que estas emissões durante a produção de lingotes de magnésio são muito mais elevadas do que as observadas nas produções de aço convencional e de alumínio. (Hakamada *et al.*, 2007)

Quando se pretende fazer qualquer substituição de materiais, as apresentadas acima ou outras, podem ser utilizados métodos quantitativos para materiais de substituição: o método desempenho/custo que permite ao designer escolher entre um material substituto

com um desempenho semelhante a um custo mais baixo ou um material com melhor desempenho mas a um custo mais elevado; e o método da função objetivo composta que possibilita ao designer desenvolver diferentes cenários de substituição com base na relação de pesos atribuídos aos diferentes requisitos de desempenho. Os principais parâmetros que necessitam de ser examinados para o material de substituição podem ser agrupadas da seguinte forma: vantagem técnica de desempenho, como resultado de introdução de um material mais forte, mais duro, mais resistente ou mais leve; vantagem económica ao longo do ciclo de vida total do produto, que pode ser conseguida através da introdução de uma matéria-prima mais barata, um uso mais eficaz de material, um menor custo de processamento, uma melhor reciclabilidade e menores custos com operações de fim de vida de produto ou através de custo de funcionamento mais baixo do produto; a alteração de características do produto através da incorporação de um material que é esteticamente mais atraente ou que pode proporcionar mais conforto ao utilizador através, por exemplo, de isolamento de som ou calor; e, considerações ambiental e legislativa, incluindo menos impactes para o ambiente, melhor reciclagem ou reutilização e cumprimento dos regulamentos ambientais. (Frag, 2008)

Há muitas considerações de design de veículos que podem afetar as emissões atmosféricas de veículos e consumo de energia, incluindo o uso de combustíveis alternativos e novas tecnologias de motores (Mayyas *et al.*, 2012). Bartolozzi *et al.* realizaram uma ACV que foi utilizada para avaliar e comparar os impactes ambientais de cenários alternativos onde utilizam hidrogénio como combustível, produzido a partir de energias renováveis, em veículos automóveis na região da Toscana em Itália, no âmbito do projecto “Filiara Idrogeno”, e o *benchmark* onde utilizaram veículos elétricos padrão fornecidos com a eletricidade produzida a partir das mesmas fontes de energia renovável. Para essa ACV utilizaram o *software* SimaPro e a metodologia de avaliação de impactes ambientais CML2001. Verificaram que todos os cenários analisados mostram performances ambientais semelhantes para todas as categorias ambientais analisadas. No entanto, a análise dos cenários alternativos mostrou mudanças significativas de impactes nas diferentes fases do ciclo de vida, dependendo da fonte de energia e da tipologia do veículo. (Bartolozzi *et al.*, 2013)

Enderle *et al.* estudaram medidas de otimização para aumentar reutilização da água e a eficiência energética através da recuperação de calor numa indústria automóvel da Áustria. Para tal, identificaram os limites entre as diferentes zonas da fábrica de modo a delinear as principais variáveis que influenciam a implementação das medidas de otimização. Demonstraram que as áreas de recuperação de calor e processo reutilização da água estão intimamente ligados e que as medidas de otimização dentro de uma área têm um efeito imediato sobre todo o sistema. Por isso, concluíram que uma combinação inteligente de tecnologia e um sistema otimização são os requisitos básicos para o desenvolvimento de conceitos práticos de otimização através de uma abordagem sistemática dentro sistemas de produção complexos. (Enderle *et al.*, 2012)

O maior consumo de energia de um veículo automóvel acontece durante a sua fase de utilização. Além disso, outros impactes ambientais fundamentais, como as emissões atmosféricas, ocorrem predominantemente nas fases de extração, refinação e transporte para os clientes de petróleo, seguido da fase de utilização do veículo. (Mcauley, 2003)

Mudanças do tipo de combustível utilizado em veículos automóveis e medidas de otimização são importantes na diminuição dos impactes ambientais, mas de acordo com Ungureanu *et al.*, o peso de um veículo automóvel é a principal fonte para alcançar reduções significativas no consumo de energia e produção de emissões atmosféricas durante o seu ciclo de vida. (Ungureanu *et al.* 2007)

Existem várias metodologias para avaliar o aspeto ambiental da sustentabilidade, onde as consequências ambientais de um produto ou de um sistema é avaliada. No entanto, ainda não existe um método universalmente aceite para quantificar todos os aspetos da sustentabilidade do produto. Apresentam-se de seguida alguns modelos de sustentabilidade utilizados pelos fabricantes de peças para veículos automóveis. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Declaração ambiental do produto (EPD) da Volvo

A implementação de princípios de sustentabilidade na conceção e fabrico de veículos novos depende dos objetivos da empresa e do seu portfólio de produtos. A declaração ambiental do produto (EPD) é um desses modelos que foram desenvolvidos através da cooperação entre o Instituto Ambiental Sueco e a Volvo Car Corporation.

O propósito de uma EPD é permitir que os clientes possam avaliar o impacto ambiental de veículos diferentes. O sistema EPD cobre todas as fases do ciclo de vida de um veículo, desde a produção das matérias-primas até à sua fase de fim de vida, e fornece informações sobre os impactos ambientais de cada uma dessas fases.

Devido ao facto dos sistemas considerados serem grandes e complexos, bem como a necessidade de efetuar algumas aproximações de valores, especialmente no caso dos grandes camiões, uma EPD podem conter imprecisões e alguma falta de confiabilidade. Assim, os resultados obtidos de uma EPD devem ser vistos como orientações e refletem os parâmetros ambientais mais importantes do ciclo de vida do produto. Uma outra limitação do sistema de EPD é a unidade utilizada para avaliar o impacto ambiental, que é a unidade de carga ambiental (ELU) por quilograma de material utilizado. Na realidade, a ELU classifica o impacto ambiental de qualquer material de acordo com o impacto ambiental gerado a partir 1 kg de metano (CH<sub>4</sub>), sendo que esta unidade ainda requer aprovação internacional pois é considerada uma unidade não padronizada.

Tendo por base estas EPDs, a Volvo estabeleceu objetivos que visam assegurar que cada novo produto tem um menor impacto ambiental do que o que vai substituir. Devido a isto, emissões de óxidos de azoto, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e partículas dos camiões Volvos foram reduzidos cerca de 60-85 % desde meados da década de 1970. Ao mesmo tempo que consegue reduzir os impactos ambientais, os veículos têm-se tornado cada vez mais eficientes, reduzindo o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões de dióxido de carbono. (Mayyas *et al.*, 2012)

✓ Índice de sustentabilidade de produtos da Ford Europa (PSI)

O índice de sustentabilidade de produtos da Ford Europa (PSI) é uma ferramenta de gestão da sustentabilidade simples que pode ser utilizada diretamente por engenheiros, não sendo necessário ser especialista em sustentabilidade ou ACV. O PSI é composto de oito indicadores: potencial de aquecimento global (GWP) do ciclo de vida, qualidade do ar do ciclo de vida, materiais sustentáveis, gestão de substâncias (por exemplo, controlo do ar interior dos veículos), nível de ruído de condução, segurança, capacidade de mobilidade (por exemplo, dos bancos, da bagageira) e custo do ciclo de vida.

✓ Abordagens de sustentabilidade de fábricas de montagem asiáticas

Os fabricantes japoneses como Toyota, Nissan, Honda, Mazda, Mitsubishi, Daihatsu, Subaru, Hino, Suzuki e Isuzu utilizam diretrizes ambientais que tentam correlacionar os custos com benefícios ambientais.

Os benefícios ambientais incluem a redução de custos relacionada com a diminuição do consumo de energia, da diminuição do processamento de resíduos, da venda de produtos recicláveis e de outros rendimentos a partir de tecnologias ambientais.

Uma das abordagens de sustentabilidade importantes da Ásia é a filosofia "Hitozukuri e Monozukuri" que tem como base a educação do Homem para ser uma pessoa responsável de forma a transformar o mundo num lugar melhor e fazer as coisas com excelência, habilidade, entusiasmo e orgulho, garantindo o equilíbrio e a harmonia com a natureza. Tendo por base esta filosofia surge a metodologia LEAN e os seus princípios. (Mayyas *et al.*, 2012, "Lean 2015")

Em 2012, Xiangxue Zhang, apresentou uma tese de mestrado na Universidade de Kentucky, na qual apresenta um novo método baseado em métricas de ACV para avaliar o desempenho de sustentabilidade de componentes automóveis metálicos. Utilizou a metodologia do índice de sustentabilidade de produto (ProdSI), considerando a abordagem total do ciclo de vida e do triplo ponto de partida (TBL - *triple bottom line*), ou sejam, os três principais elementos de sustentabilidade do produto (economia, ambiente e sociedade) que estão interrelacionados e integrados, através da tecnologia e recursos humanos, com a metodologia 6R (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, reprojeter e refazer). (Zhang, 2012)

As abordagens sobre o desempenho ambiental na indústria automóvel até agora referidas são possíveis de ser utilizadas graças às bases de dados que muitas associações, industriais ou outras, constroem e disponibilizam. Uma dessas associações é a World Steel Association que, em 2011, publicou um relatório metodológico designado por "*Life cycle inventory study for steel products*" (estudo de inventário de ciclo de vida para produtos de aço). Este relatório teve como objetivo quantificar o uso de recursos, energia e emissões ambientais associados ao processamento de quinze produtos siderúrgicos desde a extração

de matérias-primas até ao portão da fábrica de aço (*cradle to gate*). Devido à sua realização foi possível a atualização da base de dados mundial ICV da indústria do aço e melhorar a já rigorosa metodologia ICV dos produtos de aço, de acordo com as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, de modo a fornecer dados confiáveis e mais atualizados para responder aos pedidos de clientes e a estudos externos. (World Steel Report, 2011).

Especificamente em relação à ACV, a Comissão Europeia, após o seu comprometimento na comunicação sobre Política Integrada do Produto, produziu um manual de boas práticas em ACV. O Manual do Sistema Internacional de Dados de Referência de Ciclo de Vida fornece a governos e empresas uma base para assegurar a qualidade e a consistência dos dados do ciclo de vida, métodos e avaliações. Este documento proporciona uma orientação técnica para estudos detalhados de ACV e fornece também a base técnica para obter critérios específicos de produtos, guias e ferramentas simplificadas. O público-alvo deste manual são todas as pessoas que pretendem efetuar uma ACV, desde os estudantes aos peritos técnicos dos setores público e privado que lidam com o apoio à decisão ambiental relacionada com produtos, recursos e gestão de resíduos. (ILCD, março 2010)

Quanto ao desempenho ambiental de molas de lâmina de aço para carroçarias de camiões, mais concretamente em relação à sua ACV, não foi possível encontrar muita bibliografia relacionada com este assunto. O único artigo a que se teve acesso foi o “*Using Life Cycle Assessment to Assess and Identify Improvements of the Environmental Impacts of the Vehicle Leaf Spring*”, que discute a aplicação da metodologia de ACV em molas de lâmina, utilizada em camiões, autocarros e reboques no Zimbabué. Este artigo foi apresentado em 2008 na 15ª Conferência Internacional de Engenharia de Ciclo de Vida realizada em Sidney na Austrália. O autor deste trabalho utilizou o *software* SimaPro, bem como as suas bases de dados, e teve bastantes dificuldades na recolha de informações na indústria devido à hierarquia e insegurança corporativa, referindo que o seu principal problema foi a falta de uma base de dados adequada que refletisse convenientemente a indústria zimbabuense. Após a análise dos impactes ambientais das molas de lâmina verificou que os principais elementos que contribuem para esses impactes são: o forno de carvão, o transporte de carvão, o material que constitui a mola de lâmina e a eliminação do óleo usado. (Mbohwa e Ganyo, 2008)

### **3. Escolha de uma ferramenta informática para ACV na indústria automóvel**

Com o objetivo de se efetuar o estudo de ACV relativo a molas de lâmina de suspensão para camiões, foi necessário selecionar a ferramenta informática que melhor se adequasse às características do produto em questão. No entanto, devido à grande quantidade de ferramentas existentes no mercado e aos muitos critérios que devem ser tidos em conta aquando da seleção, a escolha tornou-se complicada e foi necessário encontrar metodologias que facilitassem a tomada de decisão relativamente à seleção da ferramenta informática mais adequada à sua utilização na ACV de uma indústria automóvel.

Uma das formas de ultrapassar esse problema de tomada de decisão é a utilização de metodologias multicritério de apoio à decisão (MCDA - *Multiple-Criteria Decision Analysis*), que permitem optar pela melhor ferramenta informática que contemple o tipo de indústria em questão, o tipo de produto considerado, a área geográfica onde é realizado o estudo de ACV, o apoio técnico com que se pode contar por parte do fornecedor dessa ferramenta, as próprias características a nível informático que a ferramenta proporciona ou qualquer outro item que o decisor dessa escolha considere importante.

#### **3.1 Revisão bibliográfica**

As ferramentas para avaliar o desempenho ambiental de produtos estão em permanente desenvolvimento de modo a acompanharem a rápida evolução que os temas relacionados com a sustentabilidade experimentam.

A International Society of Sustainability Professionals (ISSP) é uma associação que tem, como parte integrante da sua missão, a função de proporcionar aos profissionais que lidam com questões relacionadas com a sustentabilidade os melhores recursos possíveis para apoiar o seu trabalho. Por este motivo, a ISSP está sempre atenta aos novos desenvolvimentos de ferramentas e tecnologias emergentes relativas à sustentabilidade. Em 2011, publicou um guia que compila uma série de ferramentas informáticas que ajudam as organizações a planear e apresentar um relatório sobre ACV. Nesse guia estão relatadas uma série de ferramentas que ajudam as organizações a executar, acompanhar e relatar os dados de avaliação de ciclo de vida. Além disso, o guia apresenta uma lista de

organizações que desenvolvem e comercializam ferramentas para ACV que, apesar de não estarem incluídas na compilação apresentada no guia por não terem respondido à ISSP, poderão ser alvo de interesse e de pesquisa para os utilizadores dessas ferramentas. (Hitchcock *et al.*, 2011)

Também em 2011, foi publicado um relatório, resultante do projeto BIOCHEM, que teve como finalidade fornecer um *background* sobre a ACV e uma visão geral da adequação das várias ferramentas e métodos de ACV para Pequenas e Médias Empresas e para a área da biotecnologia. (Lehtinen *et al.*, 2011)

Herrmann e Moltesen publicaram em 2014 um artigo onde descrevem uma comparação entre as performances das duas principais ferramentas informáticas utilizadas para a ACV: SimaPro e GaBi. As performances dos dois *softwares* foram comparadas com base numa amostra aleatória de 100 processos unitários. Os autores pretendiam investigar se o tipo de *software* utilizado numa ACV poderia influenciar os resultados e decisões tomadas com base neles. Concluíram que, apesar de em muitos casos os resultados obtidos não apresentarem diferenças significativas para as duas ferramentas, noutros existiam grandes diferenças de performance ao nível do inventário e avaliação de impactes. Observaram que algumas dessas diferenças, particularmente para a avaliação de impactes, são tão grandes que poderiam potencialmente influenciar as conclusões tiradas a partir de um estudo de ACV. (Herrmann e Moltesen, 2014)

### **3.2 Metodologias multicritério de apoio à decisão**

As metodologias multicritério de apoio à decisão são cada vez mais utilizadas para apoiar decisões extremamente complexas quer em empresas privadas quer mesmo em organismos públicos. (Montibeller e Franco, 2010)

Este tipo de metodologias é bastante importante nas opções estratégicas tomadas pelas organizações pois permitem os decisores organizarem de forma estruturada e metódica as suas decisões de gestão e, assim, justificarem as opções tomadas.

Hoje em dia existem bastantes metodologias multicritério de apoio à decisão, das quais se destacam algumas: MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* - Medir a Atratividade por uma Técnica de Avaliação Baseada em

Categorias), AHP (*Analytical Hierarchy Process* – Processo Analítico Hierárquico), ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality* – Eliminação e Escolha Expressando a Realidade), MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory* – Teoria da Utilidade Multi-atributo), SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique* - Avaliação Técnica Multi-Atributo Simples), entre outros. (Bana e Costa *et al*, 2005; Papadopoulos and Konidari, 2011)

### **3.3 Metodologia MACBETH**

Apesar das diversas metodologias de apoio à decisão acima referidas, optou-se por utilizar a metodologia MACBETH e o *software* M-MACBETH que suporta a metodologia escolhida, com o propósito de auxiliar na escolha de uma ferramenta informática para o estudo de ACV das molas de lâmina.

Uma das vantagens do método MACBETH é a sua capacidade para quantificar as medidas de desempenho qualitativas fornecendo uma escala de julgamento numérica para o ranking das opções alternativas e selecionando a melhor. Por outro lado, o *software* M-MACBETH também melhora a utilidade deste método na resolução de problemas complexos de tomada de decisão que têm o desempenho das alternativas expressas em escala ordinal. Uma outra vantagem é a possibilidade, de quando se realiza uma análise de sensibilidade, ser possível visualizar os efeitos da mudança dos pesos dos critérios nos *rankings* finais das opções alternativas, o que prova que o MACBETH é um método de MCDA relativamente robusto. (Karande and Chakraborty, 2013)

Por outro lado, apesar do método MACBETH ser normalmente reconhecido como uma ferramenta de MCDA eficiente para medidas de performance qualitativas, existem estudos que comprovam que o método também tem um bom desempenho quando utilizado para medidas de performance quantitativas. Além disto, a metodologia MACBETH apresenta uma abordagem muito simples e possui um suporte informático que não requer cálculos matemáticos fastidiosos nem elevados tempos computacionais comparativamente com outros métodos de tomada de decisão. (Karande and Chakraborty, 2014)

A metodologia MACBETH pode ser aplicada com sucesso em tomadas de decisão complexas e tem sido utilizada em várias áreas, como são exemplo: escolha de fornecedores em ambiente industrial, seleção da melhor disposição espacial de instalações

de uma unidade fabril, avaliação do corpo docente de uma faculdade; melhoramento de matrizes de risco, escolha de uma ferramenta informática para um estudo de ACV na indústria automóvel, entre tantas outras aplicações. (Karande and Chakraborty, 2013; Karande and Chakraborty, 2014; Bana e Costa and Oliveira, 2012; Bana e Costa *et al*, 2014)

Esta metodologia de apoio à tomada de decisão permite avaliar opções tendo em conta múltiplos critérios. A distinção fundamental entre ela e outras metodologias de análise de decisão com múltiplos critérios é que MACBETH requer apenas julgamentos qualitativos sobre a diferença de atratividade entre elementos, para gerar pontuações para as opções em cada critério e também para efetuar um ponderar de cada critério em análise. (Bana e Costa *et al*, 2012)

À medida que os julgamentos qualitativos são expressos pelo decisor e introduzidos no *software* M-MACBETH, ele verifica automaticamente a sua consistência e oferece sugestões para resolver eventuais inconsistências. Depois, é construído um modelo quantitativo de avaliação. Utilizando as funcionalidades do *software* e tendo em conta os julgamentos do decisor é construída uma escala de pontuações para cada critério, onde os pesos relativos para os critérios podem ser sugeridos e discutidos. Em seguida, uma pontuação global é calculada para cada uma das opções, fazendo a soma ponderada das suas pontuações nos diversos critérios. É essa pontuação global que reflete a atratividade da opção respetiva no conjunto de todos os critérios. (Bana e Costa *et al*, 2005)

A possibilidade de, a partir do *software*, ser possível efetuar diversas análises de sensibilidade e de robustez aos resultados do modelo construído, permitem ao decisor uma melhor compreensão do problema, podendo ajustar o modelo e formar convicções sobre as prioridades a estabelecer ou as opções a selecionar. Além disto, o M-MACBETH disponibiliza diversas representações gráficas que facilitam a justificação da escolha da ferramenta informática de ACV. (Bana e Costa *et al*, 2005)

O modelo de MCDA MACBETH baseia-se na ordenação de uma série de opções e critérios escolhidos segundo a preferência do decisor e são constituídos por três fases principais, que se apresentam na figura 3.1.



Figura 3.1 – Fases do modelo MCDA MACBETH

(Bana e Costa *et al*, 2005)

Na fase de estruturação deve ser formulado o problema e identificado o(s) decisor(es), estruturando-se os pontos de vista e identificando-se os critérios, bem como devem ser definidas as opções a serem avaliadas e as suas performances. Quanto à fase de avaliação, ela é composta por dois passos igualmente importantes: por um lado a pontuação em que se avalia a atratividade de cada opção em cada critério; por outro lado, a ponderação onde se procede a uma definição do peso que cada critério possui. Por último, relativamente à fase de elaboração de recomendações devem ser efetuadas análises de resultados, onde se analisa a atratividade global de cada opção e se exploram os resultados do modelo, e de sensibilidade, onde se analisa a sensibilidade e robustez aos resultados do modelo relativamente aos vários tipos de incerteza nos dados. (Bana e Costa, and Vansnick, 2000)

### 3.3.1 Estrutura do problema

Nesta fase foram identificados todos os critérios com interesse para a seleção da ferramenta informática para a ACV, bem como as diversas opções que correspondem às várias ferramentas informáticas a serem avaliadas. (Hitchcock *et al.*, 2011; “Ferramentas informáticas de ACV, 2015”; “Software SimaPro, 2015”)

Escolheram-se um conjunto de oito critérios:

✓ Aplicação:

O decisor tem que classificar a ferramenta como macroeconómica ou não, tem de aferir se ela contempla várias áreas industriais e se abrange diversas zonas geográficas.

✓ Tipo de ferramenta:

A ferramenta, que tem que ser obrigatoriamente uma ferramenta de modelação para permitir a construção de um modelo de ACV, tem que ser verificada pelo decisor se tem ou não uma base de dados associada.

✓ Características da ferramenta:

Pretende-se com este critério definir o que os utilizadores têm possibilidade de fazer com a ferramenta: se ela permite a importação/exportação de folhas de cálculo e documentos, se tem a capacidade de fazer gráficos e se possui recursos de segurança que protejam o seu utilizador.

✓ Serviços de apoio disponíveis:

Este critério reflete o apoio ao utilizador disponibilizado pelo proprietário da ferramenta informática, em termos da realização de seminários e *webinars* que permitem a formação periódica sobre as novas atualizações, da existência de um manual de funcionamento e de uma permanente linha de apoio seja por intermédio de e-mail, telefone ou via *chat*.

✓ Plataforma informática:

Com este critério pretende-se definir em que sistema ou sistemas operativos é possível executar a ferramenta, ou seja, se ela pode ser utilizada em PC/Windows, Mackintosh ou noutro tipo de plataformas informáticas como são o caso de sistemas *web based*, Linux, SAP ou Unix.

✓ Linguagens disponíveis:

O decisor seleciona neste critério o ou os idiomas em que a ferramenta é disponibilizada. Optou-se pelos seguintes idiomas: inglês, português, e/ou francês ou castelhano.

✓ Tópicos de desempenho abrangidos:

Neste critério é possível o decisor selecionar os tipos de performances que a ferramenta aborda: ambiental, social e/ou económica.

✓ Utilização pela comunidade científica:

Neste critério, o decisor faz uma avaliação, em termos relativos, da quantidade de artigos científicos que se encontram no *Google Scholar* que estão relacionados com a ACV e que utilizam o tipo de ferramenta em causa. (“Artigos científicos sobre ferramentas ACV, 2015”)

Estes oito critérios selecionados são considerados como “nós critério” ou “pontos de vista fundamentais”, pois são utilizados para definir a atratividade das opções disponíveis. O M-MACBETH disponibiliza dois tipos de bases de comparação para os “nós critério”:

- Comparação direta

Este tipo de comparação pode ser de dois tipos: “as opções”, onde se indica ao *software* que se quer comparar diretamente as opções entre si (para avaliar a sua atratividade relativa); e, “as opções + 2 referências”, onde se indica ao *software* que, para além de se pretender compará-las diretamente entre si, pretende-se, adicionalmente, comparar as opções com duas referências a definir (para avaliar também a atratividade intrínseca de cada opção com base nas duas referências).

- Comparação indireta

As bases de comparação indireta são dois tipos: “níveis qualitativos de performance” e “níveis quantitativos de performance”. Em ambos os casos se indica ao *software* que se pretende avaliar a atratividade das opções no critério indiretamente através da utilização de funções de valor que têm a capacidade de converter as performances das opções em pontuações. (Bana e Costa *et al.*, 2005)

No caso em estudo, optou-se por escolher bases de comparação indireta do tipo “níveis qualitativos de performance” devido às características de cada critério que se pretende avaliar. Este tipo de modelo de avaliação indireta permite uma avaliação através das funções de valor previamente criadas que apenas dependem dos critérios, sendo independentes das opções de ferramentas informáticas escolhidas.

Após a seleção dos oito critérios, construiu-se a árvore de valores ou árvore de pontos de vista, como se pode observar na figura 3.2. Nesta árvore de valores também é possível

visualizar os “nós não-critério” ou “pontos de vista”, que não avaliam a atratividade entre as opções, mas que são essenciais para melhor se perceber a construção do modelo.

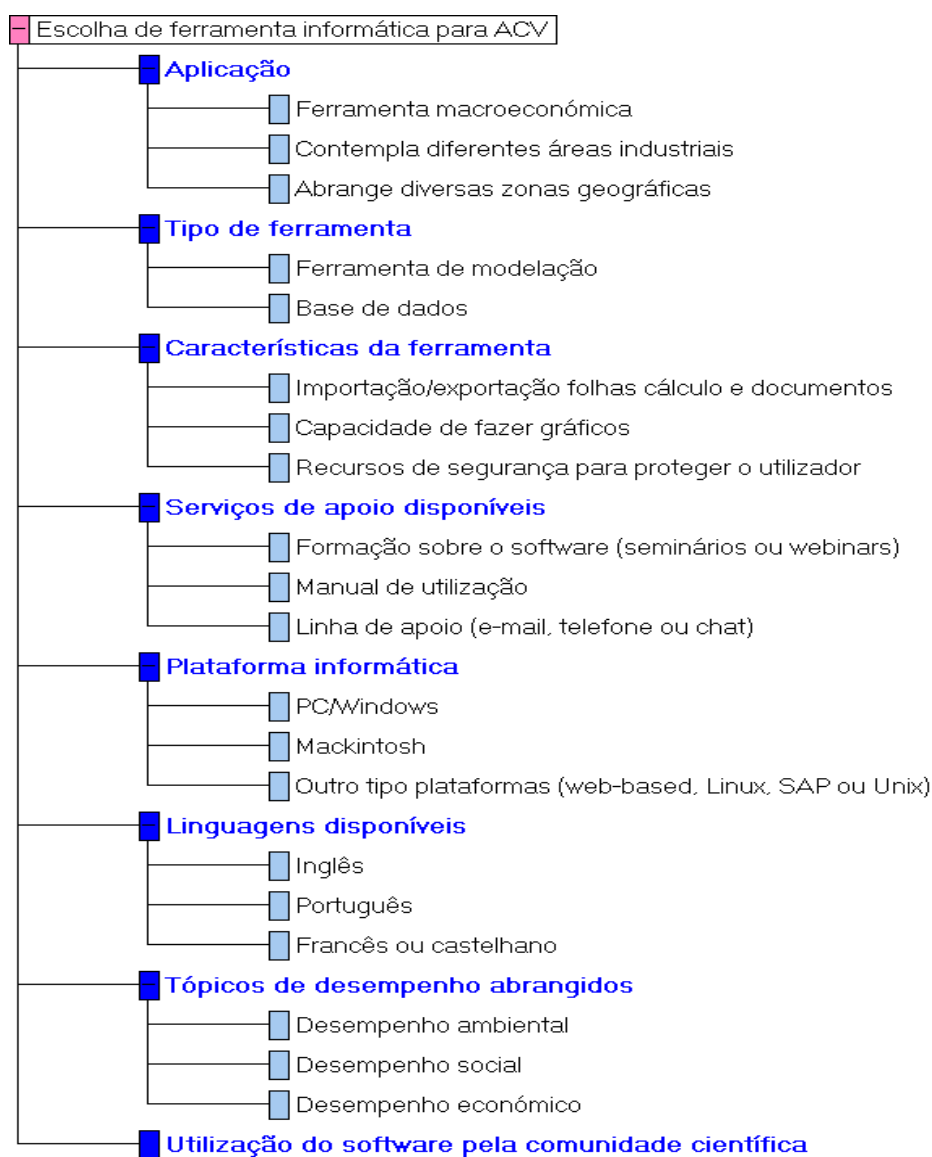
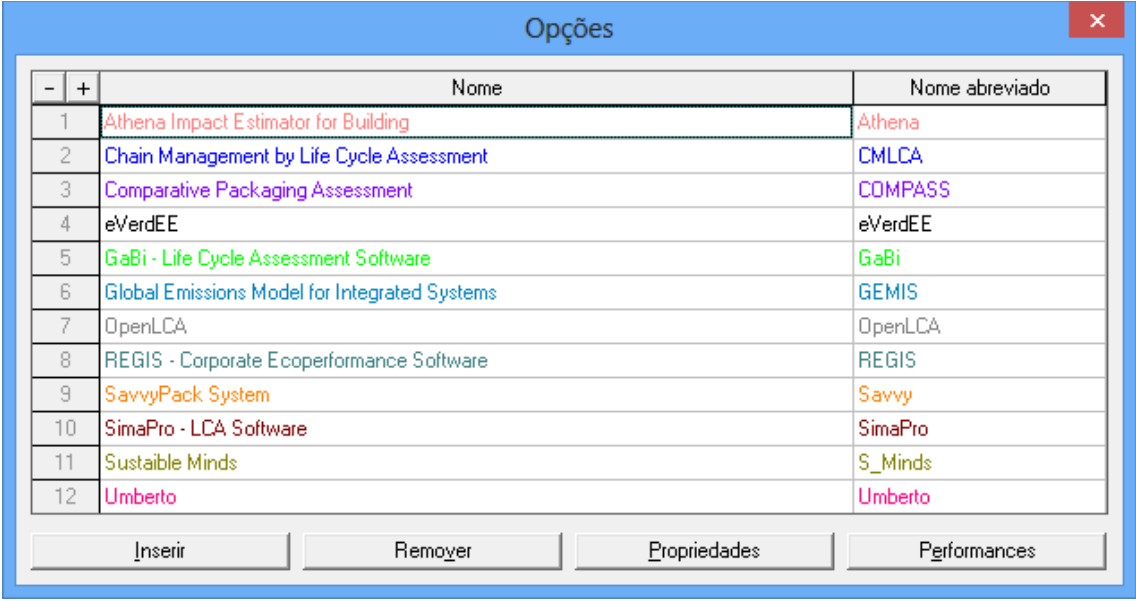


Figura 3.2 – Árvore de valores para a escolha de uma ferramenta informática para o estudo de ACV na indústria automóvel

Na fase de estruturação, para além da organização dos pontos de vista e da identificação dos critérios, também é necessário escolher as opções de ferramentas informáticas que se pretendem avaliar.

Uma opção é, por definição, um meio para alcançar fins, o que implica que se comece por refletir sobre o que se pretende obter de modo a que a tomada de decisão seja a melhor possível. (Bana e Costa *et al.*, 2005)

Definiram-se então doze opções ou alternativas possíveis que se encontram representadas na figura 3.3.



-	+	Nome	Nome abreviado
1		Athena Impact Estimator for Building	Athena
2		Chain Management by Life Cycle Assessment	CMLCA
3		Comparative Packaging Assessment	COMPASS
4		eVerdEE	eVerdEE
5		GaBi - Life Cycle Assessment Software	GaBi
6		Global Emissions Model for Integrated Systems	GEMIS
7		OpenLCA	OpenLCA
8		REGIS - Corporate Ecoperformance Software	REGIS
9		SavvyPack System	Savvy
10		SimaPro - LCA Software	SimaPro
11		Sustainable Minds	S_Minds
12		Umberto	Umberto

Figura 3.3 – Opções de ferramentas informáticas que se pretendem avaliar

### 3.3.2 Avaliação das ferramentas informáticas

O primeiro passo da fase de avaliação foi a definição de descritores para cada um dos critérios a avaliar, pois a sua construção ajuda a compreender melhor o contexto da decisão. Um descritor de impacto não é mais do que um conjunto ordenado plausível de níveis de desempenho que se destina a:

- Operacionalizar a avaliação dos impactes (performances ou consequências) de cada opção através de medidas (no caso em estudo, qualitativas) para cada critério;
- Descrever, o mais objetivamente possível, os impactes das opções relativamente a um determinado critério;

- Melhorar a avaliação do modelo, restringindo (sempre que necessário) os níveis de impacto para um domínio da plausibilidade (do nível mais atraente ou desejável para um nível menos atrativo);
- Verificar a independência ordinal do critério correspondente, pois se a dependência for detetada nesta fase, é necessário reestruturar a família de critérios pois só assim se garante que a comparação entre as opções seja independente de cada critério. (Bana e Costa, and Beinat, 2005)

Para cada um dos oito critérios definiram-se, como se referiu anteriormente, níveis qualitativos de performance. Esses níveis de performance resultaram das seguintes questões respondidas pelo decisor para cada um dos critérios.

✓ **Aplicação** (oito níveis qualitativos de performance)

⇒ É uma ferramenta macroeconómica? Sim (+) / Não (-);

⇒ Contempla diferentes áreas industriais? Sim (+) / Não (-);

⇒ Abrange diversas zonas geográficas? Sim (+) / Não (-).

✓ **Tipo de ferramenta** (dois níveis qualitativos de performance)

⇒ É uma ferramenta de modelação e tem uma base de dados? Sim (+) / Não (-);

⇒ É uma ferramenta de modelação, mas não tem uma base de dados? Sim (+) / Não (-).

✓ **Características da ferramenta** (oito níveis qualitativos de performance)

⇒ Permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos?

Sim (+) / Não (-);

⇒ Tem a capacidade de fazer gráficos? Sim (+) / Não (-);

⇒ Possui recursos de segurança para proteger o utilizador? Sim (+) / Não (-).

- ✓ **Serviços de apoio disponíveis** (oito níveis qualitativos de performance)
  - ⇒ O proprietário da ferramenta proporciona ações de formação sobre o *software* (*workshops* ou *webinars*)? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ É disponibilizado o manual de utilização da ferramenta? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ Exista uma linha de apoio ao cliente (e-mail, telefone ou *chat*)?  
Sim (+) / Não (-).
  
- ✓ **Plataforma** (sete níveis qualitativos de performance)
  - ⇒ Pode ser utilizada em PC/Windows? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ Pode ser utilizada em Mackintosh? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ Pode ser utilizada noutro tipo de plataformas informáticas (*web-based*, Linux, SAP, Unix)? Sim (+) / Não (-).
  
- ✓ **Linguagens disponíveis** (oito níveis qualitativos de performance)
  - ⇒ O *software* está disponível em inglês? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ O *software* está disponível em português? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ O *software* está disponível em francês ou castelhano? Sim (+) / Não (-).
  
- ✓ **Tópicos de desempenho abrangidos** (sete níveis qualitativos de performance)
  - ⇒ Abrange tópicos de desempenho ambiental? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ Abrange tópicos de desempenho social? Sim (+) / Não (-);
  - ⇒ Abrange tópicos de desempenho económico? Sim (+) / Não (-).

✓ **Utilização do software pela comunidade científica** (cinco níveis qualitativos de performance)

⇒ A % relativa ao número de resultados no Google Scholar é superior a 50%?  
Sim (+) / Não (-);

⇒ A % relativa ao número de resultados no Google Scholar situa-se entre 35 e 50%?  
Sim (+) / Não (-);

⇒ A % relativa ao número de resultados no Google Scholar situa-se entre 10 e 35%?  
Sim (+) / Não (-);

⇒ A % relativa ao número de resultados no Google Scholar situa-se entre 5% e 10%?  
Sim (+) / Não (-);

⇒ A % relativa ao número de resultados no Google Scholar é inferior a 5%?  
Sim (+) / Não (-).

No Anexo I apresentam-se os descritores para cada um dos critérios. Esses descritores construídos tiveram por base as respostas sim (+) e não (-), anteriormente descritas, e foram elaborados através das combinações representadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Combinações utilizadas na construção dos descritores

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
(+)	(+)	(+)
(-)	(+)	(+)
(+)	(-)	(+)
(-)	(-)	(+)
(+)	(+)	(-)
(-)	(+)	(-)
(+)	(-)	(-)
(-)	(-)	(-)

Na figura 3.4 apresenta-se um exemplo do descritor construído para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”.

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Abrange áreas ambiental, social e económica	+++
2		Abrange áreas ambiental e económica, exceto área social	+ - +
3		Abrange áreas ambiental e social, exceto área económica	+ + -
4		Abrange áreas social e económica, exceto área ambiental	- + +
5		Abrange área ambiental, exceto áreas social e económica	+ - -
6		Abrange área económica, exceto áreas ambiental e social	- - +
7		Abrange área social, exceto áreas económica e ambiental	- + -

Figura 3.4 – Exemplo do descritor construído do critério “Tópicos de desempenho abrangidos”

Como se pode observar na figura 3.4, são atribuídas referências superiores (a verde) e inferiores (a azul) para cada descritor qualitativo de performance do critério considerado.

Com base nos descritores para cada um dos critérios são construídas funções de valor que resultam do preenchimento das matrizes de julgamentos consistentes para cada um dos critérios considerados. O M-MACBETH permite, uma vez que todos os critérios foram definidos com níveis qualitativos de performance, obter escalas termométricas que possibilitam uma melhor visualização da escala após a construção da matriz de julgamentos.

A título de exemplo, apresentam-se nas figuras abaixo a matriz de julgamentos e a escala termométrica para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”. No Anexo II é possível observar as matrizes de julgamentos, com as respetivas escalas, para todos os critérios estudados.

	+++	+ - +	+ + -	- + +	+ - -	- - +	- + -	Escala actual	
+++	nula	forte	forte	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	100.00	extrema
+ - +		nula	moderada	forte	forte	forte	mt. forte	77.27	mt. forte
+ + -			nula	moderada	forte	forte	forte	63.64	forte
- + +				nula	forte	forte	forte	50.00	moderada
+ - -					nula	moderada	forte	31.82	fraca
- - +						nula	forte	18.18	mt. fraca
- + -							nula	0.00	nula

Figura 3.5 - Matriz de julgamentos para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”

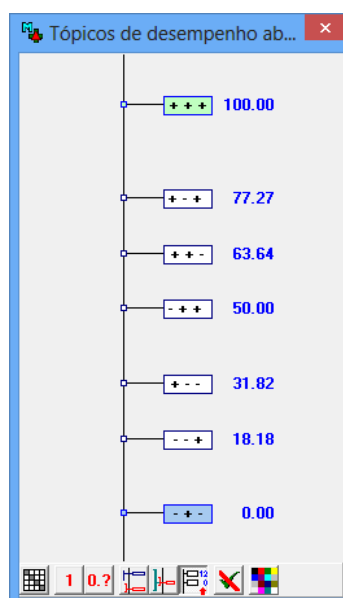


Figura 3.6 – Escala termométrica para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”

As matrizes de julgamentos de cada critério são preenchidas através da inquirição ao decisor sobre qual de dois níveis de performance ele considera mais atrativo. A diferença entre níveis de performance é atribuída de acordo com as sete relações de comparação disponíveis no *software*, ou sejam, sete categorias semânticas de diferença de atratividade, que são: extrema, muito forte, forte, moderada, fraca, muito fraca e nula. Quando se escolhe a relação “extrema” entre dois níveis de performance isso significa que a diferença de atratividade entre esses dois níveis é muito grande; por lado, se se escolher a relação

“nula” não existe diferença de atratividade entre os dois níveis de performance. De referir que o M-MACBETH deteta os julgamentos inconsistentes propostos pelo decisor e apresenta soluções alternativas.

A partir das funções de valor para cada um dos critérios foi possível obter uma pontuação para cada opção, ou seja, para cada tipo de ferramenta informática, segundo cada um dos critérios avaliados, como se pode observar tabela de performances seguinte:

Opções	Aplicação	Tipo_ferramenta	Características	Serviços_apoio	Plataforma	Linguagem	Desempenho	Artigos_científicos
Athena	---	++	++-	+-+	+++	---	+++	--
CMLCA	+++	+-	++-	+++	+++	---	+++	--
COMPASS	---	+-	+++	++-	+++	---	---	--
eVerdEE	---	++	++-	-++	---	---	+++	--
GaBi	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+
GEMIS	+++	++	+++	++-	---	+++	++-	--
OpenLCA	+++	+-	+++	+++	+++	---	++-	-
REGIS	+++	+-	+++	+++	---	++-	+++	--
Savvy	+++	++	+++	+++	+++	---	++-	--
SimaPro	+++	++	+++	+++	+++	++-	+++	++
S_Minds	+++	+-	+++	+++	---	---	+++	--
Umberto	++-	++	+++	+++	---	---	++-	--

Figura 3.7 – Representação da tabela de performances das ferramentas informáticas para cada um dos critérios considerados

Após a construção das funções de valor dos vários critérios e da construção da tabela de performances para as opções consideradas, procedeu-se ainda à ponderação dos critérios de forma a determinar o peso de cada critério. Para isso, definiram-se duas referências: uma inferior e outra superior, obtendo-se assim uma tabela de referências de ponderação que permite a ordenação dos juízos respetivos, como se pode observar na figura abaixo:

Referências globais	Aplicação	Tipo_ferramenta	Características	Serviços_apoio	Plataforma	Linguagem	Desempenho	Artigos_científicos
[ Tipo_ferramenta ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Aplicação ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Características ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Desempenho ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Artigos_científicos ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Apoio ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Linguagem ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ Plataforma ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
[ tudo inf. ]	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++

Figura 3.8 – Representação da tabela de referências de ponderação para os critérios considerados

Estas referências de ponderação de cada um dos critérios podem ser ordenadas consoante cada uma das opções consideradas, através da seguinte tabela de ordenações:

Aplicação	Tipo_ferramenta	Características	Serviços_apoio	Plataforma	Linguagem	Desempenho	Artigos_científicos
+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
GaBi	Athena	COMPASS	GaBi	COMPASS	GaBi	CMLCA	SimaPro
SimaPro	eVerdEE	GaBi	OpenLCA	GaBi	GEMIS	GaBi	GaBi
GEMIS	GaBi	GEMIS	REGIS	OpenLCA	Athena	REGIS	OpenLCA
S_Minds	GEMIS	OpenLCA	Savvy	Savvy	CMLCA	SimaPro	--
OpenLCA	Savvy	REGIS	SimaPro	SimaPro	COMPASS	GEMIS	Athena
REGIS	SimaPro	Savvy	S_Minds	Athena	eVerdEE	OpenLCA	CMLCA
Savvy	Umberto	SimaPro	Umberto	CMLCA	OpenLCA	Savvy	COMPASS
CMLCA	++	S_Minds	Athena	GEMIS	Savvy	Umberto	eVerdEE
Umberto	CMLCA	Umberto	eVerdEE	REGIS	S_Minds	Athena	GEMIS
---	COMPASS	Athena	CMLCA	Umberto	Umberto	COMPASS	REGIS
Athena	OpenLCA	CMLCA	COMPASS	--+	REGIS	eVerdEE	Savvy
COMPASS	REGIS	eVerdEE	GEMIS	eVerdEE	SimaPro	S_Minds	S_Minds
eVerdEE	S_Minds	---	---	S_Minds	---	--	Umberto

Figura 3.9 – Representação da tabela de ordenações das diversas opções segundo os critérios considerados

Depois das opções de ferramentas informáticas serem ordenadas em função de cada um dos critérios, procedeu-se ao preenchimento da matriz de julgamentos de ponderação global através do modo de ponderação simples ou não hierárquico, que se apresenta de seguida:

	[Tipo_ferramenta]	[Aplicação]	[Características]	[Desempenho]	[Artigos_científicos]	[Apio]	[Linguagem]	[Plataforma]	[tudo inf.]	Escala actual	
[Tipo_ferramenta]	nula	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	100.00	extrema
[Aplicação]		nula	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	73.85	mt. forte
[Características]			nula	forte	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	47.69	forte
[Desempenho]				nula	forte	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	35.38	moderada
[Artigos_científicos]					nula	forte	forte	forte	forte	23.08	mt. fraca
[Apio]						nula	moderada	moderada	moderada	11.53	mt. fraca
[Linguagem]							nula	moderada	moderada	10.76	mt. fraca
[Plataforma]								nula	positiva	5.04	mt. fraca
[tudo inf.]									nula	0.00	nula

Julgamentos consistentes

Figura 3.10 – Matriz de ponderação

Esta matriz de ponderação permite a medição da atratividade entre os vários critérios de acordo com o procedimento MACBETH, ou seja, parte-se do nível inferior para o nível

superior do critério mais atrativo, comparando-se todos os outros critérios com ele. O decisor considerou que o critério mais atrativo é “Tipo de ferramenta”, pois para se fazer uma ACV de um produto não é possível sem uma ferramenta de modelação e sem se ter uma base de dados adequadas, e o menos atrativo “Plataforma informática”, uma vez que, atualmente, qualquer *software* está disponível para as plataformas informáticas mais comuns que são as consideradas pelo decisor.

Após a verificação da consistência dos juízos feitos pelo decisor, o M-MACBETH propõe pesos para cada um dos critérios, que podem ou não se modificados por opção do decisor desde que não violem a consistência da matriz de julgamentos. (Bana e Costa *et al.*, 2008)

No caso em estudo, como o modo de ponderação foi o simples, a atribuição dos pesos a cada critério é realizada numa só etapa simultaneamente. (Bana e Costa *et al.*, 2015)

Com o preenchimento da matriz de ponderação torna-se possível, através desta análise qualitativa, a construção de uma escala que reflete os valores correspondentes ao peso de cada critério. Considerou-se uma representação de “pesos *swing*” onde a pontuação máxima de 100 foi atribuída ao critério mais atrativo, ou seja, “Tipo de ferramenta”, tendo os outros critérios um peso relativo comparativamente com esse critério mais atrativo.

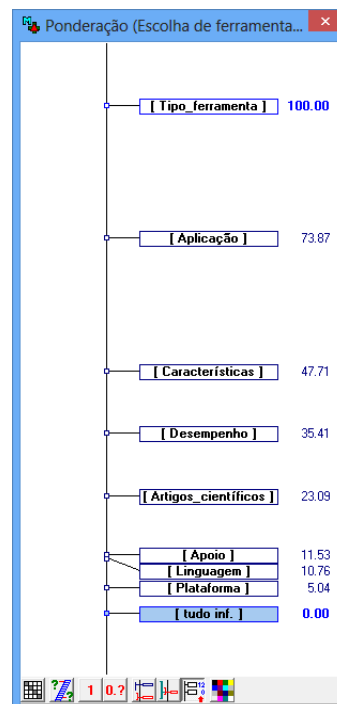


Figura 3.11 – Escala de pesos MACBETH para os critérios considerados

Posteriormente, optou-se pela representação “fixar a soma dos pesos” em que a soma das pontuações de cada um dos critérios totaliza o valor 100, ou seja, normaliza-se os pesos dos critérios. O histograma seguinte permite visualizar essa representação.

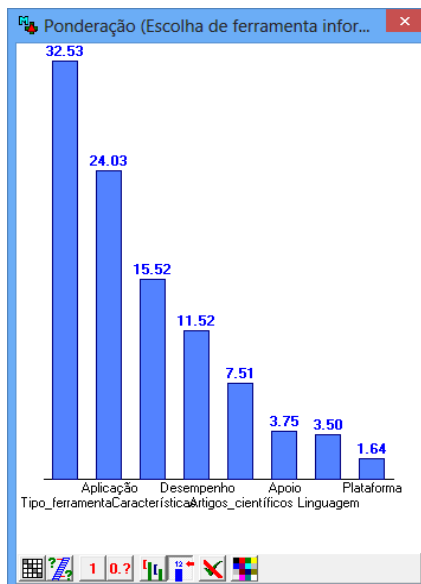


Figura 3.12 – Perfis de ponderação normalizados para cada critério

### 3.3.3 Seleção das ferramentas informáticas – Análises

Após a construção do modelo que traduz a escolha de uma ferramenta informática para a ACV de molas de lâmina na indústria automóvel, incluindo os critérios e as opções a considerar, assim como a atribuição de pesos a cada um dos critérios consoante a sua atratividade, procedeu-se à análise dos resultados determinando-se a pontuação global de cada opção. Para tal, e de modo a se poder hierarquizar as opções por ordem decrescente de atratividade, utilizou-se o modelo aditivo simples, que se exemplifica de seguida:

$$V(a) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot v_i(a)$$

Onde,

$V(a)$ : valor global da alternativa/opção  $a$ ;

$V_i(a)$ : valor parcial da alternativa/opção  $a$  no critério  $i$ ;

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1, \text{ com } k > 0, \text{ com } i = 1, 2, \dots, n \text{ e } k: \text{ peso de cada critério}$$

Assim, a partir da matriz de julgamentos e utilizando o modelo aditivo simples foi possível obter a tabela de pontuações das opções e o respetivo termómetro de pontuações globais que permite uma melhor visualização da ferramenta escolhida.

Opções	Global	Aplicação	Tipo_ferramenta	Características	Serviços_apoio	Plataforma	Linguagem	Desempenho	Artigos_científicos
[ tudo sup. ]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
GaBi	96.25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	50.00
SimaPro	95.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	43.82	100.00	68.91
GEMIS	76.45	55.56	100.00	100.00	55.10	35.49	100.00	77.27	0.00
Savvy	75.18	44.44	100.00	100.00	100.00	100.00	61.80	77.27	0.00
Umberto	67.19	15.56	100.00	100.00	100.00	35.49	61.80	77.27	0.00
Athena	53.49	0.00	100.00	76.47	71.43	35.49	61.80	31.82	0.00
eVerdEE	47.44	0.00	100.00	44.12	59.66	0.00	61.80	31.82	0.00
OpenLCA	44.06	44.44	0.00	100.00	100.00	100.00	61.80	77.27	18.70
REGIS	43.58	44.44	0.00	100.00	100.00	35.49	43.82	100.00	0.00
S_Minds	38.45	55.56	0.00	100.00	100.00	0.00	61.80	31.82	0.00
CMLCA	30.11	15.56	0.00	64.71	55.10	35.49	61.80	100.00	0.00
COMPASS	25.05	0.00	0.00	100.00	55.10	100.00	61.80	31.82	0.00
[ tudo inf. ]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesos :		0.2403	0.3253	0.1552	0.0375	0.0164	0.0350	0.1152	0.0751

Figura 3.13 – Tabela de pontuações das opções

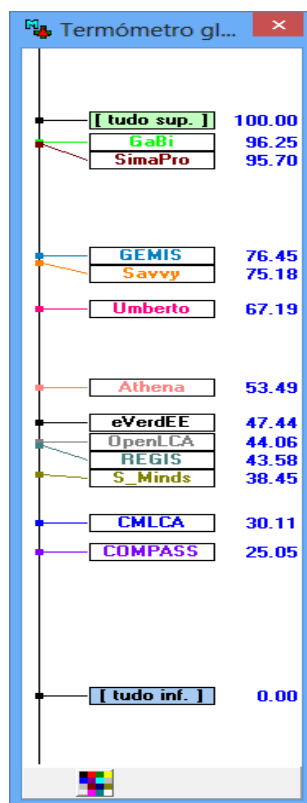


Figura 3.14 – Termómetro de pontuações globais

Após a avaliação multicritério, a ferramenta informática que apresenta maior pontuação, ou seja, melhor performance é a GaBi (96,25). No entanto, a ferramenta SimaPro apresenta uma performance com valores bastante próximos, isto é, tem uma pontuação de 95,70.

Ao se comparar estas duas ferramentas com maior pontuação, observa-se que a diferença entre elas se devem a apenas dois critérios: “Linguagens disponíveis”, onde a GaBi apresenta maior pontuação, e “Utilização do *software* pela comunidade científica”, onde a SimaPro tem um melhor desempenho. Estas conclusões podem ser observadas no perfil de diferenças entre estas duas opções que se apresenta abaixo.

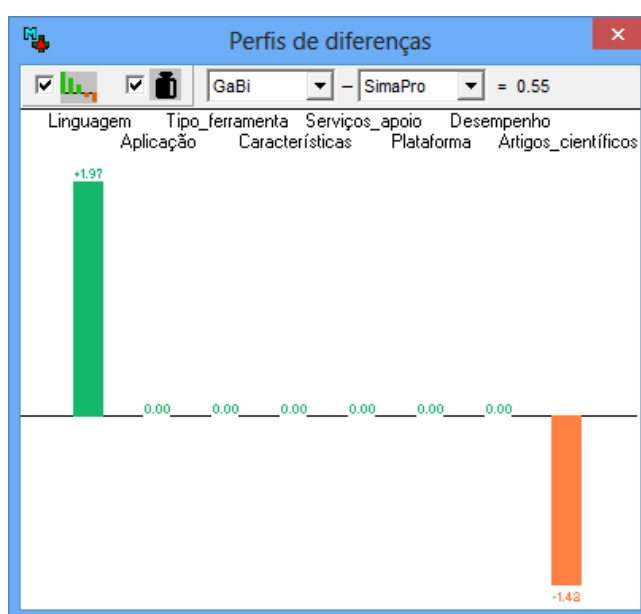


Figura 3.15 – Representação esquemática do perfil de diferenças ponderadas das opções mais atrativas GaBi e SimaPro

Para o decisor poder ter uma melhor argumentação para a sua tomada de decisão pela ferramenta mais adequada à ACV na indústria automóvel, procedeu-se a análises de sensibilidade no peso, de robustez e de benefício-custo, que se apresentam abaixo.

### 3.3.3.1 Análise de sensibilidade no peso dos critérios

Ao efetuar-se uma análise de sensibilidade no peso de um critério é possível aferir em que medida é que uma mudança do peso de um determinado critério afeta as conclusões

retiradas do modelo elaborado, ou seja, permite avaliar se a escolha efetuada é uma ou não robusta.

Normalmente, opta-se por fazer uma análise no peso do critério mais atrativo, ou seja, com maior peso, pois é o que tem maior impacto na pontuação global de cada ferramenta informática para ACV. No entanto, como se pode observar no Anexo III, o peso do critério “Tipo de ferramenta” não influencia a escolha entre a GaBi e a SimaPro, ou seja, as duas ferramentas informáticas com melhores performances. Mais concretamente, seja qual for o peso desse critério a escolha recai sobre a GaBi. Optou-se então por estudar a sensibilidade no peso dos dois critérios que distinguem em termos de pontuação as duas ferramentas referidas, ou sejam, os critérios “Linguagens utilizadas” e “Utilização do *software* pela comunidade científica”. As representações esquemáticas dessas duas análises apresentam-se nas figuras seguintes.

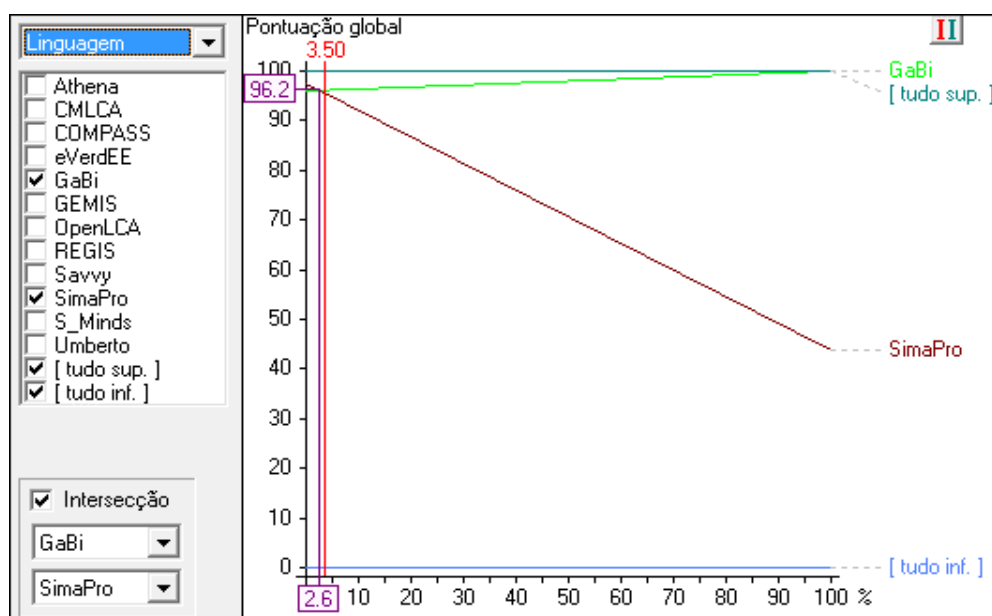


Figura 3.16 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Linguagens disponíveis” para a GaBi e SimaPro

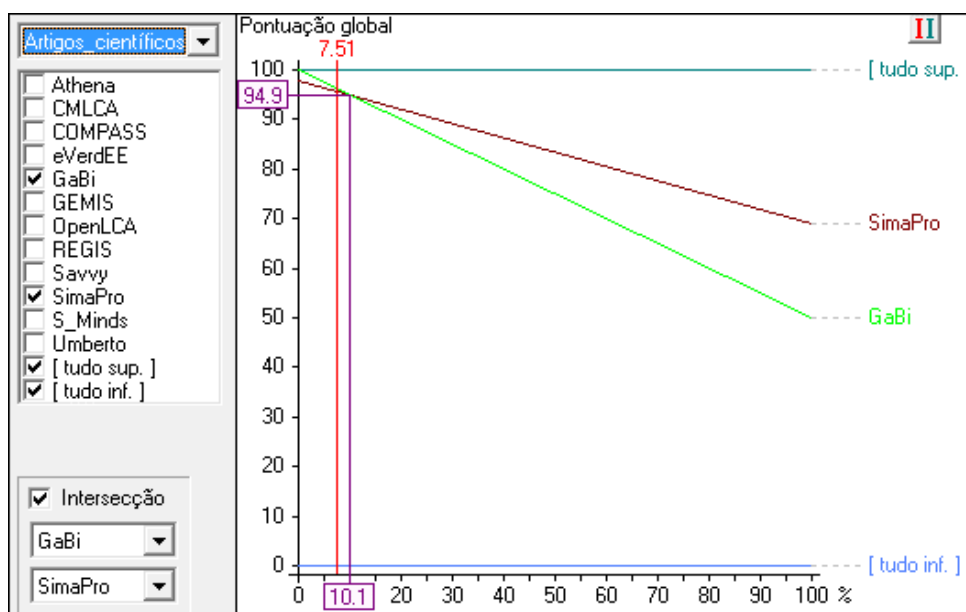


Figura 3.17 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Utilização do *software* pela comunidade científica” para a GaBi e SimaPro

Este tipo de representação gráfica relaciona a pontuação global de cada alternativa de ferramenta informática com o peso de um determinado critério, em que o seu peso está representado pela linha vertical encarnada.

Das análises de sensibilidade no peso efetuadas (Anexo III e figuras 3.16 e 3.17) verifica-se que a escolha efetuada é muito sensível ao peso dos critérios “Linguagens utilizadas” e “Utilização do *software* pela comunidade científica”, pois quando os pesos são inferior a 2,6% e superior a 10,1%, respetivamente, a ferramenta GaBi deixa de ser a mais atrativa em prol da SimaPro.

### 3.3.3.2 Análise de robustez das opções

O decisor quando necessita de efetuar uma tomada de decisão confronta-se muitas vezes com falta de informação, muitas vezes a pouca que existe é imprecisa ou mesma incerta. Por isto, torna-se útil utilizar uma função que o M-MACBETH possui e que se designa por “Análise de robustez”, que permite analisar que conclusões robustas se podem extrair do modelo para níveis variados de escassez, imprecisão ou incerteza na informação. (Bana e Costa *et al.*, 2005)

A informação que se introduz no M-MACBETH pode ser organizada de três formas (ordinal, MACBETH e cardinal) e em duas secções (informação local e informação global):

- **Ordinal:** refere-se apenas à ordenação, excluindo assim qualquer tipo de informação relacionada com as diferenças de atratividade;
- **MACBETH:** inclui os julgamentos semânticos introduzidos no modelo, mas não distingue entre as várias escalas numéricas compatíveis com esses julgamentos;
- **Cardinal:** denota uma escala específica e validada pelo decisor;
- **Local:** relativa a toda a informação específica de um determinado critério;
- **Global:** relacionada com os pesos atribuídos aos critérios. (Bana e Costa *et al.*, 2005)

Optou-se por estudar a análise de robustez que engloba todo o tipo de informação que é introduzida no M-MACBETH.

	[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athens	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi		=	+	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
SimaPro			=	+	+	+	+	+	+	▲	+	+	+	▲
GEMIS				=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	▲
Savvy					=	▲	▲	▲	+	+	+	+	+	▲
Umberto						=	▲	▲	+	+	+	+	+	▲
Athens							=	▲	+	+	+	+	+	▲
eVerdEE								=	+	+	+	+	+	▲
OpenLCA									=	+	+	+	+	▲
REGIS										=	+	+	+	▲
S_Minds											=	+	+	▲
CMLCA												=	+	▲
COMPASS													=	▲
[ tudo inf. ]														=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
	ordinal	MACBETH	cardinal
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ±0%

Figura 3.18 – Representação esquemática da análise de robustez

O símbolo ▲ representa uma situação de “dominância”, ou seja, uma opção domina outra opção se for pelo menos tão atrativa quanto outra em todos os critérios e se for mais

atrativa que outra em pelo menos um dos critérios; o símbolo **+** representa uma situação de “dominância aditiva”, isto é, uma opção domina aditivamente outra opção se, para um determinado conjunto de restrições na informação, resultar sempre globalmente mais atrativa do que a outra opção da aplicação do modelo aditivo. (Bana e Costa *et al.*, 2005)

Assim sendo, pode concluir-se que a ferramenta informática GaBi domina, à exceção da SimaPro, qualquer outra ferramenta informática estudada pois apresenta uma dominância simples relativamente a cada uma delas, ou seja, é mais atrativa do que qualquer uma dessas opções para os critérios considerados. Quanto à SimaPro, a GaBi apresenta uma dominância aditiva, o que significa que ela depende dos valores dos pesos dos critérios “Linguagens disponíveis” e “Utilização do *software* pela comunidade científica” para ser mais atrativa do que a SimaPro.

A partir da análise de robustez (Anexo IV) foi ainda possível calcularam-se as margens de incerteza associadas a cada um dos critérios, como se pode observar na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Margens de incertezas para cada um dos critérios

<b>Critério</b>	<b>Margem de incerteza (%)</b>
Aplicação	± 3
Tipo de ferramenta	robusto
Características da ferramenta	± 22
Serviços de apoio disponíveis	robusto
Plataforma informática	robusto
Linguagens disponíveis	± 7
Tópicos de desempenho abrangidos	± 5
Utilização do <i>software</i> pela comunidade científica	± 4

### 3.3.3.3 Análise de benefício-custo

Para que a tomada de decisão sobre a melhor ferramenta informática para a ACV de molas de lâmina para carroçarias da indústria automóvel fosse o mais fundamentada possível, optou-se por realizar, além das análises de sensibilidade no peso dos critérios e de robustez das opções, uma análise benefício-custo.

Uma análise benefício-custo não é mais do que um gráfico bidimensional que contrasta a pontuação de cada opção ou benefício com o custo a ela associado. Foi então necessário efetuar uma estimativa dos custos inerentes a cada uma das ferramentas informáticas.

Na tabela 3.3 apresentam-se os custos estimados de cada uma das opções tendo por base o custo anual de cada uma delas.

Tabela 3.3 – Custo anual estimado para cada ferramenta informática

<b>Ferramenta informática</b>	<b>Custo anual (€)</b>
Athena	333
CMLCA	0
COMPASS	8000
eVerDEE	0
GaBi	0
GEMIS	---
OpenLCA	0
REGIS	4800
Savvy	---
SimaPro	2625
Sustainable Minds	1960
Umberto	---

Os valores acima apresentados requerem algumas considerações uma vez que a informação sobre os preços associados a estes *softwares* não está facilmente acessível para consulta. Apresentam-se, de seguida, essas considerações:

- O valor apresentado para a ferramenta Athena Impact Estimator for Buildings foi retirado da bibliografia (Hitchcock *et al.*, 2011);
- As informações relativas aos custos das ferramentas COMPASS, CMLCA, OpenLCA e Sustainable Minds obtiveram-se a partir dos respetivos *sites* da internet (“Custos COMPASS, 2015”; “Custos CMLCA, 2015”; “Custos OpenLCA, 2015”; “Custos Sustainable Minds, 2015”);
- O custo associado à ferramenta SimaPro foi obtido considerando a sua licença para estudantes designada por “SimaPro Classroom”, cujo valor anual é de € 2 625 e que pode ser utilizada por quarenta estudantes (“Custos SimaPro, 2015”);

- A ferramenta REGIS apresenta um custo total de compra 4800 €, pois apesar de possuir licenças com preços especiais para estudantes não foi possível obter informação sobre elas (Hitchcock *et al.*, 2011);
- No caso da ferramenta eVerdEE a informação foi retirada do *site* da Comissão Europeia (“Custos eVerdEE, 2015”);
- Para a ferramenta GaBi considerou-se a licença “GaBi Education” disponibilizada gratuitamente a professores e estudantes (“Custos GaBi, 2014”);
- Para as ferramentas GEMIS, SavvyPack System e Umberto não se encontraram quaisquer valores que indicassem o custo de cada uma delas.

Como não foi possível obter os valores de custo de todas as ferramentas estudadas e o facto de que alguns dos que se obtiveram poderem estar desatualizados, optou-se por, em vez de se apresentar graficamente a análise benefício-custo para as todas as opções consideradas, analisar apenas as duas ferramentas informáticas com melhor performance, ou seja, a GaBi e a SimaPro.

Assim, da análise benefício-custo, entre as opções GaBi e SimaPro, escolheu-se a GaBi devido ao facto da sua versão *Education* poder ser obtida a custo zero para professores e estudantes e servir de forma razoável o propósito do caso de estudo proposto, ou seja, a ACV de lâminas de mola fabricadas na indústria automóvel.

### **3.3.3.4 Conclusão**

Após a construção de um modelo multicritério apoiado na metodologia MACBETH conclui-se que a ferramenta informática GaBi é a mais adequada para ser utilizada no estudo de ACV que será efetuado a molas de lâmina utilizadas nos sistemas de suspensão de camiões.

O modelo utilizado, que foi baseado numa avaliação indireta das opções, foi desenvolvido através da construção de funções de valor para cada um dos oito critérios considerados pelo decisor. Este facto permite que este modelo de avaliação não tenha qualquer relação de dependência relativamente às opções de ferramentas informáticas a avaliar.

Foram realizadas análises de sensibilidade nos pesos de cada um dos critérios, onde se verificou que a ferramenta GaBi tem sempre uma pontuação superior a qualquer outra alternativa seja qual for o peso do critério considerado, com exceção da SimaPro em que os pesos dos critérios “Linguagens disponíveis” e “Utilização do *software* pela comunidade científica” podem condicionar a escolha da opção GaBi como a mais atrativa. Também se analisou a robustez das opções, onde se calcularam as margens de incerteza nas pontuações para cada um dos critérios, concluindo-se que a ferramenta GaBi domina aditivamente a SimaPro e tem dominância simples relativamente às outras alternativas de ferramentas informáticas consideradas. Por último, realizou-se uma análise de benefício-custo entre a GaBi e a SimaPro onde se comprovou que a opção escolhida é a mais atrativa porque não é dominada em termos de benefício-custo ao contrário da SimaPro, apesar das suas performances serem bastante semelhantes.

### **3.4 A ferramenta informática GaBi**

A ferramenta GaBi é uma solução de sustentabilidade de produto de última geração com um mecanismo de ACV poderoso de modo a suportar diferentes aplicações empresariais, das quais se destacam: ACV (Design para o ambiente, ecodesign, eco-eficiência, cadeias de valor eficientes), análise de custos de ciclo de vida (redução de custos), relatórios de ciclo de vida (marketing de produto sustentável, relatórios de sustentabilidade, partilha de conhecimentos sobre ACV) e ciclo de vida ocupacional (fabricação responsável).

Na ferramenta informática GaBi existem diferentes tipos de correntes: correntes elementares, não elementares e de rastreamento (*tracking*), pois para calcular o potencial impacte ambiental de um sistema, o *software* necessita de compreender a natureza das correntes de entrada e de saída. Nesta ferramenta todas as correntes devem ser definidas como correntes elementares ou não elementares. As correntes elementares são as que entram na diretamente na tecnosfera a partir do meio ambiente (por exemplo, são todas aquelas correntes que podem ser encontradas na pasta *Resources flow*) e as correntes de saída direta da tecnosfera para a o maio ambiente (por exemplo, todas as correntes das emissões para o ar, água e para o solo). As correntes não-elementares são aquelas que se movimentam apenas dentro da tecnosfera: elas não entram nem saem da tecnosfera diretamente para o meio ambiente. O GaBi requer que se especifique, dentro de um processo, se

uma corrente é elementar, de resíduos ou monitorizada/rastreada (*tracked flow*). (GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1)

O *software* GaBi possui cinco tipos de processos que estão em concordância com o sistema ILCD da União Europeia:

- u-so (*unit process single operation*)

Processo unitário ou processo porta a porta (*gate to gate*). Este tipo de processo contém apenas os dados para um passo processual específico e não tem dados ICV.

- u-bb (*unit process black box*)

O processo “caixa negra” é um processo multifuncional ou uma cadeia de processos ao nível de fábrica/instalação. Este tipo de processo pode representar um grupo de processos em vez de um único passo processual.

- agg (processo de sistema)

Este processo também designado como processo do berço à porta (*cradle to gate*), ao contrário dos processos unitários, contém os dados de uma parte ou de todo o ciclo de vida completo de um sistema de produto.

- p-agg (*partly linked process* - processo parcialmente ligado)

Este processo contém todos os dados ICV à exceção dos dados relativos a uma ou mais correntes de produto que requerem, assim, modelação adicional.

- aps (*avoided product system process* - sistema de produto evitado/prevenido)

Neste tipo de processo todos os fluxos de entrada e de saída são ajustados para valores negativos ou todas as entradas são convertidas em saídas ou vice-versa. Contém a informação do ciclo de vida de um sistema de produto ou parte do sistema que pode ser "salvo" quando um material secundário é substituído por um original. Este tipo de conjunto de dados é tipicamente usado quando se modela alocações e é utilizado no contexto da atribuição de carga ambiental na presença de reciclagem ou reutilização. (GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1)

## 4. Estudo de ACV na indústria automóvel – Estudo de caso

### 4.1 Objetivo do estudo de caso

Este estudo de caso tem como objetivo efetuar uma avaliação do ciclo de vida das molas de lâmina para a indústria automóvel, de modo a identificar qual o benefício para a sociedade, em termos de impactes ambientais, se as molas de lâmina fossem 10% mais leves.

### 4.2 Apresentação da empresa

A empresa em estudo tem, desde 2015, a designação social de Frauenthal Automotive Azambuja, S. A. (FAZ), situando-se as suas instalações na Estrada Nacional n.º 3, Vale do Cardal - 2050-011 Azambuja e sendo o seu número de telefone 263 409 500 e o seu e-mail [azambuja@frauenthal-automotive.com](mailto:azambuja@frauenthal-automotive.com) (“Designação social da FAZ, 2015”; “Localização da FAZ, 2013”)

Esta empresa fabrica essencialmente molas de lâmina em aço utilizadas na suspensão de camiões, idênticas à representada na figura seguinte:



Figura 4.1 – Representação de uma mola de lâmina parabólica

(Presentation Impormol, maio 2012)

A FAZ nasceu no ano de 1964 com a designação de Impormol – Indústria Portuguesa de Molas S.A.R.L., iniciando a sua atividade produtiva em 1967. Em 1990 foi comprada pela HOESCH AG, integrando-se assim numa companhia multinacional. Ao longo dos anos tem sofrido integrações e alterações da sua designação social, as quais se apresentam abaixo:

2001 - Krupp Hoesch Impormol - Indústria Portuguesa de Molas, S. A.

2003 - Thyssenkrupp Impormol Indústria Portuguesa de Molas, S. A.

2006 - Styria Impormol, S. A. Impormol Indústria Portuguesa de Molas, S. A.)

2007 - Styria Impormol S.a

2011 - Styria Impormol, Unipessoal, Lda

2012 - Frauenthal Automotive Azambuja Unipessoal Lda

(Presentation Impormol, maio 2012; “Designação social da FAZ, 2015”)

Executa a sua atividade laboral de 2ª a 6ª feira, 24 horas por dia, em regime de turnos. Tem como principais clientes a Daimler, a Man e a Volkswagen, vendendo também para a Ford e para a Volvo. É uma das maiores fábricas em Portugal na área, produzindo aproximadamente 600 000 molas de lâmina no ano de 2014. A empresa tem uma preocupação contante com a melhoria contínua, sendo certificada pelas normas ISO 14001 para o sistema de gestão do ambiente e pela ISO/TS 16949 para o sistema de gestão da qualidade. (Presentation Impormol, maio 2012)

### **4.3 Descrição do processo produtivo**

O processo de produção de molas de lâmina utilizado pela FAZ tem como principal matéria-prima barras de aço, que devem ter como propriedades um elevado limite elástico e uma grande resistência à fadiga devido às características exigidas às molas.

Esse processo de produção pode ser dividido em várias zonas:

- Zona de corte e furação
- Zona de tratamento térmico
- Zona de tratamento superficial
- Zona de montagem e controlo de qualidade
- Zona de embalamento e expedição

Descrevem-se a seguir o que se passa em cada uma destas zonas.

#### Zona de corte de furação

As operações de corte e furação das peças são realizadas em dois centros de produção independentes. As barras de aço, provenientes do armazém de matérias-primas, são

cortadas nas dimensões especificadas de acordo com o projeto das peças. Após o corte das barras, algumas delas são transportadas para o forno de aquecimento da zona central para a realização da furação através de um punção.

As operações de transformação das barras de aço cortadas e furadas nas molas de lâmina pretendidas são realizadas em linhas de fabrico constituídas por um forno. Neste forno cada uma das secções terminais das lâminas, (uma de cada vez), vão ser aquecidas de modo a permitir a conformação a quente no laminador ( $\approx 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e posterior acerto dimensional na prensa. De seguida, as lâminas são encaminhadas para o centro de enrolamento de olhais, ou seja, para fornos que atingem temperaturas da ordem dos  $450^{\circ}\text{C}$ , de modo a que se dê o aquecimento de cada uma das pontas da lâmina para permitir o seu enrolamento.

#### Zona de tratamento térmico

Esta zona é constituída por uma têmpera (temperaturas  $\approx 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) por arrefecimento em óleo, seguida de um forno de revenido (temperaturas  $\approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) que permite o aço adquirir assim a resistência requerida.

#### Zona de tratamento superficial

Após a saída do forno de revenido, as molas são colocadas em estrados e transportadas para a secção de tratamento superficial, onde recebem o tratamento superficial por granalhagem e pintura.

#### Zona de montagem e controlo de qualidade

Na zona de montagem, após a pintura, as lâminas são montadas em feixes de molas, constituindo, desta forma, o produto final de fabricação. Nesta zona colocam-se também os casquilhos nos olhais e realiza-se o seu acerto. Para garantir um rigoroso controlo de qualidade, as molas passam depois pela balança de prova. Por vezes, quando se considera importante ou quando a pedido do cliente, é seleccionada uma mola completa e é feita a avaliação da sua resistência (até à quebra).

### Zona de embalagem e expedição

Por último, as molas são encaminhadas para a zona de embalagem onde são identificadas e paletizadas em lotes, aguardando, no armazém de produto acabado, a sua posterior expedição para os clientes. (Rosa e Loureiro, 2009; Nicolau, 2014)

Na figura 4.2, apresenta-se uma representação esquemática do processo produtivo das molas de lâmina acima descrito.

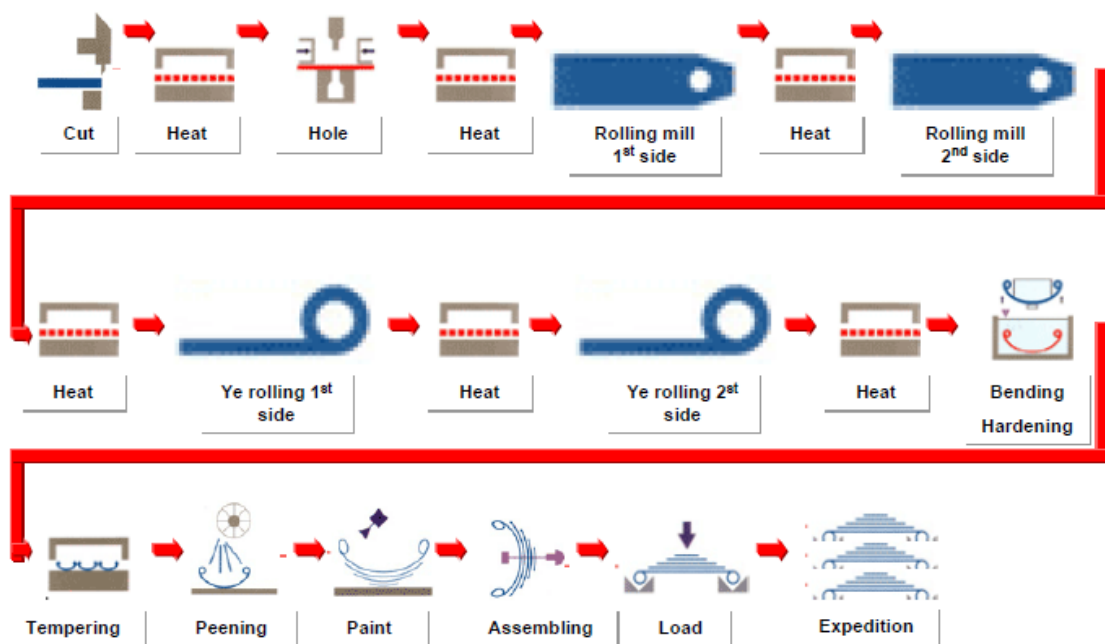


Figura 4.2 – Representação esquemática do processo produtivo de produção de molas de lâmina

(Energy Workshop Report, 2011)

## 4.4 Avaliação do ciclo de vida

### 4.4.1 Fase de definição do objetivo e âmbito

Nas tabelas 4.1 e 4.2 apresentam-se a definição do objetivo e âmbito do estudo de caso realizado. (NP EN ISO 14040, 2008; NP EN ISO 14044, 2010)

Tabela 4.1 – Definição do objetivo do estudo

<b>Aplicação pretendida</b>	Melhorar o design das molas de lâmina de modo a torna-las mais leves
<b>Razões para a realização do estudo</b>	Observar o desempenho ambiental de molas de lâmina mais leves
<b>Público-alvo</b>	Empresa que solicitou o estudo
<b>Resultados para utilização em afirmações comparativas para divulgação pública</b>	Não aplicável

Tabela 4.2 – Definição do âmbito do estudo

<b>Sistema de produto a estudar</b>	Produção de molas de lâmina para sistemas de suspensão de camiões
<b>Unidade funcional</b>	1 mola de lâmina
<b>Fronteiras do sistema</b>	Da produção do aço à sua fase de fim de vida (sem incluir os seus tratamentos de fim de vida – apenas crédito para reciclagem)
<b>Metodologia AICV</b>	ILCD/PEF
<b>Limitações</b>	Processo <i>black box</i> , dados de inventário disponíveis, origem temporal dos dados
<b>Requisitos da qualidade dos dados</b>	Combinação de dados medidos, estimados e calculados de acordo com a informação disponibilizada pela empresa e existentes na base de dados do GaBi Education
<b>Tipo da revisão crítica</b>	Não aplicável
<b>Tipo e formato de relatório requerido para o estudo</b>	Não aplicável

### 4.4.2 Fase do inventário

Consideraram-se oito processos “base” na construção do fluxograma do ciclo de vida das molas de lâmina e outros processos que são necessários para definir completamente os processos “base”. Todos eles são indicados de seguida:

1. Produção de produtos de aço (*BF Steel billet/slab/bloom*)
2. Laminação dos lingotes de aço (*Steel wire rod*)
3. Transporte das barras de aço até à FAZ através de camiões articulados (*Truck-trailer*)
  - 3.1 – Gasóleo (*Diesel mix at refinery*)
4. Processo de produção de molas de lâmina
  - 4.1 – Gás natural (*Natural grid mix*)
  - 4.2 - Água de arrefecimento (*Process Water*)
  - 4.3 - Eletricidade (*Electricity grid mix 1kV - 60kV*)
  - 4.4 - Pintura automóvel, revestimento exterior (*Automotive painting, top coat, per m<sup>2</sup>*)
    - 4.4.1 - Eletricidade (*Electricity grid mix 1kV - 60kV*)
5. Transporte das molas de lâmina da FAZ até aos principais clientes através de camiões articulados (*Truck-trailer* e Processo “Montagem das molas de lâmina no cliente”)
  - 5.1 – Gasóleo (*Diesel mix at refinery*)
6. Uso das molas de lâmina
  - 6.1 - Processo de uso das molas montadas nos camiões (*Truck-trailer*)
    - 6.1.1 - Gasóleo (*Diesel mix at refinery*)
  - 6.2 – Processo de utilização das molas considerando perdas de material (*Use Phase - carbon steel product*)
7. Transporte da sucata de aço até ao seu destino final (*Truck-trailer*)
  - 7.1 - Gasóleo (*Diesel mix at refinery*)
8. Fim de vida das molas de lâmina

Apresenta-se na figura 4.3 o fluxograma do ciclo de vida das molas de lâmina construído através da ferramenta informática GaBi.

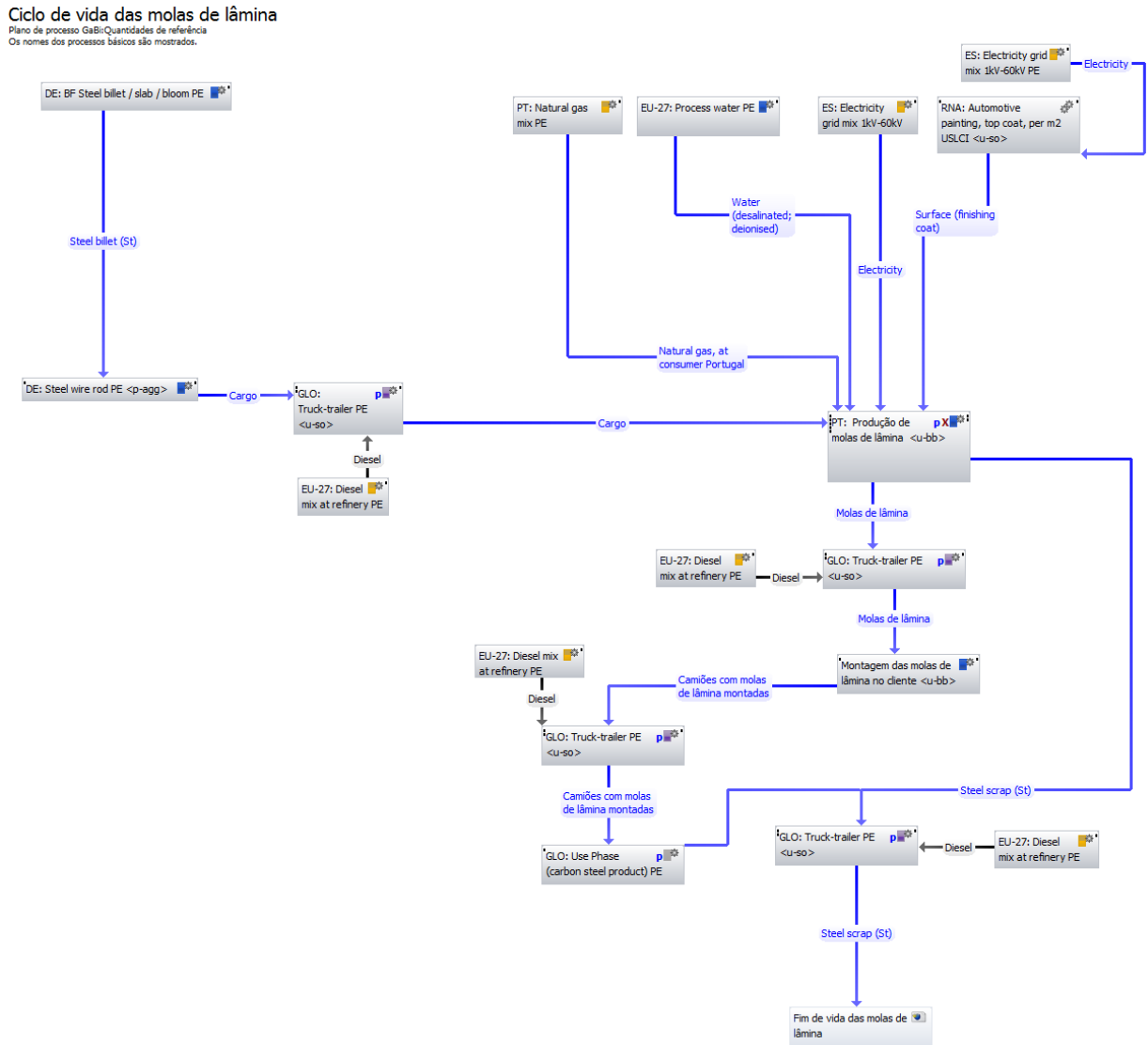


Figura 4.3 - Fluxograma do ciclo de vida das molas de lâmina construído através da ferramenta informática GaBi

Para uma melhor compreensão de cada uma das opções de processos e correntes escolhidas na construção do fluxograma de ciclo de vida para as molas de lâmina, apresentam-se abaixo as descrições detalhadas de cada uma delas.

## 1 – Produção de produtos de aço

Como a FAZ utiliza como matéria-prima principal essencialmente barras de aço de crómio-vanádio (cerca de 95% do aço utilizado na produção de molas), necessita-se de um processo que produza barras de aço em bruto. O *software* GaBi para a produção de aço apresenta as seguintes opções:

Tabela 4.3 – Características dos processos de produção de aço do *software* GaBi

Código geográfico	Nome do processo	Grupo de objetos	Observações
DE	BF Steel billet/slab/bloom	Metal production	BF route production mix, at producer Crude steel
DE	EAF Steel billet/Slab/Bloom	Metal production	EAF route production mix, at producer Crude steel
DE	Steel billet (100Cr6)	Metal production	EAF route - Speciality steel production mix, at producer
DE	Steel billet (16MnCr5)	Metal production	EAF route - Speciality steel production mix, at producer
DE	Steel billet (20MoCr4)	Metal production	EAF route - Speciality steel production mix, at producer
DE	Steel billet (28Mn6)	Metal production	EAF route - Speciality steel production mix, at producer

Uma vez que para o tipo de aço utilizado pela FAZ, o *software* não apresenta nenhum processo de produção específico, restam as duas opções generalistas possíveis para fabrico de lingotes para barras quadradas e retangulares (*billet*), placas/chapas (*slab*) e barras redondas (*bloom*): os percursos de produção designados por EAF (forno de arco elétrico, *Electric Arc Furnace*) e BF (alto-forno integrado com forno básico de oxigénio, *Blast Furnace - Basic Oxygen Furnace*).

As fichas de dados de processo destas duas vias de produção estão de acordo com o definido pela World Steel Association que considera que a maioria dos aços é fabricada através de um seguintes processos de produção (apesar de poderem existir variações e combinações destas vias de produção):

➤ Processo de forno de arco elétrico (EAF, no GaBi).

Neste processo, a sucata de aço é a principal entrada e utiliza-se eletricidade (que pode ser suplementada com a injeção de oxigénio) para fundir esse aço reciclado. Consoante a disponibilidade deste aço e dependendo da configuração da fábrica outras fontes de ferro metálico podem ser adicionadas, como são exemplo o ferro reduzido diretamente ou o metal quente. O aço reciclado é então introduzido dentro de um forno e refundido juntamente com algumas outras matérias-primas. Após a etapa de fusão o aço é transferido para um outro forno onde são adicionados aditivos, tais como as ligas, e onde o aço sofre homogeneização química e térmica de modo a ajustá-lo de acordo com a composição química desejada. A jusante deste processo, ocorrem etapas de fundição, laminação e reaquecimento. (Produção de aço, 2014; Fact sheet, 2014)

Na figura 4.4 pode observar-se a representação esquemática do processo EAF.

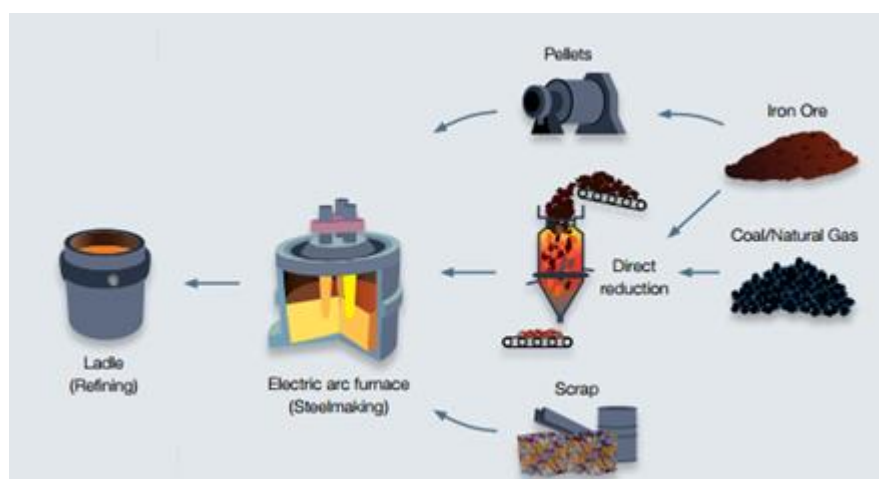


Figura 4.4 – Representação esquemática do processo de produção de aço EAF.

(World Steel Association)

A principal vantagem deste processo é o facto de ele não necessitar de uma alimentação de ferro fundido, eliminando a necessidade de altos-fornos e fornos de coque. É um método relativamente fácil e rápido em que a reciclagem da sucata de aço é um fator importante em termos ambientais uma vez que se poupam recursos como as matérias-primas e a energia. (SOACT, 2010)

➤ Processo integrado (alto-forno e forno básico de oxigénio, BF-BOF: BF, no GaBi).

O processo integrado utiliza matérias-primas como o minério de ferro, carvão (coque), calcário e aço reciclado para produzir aço. Como se pode observar na figura abaixo, em primeiro lugar os minérios de ferro são reduzidos a ferro (também designado por metal quente ou ferro-gusa) e, em seguida, o ferro é convertido a aço no forno básico de oxigénio. Após a fundição e depois de processos de enrolamento e/ ou revestimento, o aço é transformado em bobinas, chapas, secções ou barras. (Fact Sheet, 2014)



Figura 4.5 – Representação esquemática do processo integrado de produção de aço.

(World Steel Association)

Existe ainda uma outra tecnologia de produção de aço, o forno de soleira aberta (OHF, *Open Hearth Furnace*), que representa cerca de 1% da produção mundial de aço. Este processo requer grandes quantidades de energia e está em declínio devido às suas desvantagens ambiental e económica. (Fact Sheet, 2014)

A empresa que fornece as barras de aço à FAZ situa-se no País Basco, em Espanha. Apesar de essa empresa estar a apostar no desenvolvimento do método EAF para a produção de aço e utilizar a sucata no seu processo produtivo, apenas cerca de 29% do aço é produzido através da via de produção EAF. Assim, e devido ao facto da maioria dos produtos de aço permanecerem em uso durante décadas antes que possam ser reciclados, escolheu-se o método integrado como a unidade produtora de barras de aço do inventário de ciclo de vida para as molas de lâmina, pois além de ser a via mundialmente mais utilizada, a procura de

produtos de aço é tal que o aço reciclado por si só, e consequentemente a via de produção EAF, não é suficiente para suprir as necessidades a nível global. (Fact Sheet, 2014)

## 2 – Laminação dos lingotes de aço (*Steel wire rod*)

Após o processo de produção de aço (*BF Steel billet/slab/bloom*), o *software* exige que se escolha um dos processos apresentados na tabela abaixo, de modo a se transformar os lingotes de aço no produto de desejado, que no caso em estudo são as barras laminadas.

Tabela 4.4 – Características dos processos de transformação dos lingotes de aço do *software* GaBi

Código geográfico	Nome do processo	Tipo de processo	Base de dados	Grupo de objetos
DE	Steel wire rod	p-agg	PE	Metal production
GLO	Steel turning	u-so	PE	Part production
US	Iron and steel, production mix	u-so	USLCI	Iron and Steel Mills

Das três alternativas possíveis apresentadas na tabela 4.4: laminação de aço (*steel wire rod*), torneamento de aço (*steel turning*) e produção mista de ferro e aço (*Iron and steel, production mix*), o processo *Steel wire rod* do grupo Produção de Metais (*metal production*) é, segundo informação da FAZ, o processo que mais se adequa ao tipo de barras de aço que recebem como matéria-prima, uma vez que, as barras de aço já vêm pré-laminadas sofrendo depois, durante o processo de produção de molas de lâmina, posteriores laminações.

## 3 - Transporte das barras de aço até à FAZ através de camiões articulados

As barras de aço produzidas em Espanha necessitam de ser transportadas para a fábrica de produção de molas de lâmina FAZ na Azambuja. Para tal, considerou-se que eram transportadas em camiões articulados, uma vez que a empresa fornecedora apresenta na sua página da internet, este tipo de camiões a transportar as barras de aço.

Com o objetivo de reduzir as emissões de poluentes dos veículos que circulam no espaço europeu, nomeadamente no que diz respeito à redução das emissões de partículas e de precursores do ozono, como sejam o óxido de azoto e os hidrocarbonetos, foi publicada no dia 5 de Setembro de 2007, a Diretiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho

que estabelece um quadro para a homologação dos veículos a motor e seus reboques, e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a serem utilizados nesses veículos. Tendo por base esta Diretiva, a União Europeia possui regulamentos (por exemplo, os Regulamentos n<sup>os</sup>. 715/2007, 595/2009, 582/2011, 133/2014) que impõem a implementação das normas Euro a veículos que circulem no espaço europeu. A norma Euro 5 é aplicável desde 1 de setembro de 2009 relativamente à homologação e desde de 1 de janeiro de 2011 no que diz respeito à matrícula e venda de novos tipos de veículos; por seu lado, a norma Euro 6 é aplicável desde 1 de setembro de 2014 no que diz respeito à homologação e a desde 1 de janeiro de 2015 relativamente à matrícula e venda de novos tipos de veículos.

Devido a essas exigências da União Europeia e uma vez que 80% dos fornecedores da FAZ utilizam camiões articulados que cumprem a norma 5 (e 20 % utilizam a norma Euro 4) considerou-se que os camiões articulados que transportam as barras de aço cumprem a norma Euro 5.

Tendo em conta o exposto, a ferramenta informática GaBi apresenta as seguintes opções para os camiões articulados:

Tabela 4.5 – Características dos processos de transporte em camiões articulados do *software* GaBi

<b>Código geográfico</b>	<b>Nome do processo</b>	<b>Tipo de processo</b>	<b>Base de dados</b>	<b>Grupo de objetos</b>	<b>Observações</b>
GLO	Truck-trailer	u-so	PE	Truck	diesel driven, Euro 5, cargo technology mix up to 28t gross weight/12,4t payload capacity
GLO	Truck-trailer	u-so	PE	Truck	diesel driven, Euro 5, cargo technology mix 28-34t gross weight/22t payload capacity
GLO	Truck-trailer	u-so	PE	Truck	diesel driven, Euro 5, cargo technology mix 34-40 t gross weight/27t payload capacity

Os camiões articulados utilizados têm a capacidade de aproximadamente 24,5 toneladas, pelo que se optou por escolher o processo *Truck-trailer* que possui valores de peso bruto (*gross weight*) e capacidade de carga útil (*payload capacity*) intermédios (28-34 toneladas de peso bruto e 22 toneladas de capacidade).

A distância que o camião percorre desde a fábrica das barras de aço em Espanha até à FAZ na Azambuja foi estimada em cerca de 817 km. (“Distância percorrida pelo aço até à FAZ, 2014”)

Este processo de transporte necessita uma corrente de gasóleo (*diesel*) para ficar definido e consequentemente leva à introdução de um novo processo que a disponibilize. Assim, e uma vez que o GaBi não tem disponível nenhum processo que forneça gasóleo com o código geográfico PT, optou-se por considerar o processo abaixo apresentado referente à União Europeia.

Tabela 4.6 – Características do processo de mistura de gasóleo na refinaria do *software* GaBi

Código geográfico	Nome do processo	Tipo de processo	Base de dados	Grupo de objetos	Observações
EU-27	Diesel mix at refinery	agg	PE	Refinery products	from crude oil and bio components production mix, at refinery 10 ppm sulphur, 5.76 wt.% bio components

O processo *Diesel mix at refinery* (mistura de gasóleo na refinaria) provém de uma mistura de componentes derivados do petróleo bruto e de biocomponentes (cerca de 5,76% em peso). Possui ainda enxofre numa concentração de 10 ppm.

Este combustível necessário ao funcionamento dos camiões articulados que transportam as barras de aço é produzido numa das 114 refinarias de petróleo bruto da EU-27 e representa cerca de 27,43% em peso do total dos produtos por elas produzidas. (“Ficha GaBi do processo *Diesel mix at refinery*”)

#### 4 – Processo de produção de molas de lâmina

O processo de produção de molas de lâmina em estudo foi definido com um processo unitário *black box*. Neste processo consideram-se os seguintes parâmetros:

Tabela 4.7 – Parâmetros de entrada e saída do processo de produção de molas de lâmina

<b>Parâmetros de entrada</b>	<b>Parâmetros de saída</b>
Água de arrefecimento	Molas de lâmina
Água potável	RIBs
Barras de aço	RIPs
Eletricidade	Sucata de aço
Gás natural	Partículas
Tintas	NOx
	COVs

Para um melhor entendimento das opções escolhidas relativamente a cada um dos parâmetros, estes serão descritos com maior pormenor de seguida.

### Água de arrefecimento e água potável

Segundo os dados fornecidos pela FAZ, o consumo total de água da empresa divide-se entre a água retirada dos furos (cerca de 80%) e a água potável para satisfazer as necessidades inerentes ao bem-estar dos funcionários (cerca de 20%), como são exemplo a água utilizada para duches e a que é usada no refeitório e nas instalações sanitárias. Convém referir que apesar da água potável não estar relacionada diretamente com o processo produtivo foi considerada, uma vez que é um recurso importante que é consumido em prol do bom funcionamento da unidade industrial que produz as molas de lâmina. Quanto à água retirada dos furos, aproximadamente 20% é utilizada na torre de arrefecimento, cerca de 50% no arrefecimento direto de máquina e 30% no arrefecimento de peças à saída do revenido.

Na tabela 4.8 apresentam-se os consumos de água total, potável e a proveniente de furos durante o ano de 2014.

Tabela 4.8 – Consumos de água total, potável e de furos da FAZ durante o ano de 2014

Data	Consumo total H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Consumo total H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> /t)	Consumo total H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> /mola)	Consumo H <sub>2</sub> O potável (m <sup>3</sup> /mola)	Consumo H <sub>2</sub> O de furos (m <sup>3</sup> /mola)
jan/14	1910	1,344	0,037	0,007	0,029
fev/14	1319	0,922	0,025	0,005	0,020
mar/14	1446	1,066	0,029	0,006	0,023
abr/14	3029	2,021	0,055	0,011	0,044
mai/14	1469	1,075	0,029	0,006	0,023
jun/14	2322	1,535	0,042	0,008	0,034
jul/14	3315	2,008	0,055	0,011	0,044
ago/14	2487	2,441	0,067	0,013	0,053
set/14	2728	1,788	0,049	0,010	0,039
out/14	3175	2,385	0,065	0,013	0,052
nov/14	1435	1,300	0,035	0,007	0,028
dez/14	2585	4,224	0,115	0,023	0,092
<b>Valor médio mensal</b>	<b>2268</b>	<b>10,085</b>	<b>0,050</b>	<b>0,010</b>	<b>0,040</b>

A ferramenta informática GaBi apresenta dois grupos de objetos para correntes de entrada de água que podem conter opções aplicáveis ao processo de produção de molas de lâmina em estudo. São eles: materiais operacionais (*operating materials*) e água (*water*). Na tabela 4.9 apresentam-se alguns tipos de correntes desses grupos de objetos.

Tabela 4.9 – Alguns tipos de correntes disponibilizadas pelo *software* GaBi para os grupos de objetos *Operating materials e Water*

Nome da corrente	Grupo de objetos	Observações
<i>Process and cooling water</i>	<i>Operating materials</i>	
Water (cooling water)	Operating materials	
Water (desalinated; deionised)	Operating materials	
Water	Operating materials	
Water (processed)	Operating materials	
Water (process water)	Operating materials	
Water for industrial use	Operating materials	
Water (tap water)	Operating materials	production mix, at plant water purification treatment
Water (process water)	Operating materials	production mix, at plant from surface water ion exchange
Water (deionised)	Operating materials	production mix, at plant from surface water reverse osmosis
<i>Water</i>	<i>Water</i>	

Como já foi referido, a água retirada dos furos tem como principal função alimentar uma unidade de processo (a torre de alimentação) e arrefecer máquinas e peças. Como tal, optou-se por escolher a corrente *Process and cooling water* (água de processo e arrefecimento) como representante da água retirada dos furos consumida.

Como a corrente *Process and cooling water* é uma corrente rastreada ou sequenciada torna-se necessário um processo que lhe dê origem. As opções de processos que podem originar uma corrente deste tipo apresentam-se na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Características dos processos que poderão produzir a corrente *Process and Cooling Water*

Código geográfico	Nome do processo	Tipo de processo	Base de dados	Grupo de objetos	Observações
EU-27	Process water	agg	PE	Water	ion exchange production mix, at plant from groundwater
EU-27	Process water	agg	PE	Water	ion exchange production mix, at plant from surface water
EU-27	Tap water	agg	PE	Water	water purification treatment production mix, at plant from groundwater
EU-27	Tap water	agg	PE	Water	water purification treatment production mix, at plant from surface water
EU-27	Water (deionised)	agg	PE	Water	reverse osmosis production mix, at plant from surface water
EU-27	Water (deionised)	agg	PE	Water	reverse osmosis production mix, at plant from groundwater

O processo escolhido foi o *Process Water - ion exchange|production mix, at plant|from groundwater* (água de processo - troca iónica|mistura de produção, na fábrica|proveniente de águas subterrâneas).

Relativamente à água potável utilizada optou-se por escolher a corrente elementar *Water* do grupo de objetos *Water* pois esta corrente é um recurso que entra diretamente na tecnosfera, não necessitando assim de um processo que lhe dê origem. Esta opção foi tomada tendo em conta que os processos disponíveis *Tap water* (água da torneira) referem-se a águas potáveis tratadas na própria fábrica, facto que não representa a realidade da FAZ que utiliza a água potável proveniente dos Serviços Municipalizados locais já que não possui nenhuma unidade de tratamento de água para consumo humano.

### **Barras de aço**

A corrente de entrada “Barras de aço” resulta da soma das correntes de saída “Molas de lâmina” e “Sucata de aço”, pois a quantidade de barras de aço que entra na fábrica tem que ser suficiente para produzir a quantidade de molas de lâmina desejada tendo em conta todas as perdas de material que ocorrem durante o seu processo produtivo.

## **Eletricidade**

De modo a fornecer uma corrente rastreada de eletricidade do grupo de objetos *Electric power* (energia elétrica), necessária para que ao processo de produção de molas de lâmina, escolheu-se o processo *Electricity grid mix 1kV-60kV* (mistura de rede elétrica – 1kV-60kV) que produzirá essa eletricidade como uma sua corrente de saída, pois a voltagem fornecida à FAZ é de 30 kV. Apesar de se ter a opção do processo *Electricity grid mix 1kV-60kV* ser o de Portugal (código geográfico PT), a eletricidade utilizada pela FAZ é comprada a Espanha, pelo que se optou pelo mesmo processo mas com o código geográfico ES. O processo de eletricidade consumida referido pode ser observado na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Características do processo de eletricidade consumida do *software* GaBi

<b>Código geográfico</b>	<b>Nome do processo</b>	<b>Tipo de processo</b>	<b>Base de dados</b>	<b>Grupo de objetos</b>	<b>Observações</b>
ES	Electricity grid mix 1kV-60kV	agg	PE	Electricity grid mix	AC, technology mix consumption mix, at consumer 1kV - 60kV

Segundo a ficha de dados de processo, ele representa o fornecimento de 1 kWh de média tensão (1kV - 60kV) de energia elétrica, com corrente alternada (AC – *Alternating Current*), a consumidores finais. A alternativa a esta opção seria uma mistura de rede elétrica menor que 1 kV utilizada por consumidores de eletricidade de baixa tensão como são o caso de pequenas e médias empresas e os consumidores particulares.

Quer em Espanha, quer mesmo em Portugal, a energia elétrica fornecida pelos diversos operadores, é uma mistura de rede elétrica pois a eletricidade não provêm somente de uma única fonte, como por exemplo, apenas do vento, do gás natural, da biomassa, do biogás, do carvão ou do petróleo. Nas figuras seguintes estão representadas as contribuições de diferentes fontes de energia para as redes elétricas nacional e espanhola para o ano de 2014.

Nas figuras seguintes apresentam-se as representações esquemáticas das contribuições de diferentes fontes de energia para a rede elétrica nacional e espanhola para o ano de 2014.

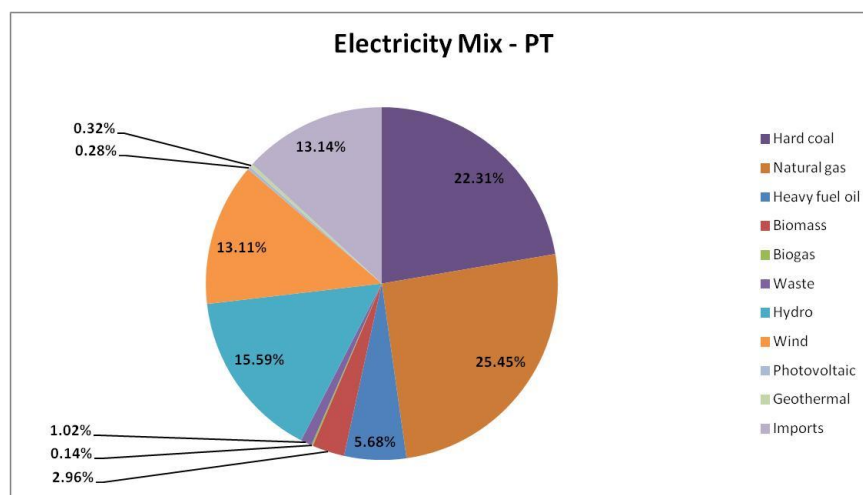


Figura 4.6 – Representação esquemática das contribuições de diferentes fontes de energia para a rede elétrica nacional para o ano de 2014

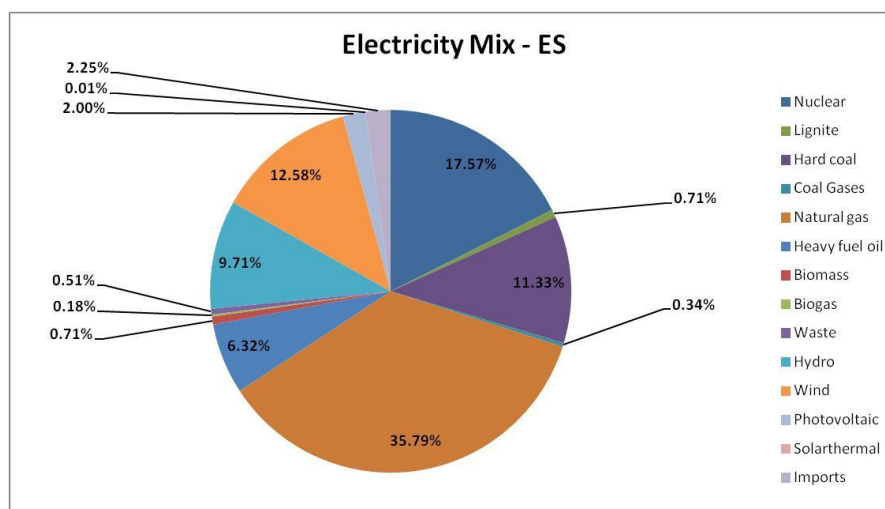


Figura 4.7 – Representação esquemática das contribuições de diferentes fontes de energia para a rede elétrica espanhola para o ano de 2014

Verifica-se, através da análise da figura 4.6, que a eletricidade fornecida em Portugal é maioritariamente produzida através do gás natural (25,45%) e do carvão da hulha (22,31%). As energias renováveis hídricas e eólica já têm alguma expressão na produção elétrica contribuindo, respetivamente, com 15,59% e 13,11%. No entanto, as outras fontes de energia (biomassa, biogás, resíduos, fotovoltaica e geotérmica) ainda não têm uma expressão considerável, importando Portugal cerca de 13,14% da energia elétrica que fornece aos seus grandes consumidores de média tensão. (“Ficha GaBi do processo *PT: Electricity grid mix 1kV-60kV*”)

Quanto à energia elétrica fornecida por Espanha observa-se, através da figura 4.7, que utiliza o gás natural como maior contribuidor para essa rede elétrica (35,79 %), seguida das fontes nucleares (17,57%). A energia eólica contribui com 12,58%, a proveniente do carvão da hulha com 11,33 % e a hídrica com 9,71%. De referir ainda que Espanha importa cerca de 2,25% da energia que fornece aos seus consumidores (“Ficha GaBi do processo *ES: Electricity grid mix 1kV-60kV*”) Apesar da empresa fornecedora de energia elétrica à FAZ apresentar diferentes contribuições relativas às principais fontes produtoras de energia (carvão: 31%; hídrica: 30%; cogeração fóssil: 11%; nuclear: 10%; eólica: 7%; gás natural: 5%), há que referir que os valores utilizados na ACV foram os existentes na base de dados do GaBi (figura 4.7) e que têm como data de validade o ano de 2014, pelo que poderá existir alguma discrepância com a realidade.

Na tabela 4.12, apresenta-se o consumo de energia elétrica efetuado pela FAZ durante o ano de 2014.

Tabela 4.12 – Consumos de energia elétrica da FAZ durante o ano de 2014

Data	Consumo energia elétrica (kwh)	Consumo energia elétrica (kwh/t)	Consumo energia elétrica (kwh/mola)
jan/14	617764	435	11,868
fev/14	614027	429	11,722
mar/14	577095	425	11,610
abr/14	583506	389	10,627
mai/14	562619	412	11,236
jun/14	600118	397	10,828
jul/14	575502	349	9,516
ago/14	443451	435	11,880
set/14	589333	386	10,543
out/14	533491	401	10,942
nov/14	545862	494	13,498
dez/14	223597	365	9,974
<b>Valor médio mensal</b>	<b>538864</b>	<b>410</b>	<b>11,187</b>

## **Gás natural**

A introdução de uma corrente de gás natural no consumidor em Portugal (*Natural gas, at consumer Portugal*) permite refletir os valores do consumo de gás natural de 2014 apresentados na tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Consumos de gás natural da FAZ durante o ano de 2014

<b>Data</b>	<b>Consumo gás natural (kwh)</b>	<b>Consumo gás natural (kwh/t)</b>	<b>Consumo gás natural (m3/t)</b>	<b>Consumo gás natural (m3/mola)</b>
jan/14	3348658	2357	198	5,404
fev/14	3230270	2259	190	5,180
mar/14	3130975	2307	194	5,291
abr/14	3250837	2169	182	4,973
mai/14	3030450	2217	186	5,084
jun/14	3208586	2121	178	4,863
jul/14	3532202	2139	180	4,906
ago/14	2135915	2096	176	4,807
set/14	3364722	2205	185	5,056
out/14	3290357	2472	208	5,669
nov/14	2777382	2516	211	5,769
dez/14	1217695	1990	167	4,563
<b>Valor médio mensal</b>	<b>2959837</b>	<b>2237</b>	<b>188</b>	<b>5,130</b>

O consumo de gás natural em m<sup>3</sup> por tonelada de molas produzidas foi calculado tendo em conta que 1 m<sup>3</sup> de gás natural corresponde a aproximadamente 11,85 kWh, ou seja, 1 kWh corresponderão a 0,084 m<sup>3</sup>. (“Correspondência m<sup>3</sup> para kWh de gás natural, 2015”)

De seguida, apresentam-se as características da corrente *Natural gas mix* utilizada.

Tabela 4.14 – Características do processo de fornecimento de gás natural a Portugal do *software* GaBi

<b>Código geográfico</b>	<b>Nome do processo</b>	<b>Tipo de processo</b>	<b>Base de dados</b>	<b>Grupo de objetos</b>	<b>Observações</b>
PT	Natural gas mix	agg	PE	Natural gas mix	technology mix consumption mix, at consumer medium pressure level (< 1 bar)

Na figura abaixo, pode observar-se que a mistura de gás natural que é fornecido a Portugal provêm maioritariamente da Argélia (45,14%) e da Nigéria (43,12%). (“Ficha GaBi do processo *Natural gas mix*”)

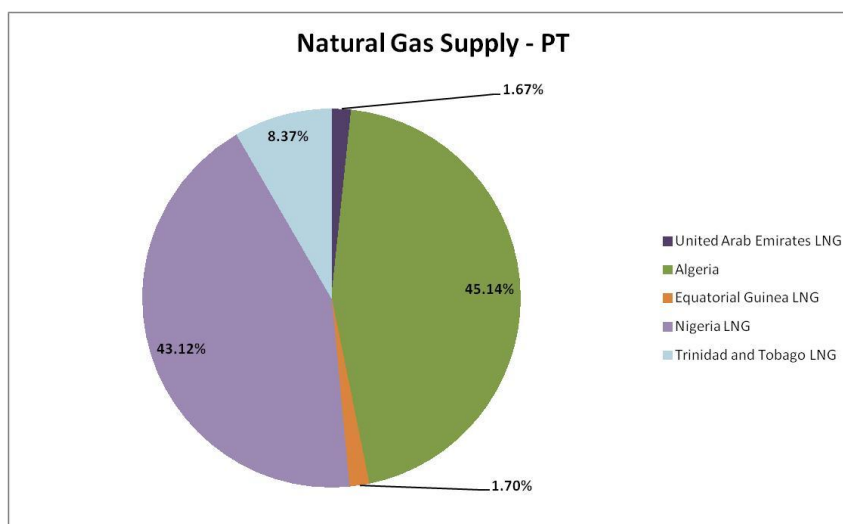


Figura 4.8 – Representação esquemática dos países que fornecem gás natural a Portugal

## Tintas

A tinta utilizada na pintura das molas de lâmina é de base essencialmente aquosa formulada com copolímeros vinílicos e pigmentos anticorrosivos não tóxicos, com boas propriedades de adesão e excelentes propriedades anti-corrosivas. (Ficha técnica da tinta, 2010)

Essa tinta é classificada quimicamente como mistura contendo as seguintes substâncias perigosas:

- copolímero acrílico de vinil: 10-25%;
- 2-butoxietanol: 1-2,5%, VLE: valor de longa exposição 20 ppm;
- óxido de zinco: 1-2,5%;
- amoníaco:  $\leq 0,5\%$ . (Ficha de dados de segurança da tinta, 2014)

A versão do GaBi utilizada não tem disponível nenhuma tinta deste tipo, isto é, não existem correntes de entrada que sejam uma resina composta por um copolímero acrílico de vinil ou que permita utilizar o 2-butoxietanol como solvente constituinte da tinta. As opções do *software* para correntes de entrada de tintas são:

Tabela 4.15 – Alguns tipos de tintas do grupo de objetos *Paints* do *software* GaBi

Nome da corrente	Grupo de objetos
Emulsion paint (scouring proof)	Paints
Indoor paint (Abrasion resistant)	Paints
Primers and facade paints	Paints

Inicialmente, ponderou-se a hipótese de utilizar o tipo de tinta de emulsão resistente à água (*emulsion paint – scouring proof*) porque tanto a tinta de interior resistente à abrasão (*indoor paint – abrasion resistant*) como as tintas de exterior e primários (*primers and facade paints*) são menos adequados ao tipo de material de aço onde serão utilizados. No entanto, como a corrente de entrada *Emulsion paint* é rastreada torna-se necessário um processo que lhe dê origem. As opções para processos que envolvem pintura disponíveis são:

Tabela 4.16 – Características dos processos pintura de partes de veículos automóveis do *software* GaBi

Código geográfico	Nome do processo	Tipo de processo	Base de dados	Grupo de objetos
RNA	Automotive painting, top coat, per vehicle	u-so	USLCI	Motor Vehicle Body Manufacturing
RNA	Automotive painting, top coat, per m2	u-so	USLCI	Motor Vehicle Body Manufacturing
RNA	Automotive painting, pretreatment	u-so	USLCI	Motor Vehicle Body Manufacturing
RNA	Automotive painting, electrocoating, per vehicle	u-so	USLCI	Motor Vehicle Body Manufacturing
RNA	Automotive painting, electrocoating, per m2	u-so	USLCI	Motor Vehicle Body Manufacturing

Porém, qualquer um destes processos de pintura automóvel não é compatível com a escolha de uma corrente de entrada do grupo Tintas (*Paints*) acima identificado.

Assim, tornou-se necessário optar não por uma corrente de entrada de tintas mas sim por uma de um sistema de pintura, cujas opções do Gabi são:

Tabela 4.17 – Alguns tipos de sistemas de pintura do *software* GaBi

Nome da corrente
Surface (pretreatment)
Surface (electrocoat)
Surface (primer)
Surface (base coat)
Surface (clear coat)
Surface (ground coat)
Surface (finishing coat)
Surface (unspecified)

Escolheu-se o sistema de pintura Superfície - revestimento final (*surface, finishing coat*), uma vez que que as molas de lâmina são pintadas de modo a que essa pintura funcione como um processo de revestimento final das lâminas contra a corrosão a que estão sujeitas durante a sua fase de uso.

Relativamente à escolha do processo que rastreie esse sistema de pintura, optou-se então pelo processo Pintura automóvel, revestimento exterior, por  $m^2$  (*automotive painting, top coat, per m<sup>2</sup>*), porque os processos de pintura automóvel eletrostática ou lacagem (*automotive painting, electrocoating*) ou os que funcionam como pré-tratamento da peça de aço (*automotive painting, pretreatment*) não são adequados no caso em estudo.

A escolha referida requiere uma estimativa da área de uma mola de lâmina. Através das informações dadas pela FAZ, as dimensões médias de uma lâmina são sensivelmente: 1200 mm de comprimento (L), 70 mm de largura (W) e cerca de 15 mm de espessura (Th). Assim a área média de uma mola de lâmina, considerando-a um paralelepípedo, é:

$$\text{Área de uma mola: } 2 \times [(L \times W) + (L \times Th) + (W \times Th)] = 0,21 \text{ m}^2$$

O processo *Automotive painting, top coat, per m<sup>2</sup>* necessita de eletricidade para ficar corretamente definido.

## **Resíduos Industriais Banais**

Os resíduos industriais banais, designados pelo parâmetro RIBs, são um conjunto de desperdícios produzidas na FAZ que incluem os seguintes materiais não perigosos: papel, plástico, vidro, madeira, luvas gastas.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores de RIBs produzidos durante o ano de 2014.

Tabela 4.18 – Produção de resíduos industriais banais (RIBs) pela FAZ durante o ano de 2014

<b>Data</b>	<b>Produção RIBs (kg)</b>	<b>Produção RIBs (kg/t)</b>	<b>Produção RIBs (kg/mola)</b>
jan/14	4710	3,31	0,090
fev/14	6630	4,64	0,127
mar/14	5450	4,02	0,110
abr/14	7160	4,78	0,130
mai/14	4430	3,24	0,088
jun/14	2400	1,59	0,043
jul/14	4140	2,51	0,068
ago/14	5380	5,28	0,144
set/14	3870	2,54	0,069
out/14	4490	3,37	0,092
nov/14	3280	2,97	0,081
dez/14	6440	10,52	0,287
<b>Valor médio mensal</b>	<b>4865</b>	<b>4,06</b>	<b>0,111</b>

Segundo informação da empresa em estudo, estes resíduos são separados e sofrem posterior tratamento de valorização em entidades externas. No entanto, não foi possível aferir o tipo de tratamento a que cada um destes resíduos industriais banais é sujeito (reutilização, reciclagem, incineração), bem como a quantidade exata de cada um. Por tudo isto, optou-se por representar o parâmetro RIBs através de uma corrente generalista de “Resíduos não perigosos para posterior processamento” (*Non-hazardous waste for further processing*), o que permite uma abrangência das opções de valorização de todos os resíduos industriais banais produzidos.

## **Resíduos Industriais Perigosos**

Os resíduos industriais perigosos (RIPs) produzidos pela FAZ são essencialmente provenientes de tintas, absorventes e óleos. Na tabela seguinte apresentam-se os valores produzidos no decorrer do ano de 2014.

Tabela 4.19 – Produção de resíduos industriais perigosos (RIPs) pela FAZ durante o ano de 2014

<b>Data</b>	<b>Produção RIPs (kg)</b>	<b>Produção RIPs (kg/t)</b>	<b>Produção RIPs (kg/mola)</b>
jan/14	20386	14,35	0,392
fev/14	4883	3,41	0,093
mar/14	17152	12,64	0,345
abr/14	20247	13,51	0,369
mai/14	15726	11,50	0,314
jun/14	2195	1,45	0,040
jul/14	22607	13,69	0,374
ago/14	2859	2,81	0,077
set/14	34446	22,57	0,616
out/14	19987	15,02	0,410
nov/14	22306	20,20	0,552
dez/14	2934	4,79	0,131
<b>Valor médio mensal</b>	<b>15477</b>	<b>11,33</b>	<b>0,309</b>

Para representar estes resíduos industriais perigosos designou-se o parâmetro RIPs e apresenta-se na tabela 4.20 as quatro opções de correntes disponibilizadas pelo *software* passíveis de o caracterizar.

Tabela 4.20 – Alguns tipos de correntes de resíduos industriais perigosos (tintas e solventes) disponibilizados pelo *software* GaBi

<b>Nome da corrente</b>	<b>Grupo de objetos</b>
Paint, solvents	Hazardous waste for disposal
Solvent	Hazardous waste for recovery
Painting sludge	Hazardous waste
Painting sludge	Hazardous waste for recovery

Optou-se pela corrente *Paint, solvents* (tintas, solventes) do grupo de objetos *Hazardous waste for disposal* (resíduos perigosos para eliminação) porque é a corrente que caracteriza os resíduos perigosos produzidos de uma forma mais geral.

### **Sucata de aço**

Na produção de molas são produzidos desperdícios de material (aço) que resultam do corte das barras de aço de modo a estas assumirem a forma e tamanho desejados das molas de lâmina pretendidas. Na tabela encontram-se os valores mensais e o valor médio mensal desses desperdícios ou sucata de aço, segundo o parâmetro definido no GaBi.

Tabela 4.21 – Produção de sucata de aço pela FAZ durante o ano de 2014

<b>Data</b>	<b>Sucata de aço (kg)</b>	<b>Sucata de aço (kg/t)</b>	<b>Sucata de aço (kg/mola)</b>
jan/14	135084	95,06	2,595
fev/14	160388	112,16	3,062
mar/14	165400	121,89	3,328
abr/14	198562	132,46	3,616
mai/14	129420	94,67	2,585
jun/14	144821	95,72	2,613
jul/14	165060	99,98	2,729
ago/14	133312	130,83	3,572
set/14	168020	110,10	3,006
out/14	163060	122,51	3,345
nov/14	134140	121,50	3,317
dez/14	74340	121,47	3,316
<b>Valor médio mensal</b>	<b>147634</b>	<b>113,20</b>	<b>3,090</b>

A corrente escolhida para representar este parâmetro Sucata de aço foi a corrente definida como *Steel scrap (St)*, ou seja, foi uma corrente de sucata de aço padrão pois o aço utilizado em todo o ciclo de vida das molas derivou de processo de produção de um aço geral e não com características específicas, isto é, o aço produzido através do processo escolhido *Blast Furnace* não é um aço com quantidades bem definidas de elementos químicos que compõem a liga, mas simplesmente um aço.

## Emissões gasosas

Em termos de emissões gasosas são produzidas partículas, compostos orgânicos voláteis (COVs) e óxidos de azoto (NOx). Na tabela abaixo, apresentam-se as emissões destes poluentes, medidas em 2013 em diferentes zonas da fábrica. Segundo informação da FAZ o próximo controlo destes poluentes será realizado em 2016.

Tabela 4.22 – Produção de emissões gasosas (partículas, COVs e NOx) por zonas da fábrica da FAZ durante o ano de 2014

Zona	Partículas (mg/Nm <sup>3</sup> )	COVs (mg/Nm <sup>3</sup> )	NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )
Granalhas	29,9	---	---
Tratamento térmico	20	41	---
Pinturas	31,9	252	---
Queimadores	52,525	386	659
<b>Total</b>	<b>134</b>	<b>679</b>	<b>659</b>

Na FAZ produz-se um caudal de emissões gasosas de cerca de 10000 m<sup>3</sup> por hora. Uma vez que a fábrica trabalha 15 horas por dia e 240 dias por ano, o caudal anual de efluentes gasosos produzidos é:

$$\text{Caudal anual de emissões gasosas} = \frac{10000 \text{ m}^3}{\text{hora}} \times \frac{15 \text{ hora}}{\text{dia}} \times \frac{240 \text{ dia}}{\text{ano}} = 3,6 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Como a produção anual de molas de lâmina são aproximadamente  $6,0 \times 10^5$ , então:

$$\text{Caudal emissões gasosas por mola} = \frac{3,6 \times 10^7 \text{ m}^3}{\text{ano}} \times \frac{1 \text{ ano}}{6,0 \times 10^5 \text{ mola}} = 60 \text{ m}^3/\text{mola}$$

Assim, apresenta-se na tabela 4.23 a concentração e a quantidade de emissões gasosas produzidas por mola na fábrica.

Tabela 4.23 – Concentração e quantidade por mola de emissões gasosas (partículas, COVs e NOx)

Emissões gasosas	Concentração (mg/Nm <sup>3</sup> )	Quantidade por mola (mg)
Partículas	134	8060
COVs	679	40740
NOx	659	39540

As correntes associadas a estas emissões gasosas foram: *Metals- unspecified* (metais – não especificados) para as partículas; *Nitrogen oxides* (óxidos de azoto) para os NOx e *VOC-unspecified* (COVs – não especificados) para os COVs.

Na figura 4.9 apresenta-se um resumo das correntes de entrada e saída com os seus respetivos valores relativos ao processo “Produção de molas de lâmina”

Entradas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fluxos sequenciados/	Origem
Eletricidade	Electricity [Electric power]	Energy (net calorific value)	11,2	1	kWh	X	Measured
Gás_natural	Natural gas, at consumer Portugal [Natural gas, at consumer]	Standard volume	5,13	1	Nm3	X	Measured
Agua_arrefecime	Process and cooling water [Operating materials]	Volume	0,04	1	m3	X	Measured
Barras_aço	Steel part [Metal parts]	Mass	30,4	1	kg	X	Calculated
Tintas	Surface (finishing coat) [Paint-systems]	Area	0,21	1	sqm	X	Estimated
Agua_potavel	Water [Water]	Volume	0,01	1	m3		Measured
Fluxo							
<							
Saídas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fluxos sequenciados/	Origem
Molas_lâmina	Molas de lâmina [Metal parts]	Mass	27,3	1	kg	X	Calculated
Sucata_aço	Steel scrap (St) [Waste for recovery]	Mass	3,09	1	kg	X	Measured
Partículas	Metals (unspecified) [Particles to air]	Mass	8,06E003	1	mg	*	Measured
NOx	Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	Mass	3,95E004	1	mg	*	Measured
COVs	VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]	Mass	4,07E004	1	mg	*	Measured
RIBs	Non-hazardous waste for further processing [Waste for recovery]	Mass	0,111	1	kg		Measured
RIPs	Paint, solvents [Hazardous waste for disposal]	Mass	0,309	1	kg		Measured
Fluxo							

Figura 4.9 – Fluxos de entrada e saída do processo “Produção de molas de lâmina”

## 5 - Transporte das molas de lâmina da FAZ até aos principais clientes através de camiões articulados

As molas de lâmina produzidas na FAZ na Azambuja são depois enviadas para os clientes onde serão sujeitas posteriormente a um processo de montagem nos camiões para os quais foram concebidas. Considerou-se que são transportadas em camiões articulados a gasóleo que cumprem a norma Euro 5, com 28-34 toneladas de peso bruto e com uma capacidade de carga útil de 22 toneladas.

O processo representativo do combustível utilizado, tal como no caso do transporte das barras de aço da fábrica até à FAZ, foi o processo agg “*Diesel mix at refinery*” com o código geográfico EU-27.

Os principais clientes das molas de lâmina da FAZ situam-se na Alemanha e na Polónia. Cerca de 50% da produção de molas destinam-se a Dusseldorf, 40% a Ludwigsfelde e 10

% a Poznan. A distância que o caminhão tem de percorrer para fazer chegar as molas a esses clientes foi calculada através da média ponderada entre a FAZ e as respectivas fábricas de montagem das molas em camiões. Assim, através do Google Maps, calcularam-se as distâncias médias e a calculou-se depois o valor médio ponderado da distância de transporte das lâminas até aos clientes, como se pode observar na tabela seguinte.

Tabela 4.24 – Distância média ponderada relativa ao transporte das molas da FAZ aos clientes

<b>Cientes</b>	<b>Distância média (km)</b>	<b>Percentagem de molas expedidas</b>
Dusseldorf	2251	50%
Ludwigsfelde	2757	40%
Poznan	2922	10%
<b>Média ponderada da distância (km)</b>	<b>2521</b>	

Depois das molas chegadas aos clientes considerou-se o processo *black box* “Montagem das molas de lâmina no cliente”, onde entram molas de lâmina e saem camiões com molas de lâmina montadas. Este processo pretende apenas dar uma ideia da sequência do ciclo de vida das molas, não sendo contabilizados quaisquer dados de inventário de ciclo de vida a ele relacionados.

## **6 – Uso das molas de lâmina**

Depois das molas de lâmina terem sido montadas nos camiões pelos clientes, elas estão prontas para serem usadas para a função a que se destinam. Segue-se então uma etapa do inventário do ciclo de vida que se designou por “Uso das molas de lâmina”, onde se tem dois processos: um processo de transporte “GLO: Truck-trailer” com as mesmas características dos camiões que transportam as barras de aço para a FAZ e as molas da FAZ para os clientes e que se considerou, de acordo com a informação da FAZ, que percorrem 40000 km anualmente; e outro designado por “*Use phase, carbon steel product*” (Fase de uso, produto aço-carbono), que pretende traduzir a quantidade de aço que se perde durante a sua utilização e, complementarmente, a quantidade de aço que poderá ser reciclada.

Relativamente ao processo “*Use phase, carbon steel product*”, os dados das suas características apresentam-se na tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Características do processo *Use Phase – carbon steel product* do *software* GaBi

<b>Código geográfico</b>	<b>Nome do processo</b>	<b>Tipo de processo</b>	<b>Base de dados</b>
GLO	Use Phase (carbon steel product)	u-so	PE

Este processo é um processo auxiliar que se caracteriza pela corrente de entrada de molas de lâmina do grupo de objetos *Metal parts* (peças metálicas) e pela corrente de saída *Steel scrap - St* (Sucata de aço – padrão) do grupo de objetos *Waste for recovery* (resíduos para recuperação). Associadas a estas correntes estão os parâmetros *Losses* (perdas) e *PostConsScrap* (sucata após utilização). O parâmetro *Losses* são as perdas de material após o uso, enquanto o parâmetro *PostConsScrap* é a taxa Interna de sucata em percentagem. Ambos os parâmetros são expressos através de valores entre 0 e 1.

Segundo a World Steel Association o aço é o material mais reciclado do mundo porque tem propriedades magnéticas únicas que tornam a sua separação de outros resíduos bastante fácil para que possa ser reciclado. Devido a isto e de acordo com as instruções dadas pela FAZ consideraram-se apenas 5% de perdas na fase de uso das molas de lâmina, isto é, considerou-se que cerca de 95% do aço utilizado nas molas, mais cedo ou mais tarde, acabaria por ser matéria-prima de um outro qualquer processo, muito possivelmente na produção de novo aço pois todos os seus processos de produção, em maior ou menor quantidade, utilizam sucata como matéria-prima.

## **7 – Transporte da sucata de aço até ao seu destino final**

A seguir à etapa “Uso das molas de lâmina” considerou-se um processo de transporte da sucata de aço até ao seu destino final. Mais uma vez, o camião articulado tem as mesmas características que os referidos anteriormente.

No inventário de ciclo de vida de uma mola de lâmina produz-se aproximadamente de 29 kg de sucata de aço, sendo que cerca de 3,1 kg são provenientes do processo de produção das molas de lâmina e 25,9 kg resultam do seu processo de fim de utilização nos camiões nos quais estão integradas.

Como não há hipótese de ter conhecimento real da distância percorrida pela sucata de aço até ao seu destino final (que se optou pela reciclagem) fez-se uma estimativa dessa

distância considerando que a sucata proveniente do processo de produção de molas de lâmina (11%) percorre 817 km (distância da FAZ à fábrica de produção de barras de aço em Espanha) e que a sucata resultante do processo de inutilização das molas após uso (89%) percorre cerca de 3000 km, que é a um valor próximo da distância da FAZ aos clientes. Na tabela apresenta-se a distância média ponderada relativa ao transporte da sucata de aço até ao destino final que são 2760 km.

Tabela 4.26 – Distância média ponderada relativa ao transporte da sucata de aço até ao seu destino final

Proveniência sucata	Distância média (km)	Percentagem de sucata
Processo produção molas de lâmina	817	11%
Processo de inutilização após uso	3000	89%
<b>Média ponderada da distância (km)</b>	<b>2760</b>	

## 8 - Fim de vida das molas de lâmina

Para finalizar o inventário de ciclo de vida das molas de lâmina, considerou-se uma etapa que se designou por “Fim de vida das molas”. Neste caso, em vez de se acrescentar um processo, optou-se por adicionar ao modelo de ciclo de vida um plano separado que traduzisse o “fechar” desse ciclo. Ao se tomar esta opção não se sobrecarrega visualmente o fluxograma do ciclo de vida das molas, tornando-o assim mais perceptível, além de que permitirá no futuro acrescentar outras opções de fim de vida que não as consideradas neste estudo (por exemplo, diferentes etapas de tratamento dos resíduos).

Nesse plano, que se designou como “Fim de vida das molas de lâmina”, optou-se por considerar um processo auxiliar designado *Credit for recycling of steel scrap* (Crédito para reciclagem da sucata de aço), cujas características se encontram na seguinte tabela:

Tabela 4.27 – Características do processo auxiliar *Credit for recycling of steel scrap* do software GaBi

Código geográfico	Nome do processo	Tipo de processo	Base de dados
GLO	Credit for recycling of steel scrap	u-so	PE

Este processo não tem nenhuma corrente de saída e tem duas correntes de entrada, ambas do grupo de objetos *Waste for recovery* (resíduos para reciclar): a corrente *Steel scrap* (*St*) proveniente do processo anterior *Use phase*, que tem como valor de quantidade 1, e a

corrente *Steel scrap - external supply* (sucata de aço – alimentação externa), que tem -1 como valor da quantidade. Como esta corrente é rastreada torna-se necessário um processo que lhe dê origem, designado por *Value of scrap* (valor da sucata) que se apresenta na tabela seguinte:

Tabela 4.28 – Características do processo *Value of scrap* do software GaBi

<b>Código geográfico</b>	<b>Nome do processo</b>	<b>Tipo de processo</b>	<b>Base de dados</b>	<b>Observações</b>
GLO	Value of scrap	agg	worldsteel	technology mix (blast furnace route / electric arc furnace route) production mix, at plant

Este plano “Fim de vida das molas” pressupõe que seja dado um crédito para a quantidade de sucata de aço que irá ser reciclada no fim da vida útil do produto e um débito (um peso) que tem de ser aplicado a qualquer sucata que é usada no processo de fabrico do aço, pois só assim é possível completar o ciclo. (World Steel Report, 2011).

## Outros valores relativos ao inventário calculados diretamente pelo *software*

### ➤ Para as condições operatórias atuais

Na figura 4.10 encontram-se representados o balanço entre entradas e saídas do ciclo dos fluxos elementares do ciclo de vida das molas de lâmina para carrocerias de caminhões.

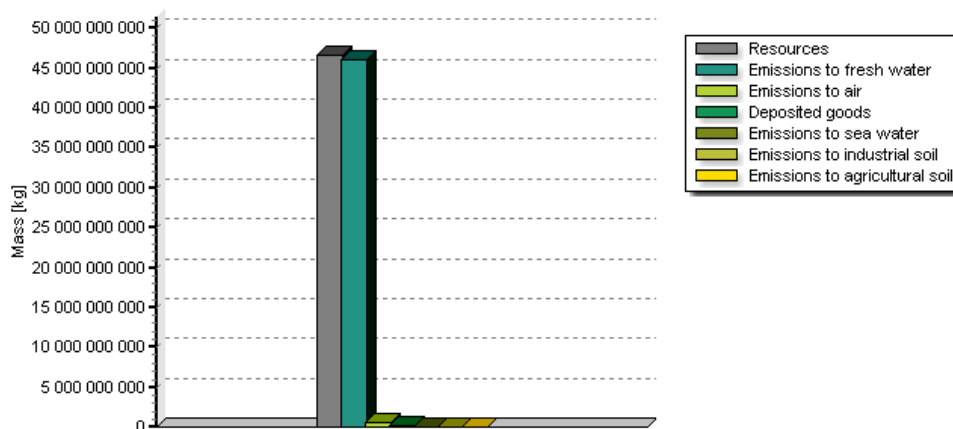


Figura 4.10 – Representação esquemática das entradas e saídas de fluxos elementares para as condições operatórias atuais

Como se pode observar, os fluxos elementares que mais peso têm no ciclo de vida para as molas de lâmina são os “Recursos” (43,5 milhões de toneladas) e as “Emissões para a água doce” (42,9 milhões de toneladas).

Nas 4.11 e 4.12 podem ser observadas as entradas e as saídas de fluxos elementares, verificando que o fluxo de “Recursos” tem um maior peso nas correntes de entrada, como seria de esperar, e o fluxo de “Emissões para a água doce” tem maior relevância nas correntes de saída.

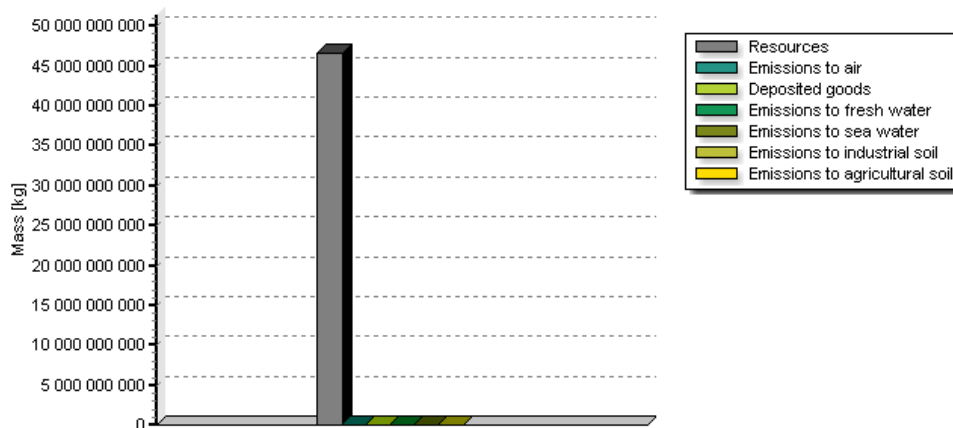


Figura 4.11 – Representação esquemática das entradas de fluxos elementares para as condições operatórias atuais

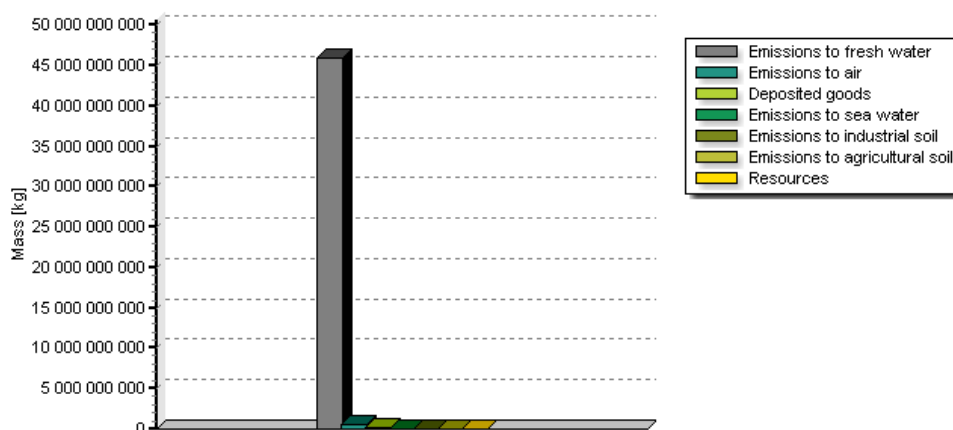


Figura 4.12 – Representação esquemática das saídas de fluxos elementares para as condições operatórias atuais

De modo a se ter uma melhor perspetiva dos outros fluxos elementares além dos maioritários referidos acima (“Recursos” e “Emissões para a água doce”), consideram-se as entradas e saídas de fluxos elementares no ciclo de vida, agora sem as correntes de “Recursos” e “Emissões para a água doce”, respetivamente. Os resultados apresentam-se abaixo.

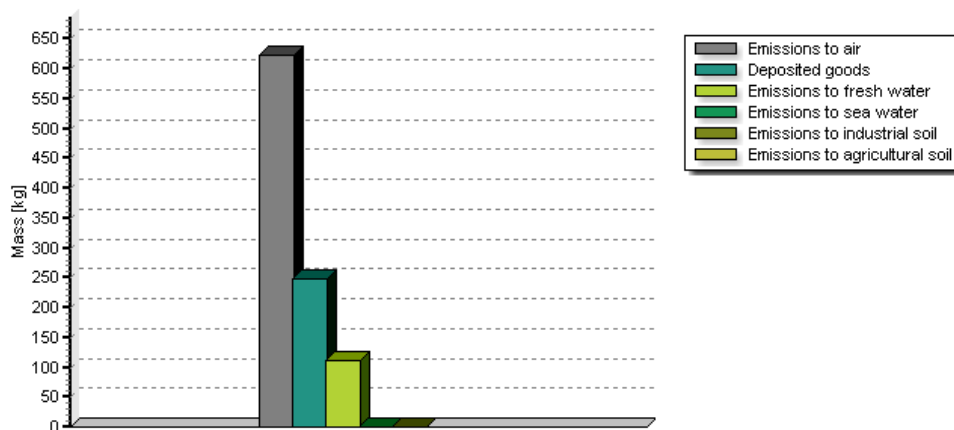


Figura 4.13 – Representação esquemática das entradas de fluxos elementares para as condições operatórias atuais sem se considerar o fluxo Recursos

Verifica-se que a seguir ao fluxo “Recursos” é o fluxo “Emissões para o ar” (556 kg) que mais contribui para as entradas no ciclo, seguido dos “Resíduos depositados” (223 kg) e das “Emissões para a água doce” (101 kg).

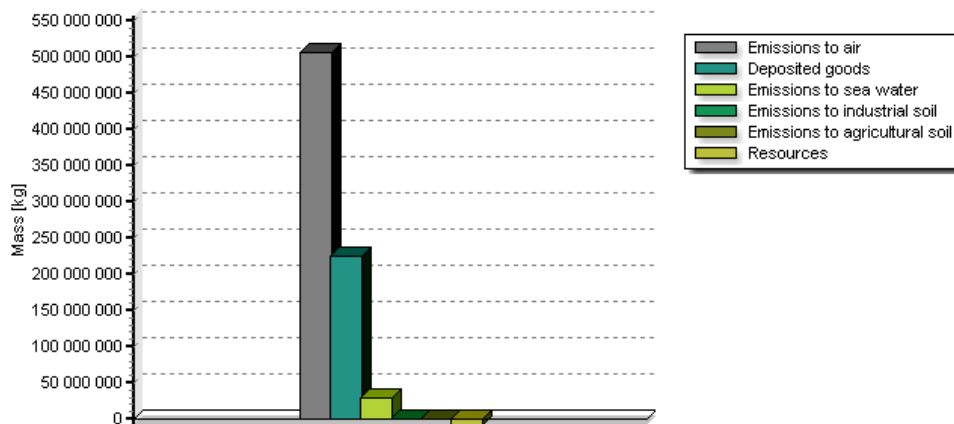


Figura 4.14 – Representação esquemática das saídas de fluxos elementares para as condições operatórias atuais sem se considerar o fluxo “Emissões para a água doce”

Quanto às saídas do ciclo, observa-se, através da figura acima, que as “Emissões para o ar” (470 142 t), os “Resíduos depositados” (205 125 t) e as “Emissões para a água doce” (25 738 t) são os fluxos que mais contribuem para as saídas do ciclo. Relativamente ao

fluxo “Recursos” verifica-se que ele apresenta um valor negativo para as saídas do ciclo, o que se deve ao aproveitamento do aço no processo “Fim de vida das molas de lâmina”.

Como os fluxos de “Recursos” e “Emissões para a água doce” são os que mais contribuem para o balanço global, estudaram-se esses fluxos em pormenor, como se apresenta de seguida.

Quanto ao fluxo “Recursos”, como ele é mais significativo nas correntes de entradas do ciclo, optou-se por estudar essas correntes.

O fluxo “Recursos” subdivide-se em três outros fluxos: “Recursos materiais”, “Recursos energéticos” e “Utilização do solo”, que se encontram representados na figura.

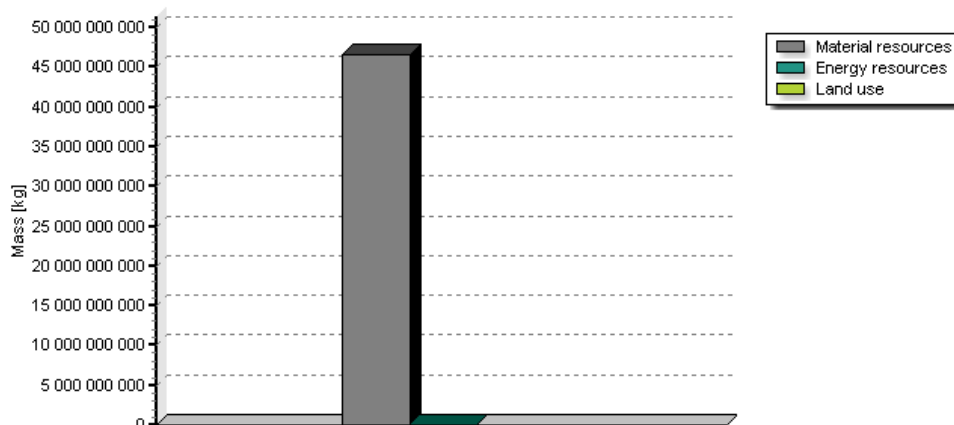


Figura 4.15 – Representação esquemática das entradas de fluxos de “Recursos” (materiais, energéticos e uso do solo) para as condições operatórias atuais

Da análise da representação esquemática acima observa-se que o fluxo de “Materiais” é o que tem a maior contribuição, sendo que o fluxo de “Recursos energéticos” apenas contribui com cerca de 21 178 toneladas e o fluxo “Uso do solo” não contribui para as entradas do ciclo de vida nas condições fronteiriças e operatórias selecionadas na avaliação realizada.

Se se observar quais dos “Recursos materiais” tem maiores valores de entrada no ciclo, conclui-se que a maior fatia pertence aos “Recursos renováveis”, como se comprova de seguida.

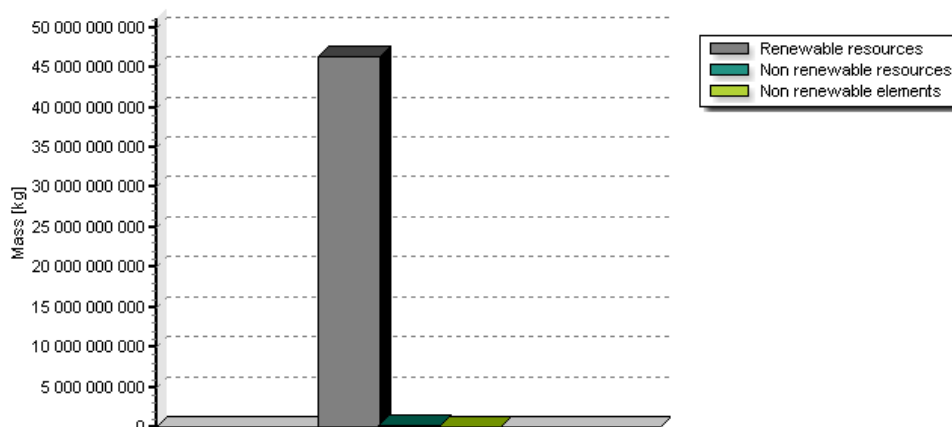


Figura 4.16 – Representação esquemática das entradas de fluxos de “Recursos materiais” (recursos renováveis, recursos não renováveis e elementos não renováveis) para as condições operatórias atuais

Os “Recursos materiais renováveis” que maior peso têm nas entradas do ciclo é a “Água”, seguida do “Ar” e do “Dióxido de carbono” cujos valores, em massa, se encontram representados na tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Fluxos de entrada de “Recursos materiais renováveis para as condições operatórias atuais

Recursos materiais renováveis	Massa [t]
Água	46334374
Ar	147967
Dióxido de carbono	2293

Relativamente aos “Recursos energéticos”, que se dividem em “Renováveis” e “Não renováveis”, são estes últimos que contribuem significativamente para as entradas no ciclo, com cerca de 21 178 toneladas:

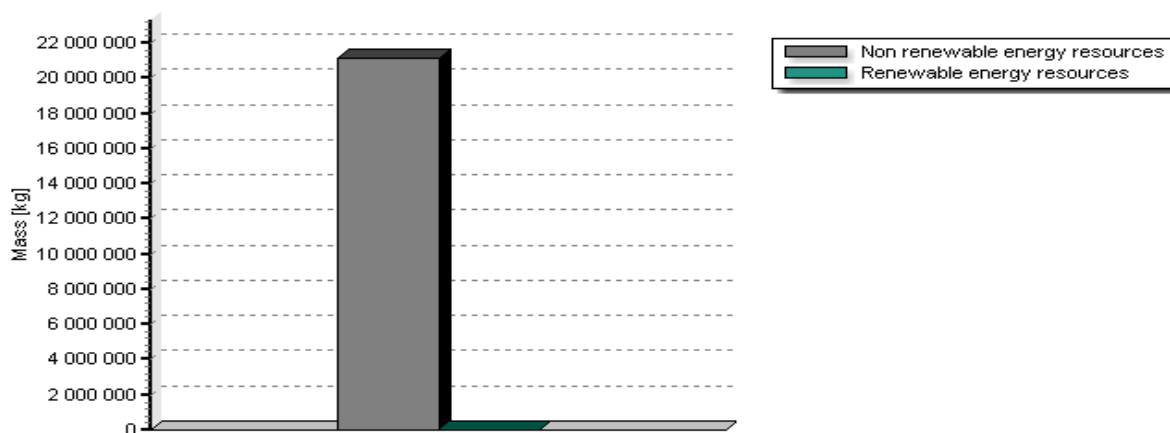


Figura 4.17 – Representação esquemática das entradas de fluxos de “Recursos energéticos” (renováveis e não renováveis) para as condições operatórias atuais

Na figura 4.18 apresentam-se as entradas dos fluxos “Recursos energéticos não renováveis”, verificando-se que, por ordem decrescente, os que mais relevância têm são: hulha ( $\approx 66\%$ ), gás natural ( $\approx 19\%$ ), petróleo bruto ( $\approx 9\%$ ), lenhite ( $\approx 6\%$ ), carvão de turfa ( $\approx 0,0031\%$ ) e urânio ( $\approx 0,0004\%$ ).

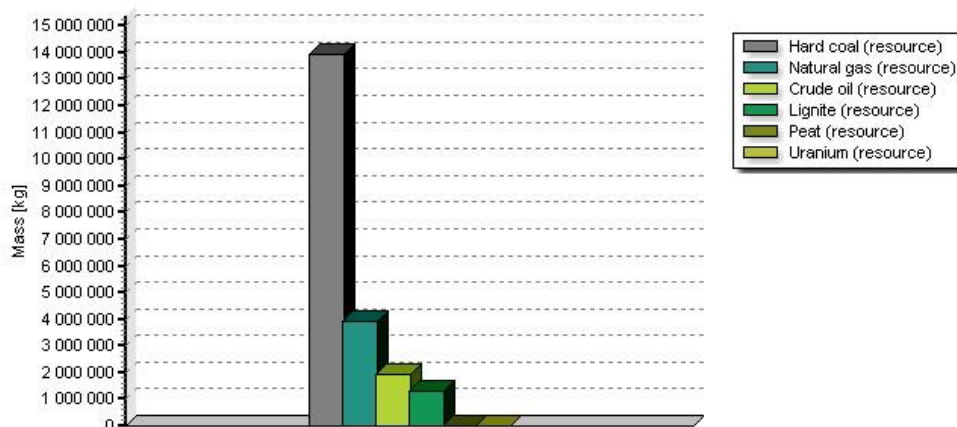


Figura 4.18 – Representação esquemática das entradas de fluxos de “Recursos energéticos renováveis” para as condições operatórias atuais

No que diz respeito aos fluxos de saída do ciclo, como as “Emissões para a água doce” são as que mais contribuem para o processo global, estudou-se este fluxo, que é constituído por sete tipos de fluxo: “Outras emissões para a água doce” (que apresenta a maior

contribuição com cerca de 46 milhões de toneladas, como se pode observar na figura abaixo), “Emissões inorgânicas para a água doce”, “Partículas para a água doce”, “Medidas analíticas para a água doce”, “Metais pesados para a água doce”, “Emissões orgânicas para a água doce” e “Emissões radioativas para a água doce”.

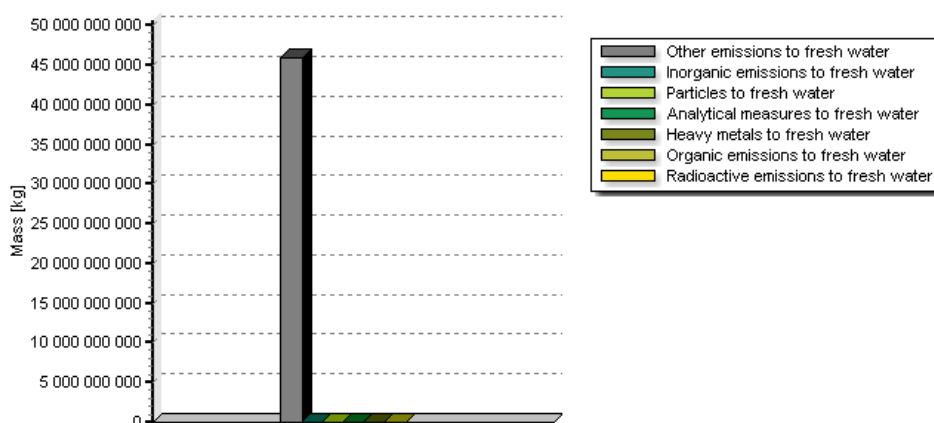


Figura 4.19 – Representação esquemática das saídas dos fluxos de “Emissões para a água doce” para as condições operatórias atuais

De modo a se perceber qual a relação entre os fluxos de “Emissões para a água doce”, retirou-se o maior fluxo, ou seja, “Outras emissões para a água doce”, e, através da figura abaixo, verificou-se que o segundo maior fluxo são as “Emissões inorgânicas” e o terceiro maior as “Partículas para a água fresca”. No que diz respeito ao fluxo de “Emissões radioativas” convém salientar que não foi detetado.

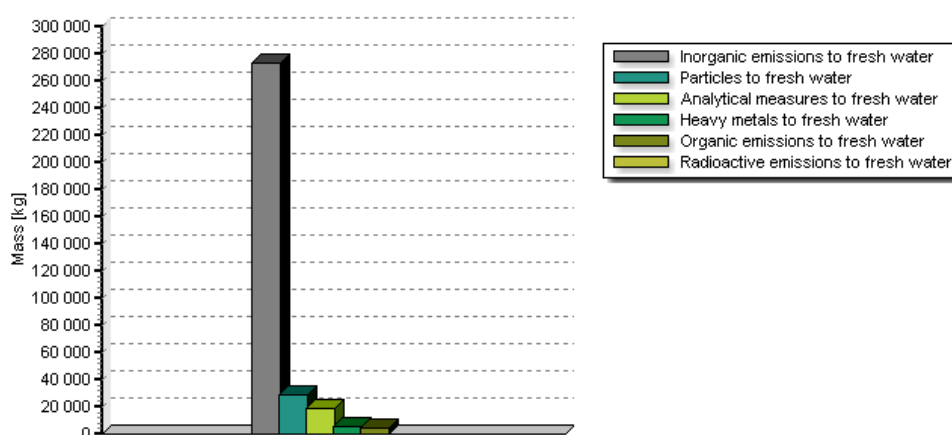


Figura 4.20 – Representação esquemática das saídas de fluxos elementares para as condições operatórias atuais sem se considerar o fluxo “Emissões para a água doce”

O fluxo “Outras emissões para a água doce” comporta uma série de fluxos que se encontram representados na figura.

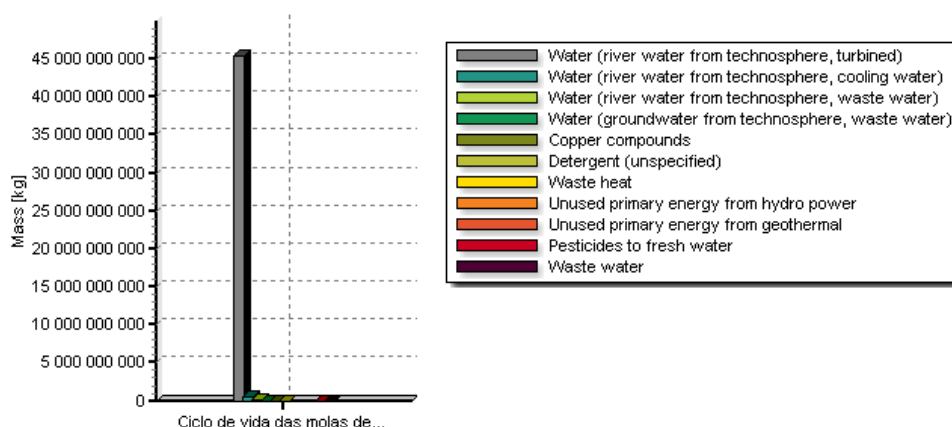


Figura 4.21 – Representação esquemática das saídas de diferentes fluxos que constituem o fluxo “Emissões para a água doce” para as condições operatórias atuais

Verifica-se que o maior fluxo de saída de “Outras emissões para água doce” é o fluxo designado por “Água” (água do rio a partir da tecnosfera, turbinada).

#### 4.4.3 Fase de avaliação de impacte

Após a identificação, caracterização e quantificação dos processos que melhor representam os passos incluídos no ciclo de vida das molas de lâmina e, depois da construção do respetivo fluxograma, foram realizados três estudos comparativos onde, através da variação dos valores de determinados parâmetros livres, foi possível uma melhor compreensão dos impactes que essas mudanças têm sobre os resultados de desempenho ambiental comparativamente com os resultados obtidos com as condições operatórias atuais. De referir que, todas as situações estudadas foram consideradas 600 000 molas de lâmina que foi aproximadamente a produção anual do ano de 2014. Descrevem-se de seguida esses estudos.

➤ **Estudo comparativo 1: “molas atuais” versus “molas 10% mais leves”**

Neste estudo fez-se uma comparação entre as “molas atuais” correspondentes ao *benchmark* e as “molas 10% mais leves”. Para tal, alterou-se o valor do parâmetro “peso de uma mola”, onde se considerou que o peso de uma mola tem menos 10% do seu valor, ou seja, as molas que pesavam 27,3 kg passaram a pesar 24,6 kg.

➤ **Estudo comparativo 2: variação da distância que as molas percorrem desde a FAZ até aos seus principais clientes**

Para este estudo considerou-se a média ponderada da distância da FAZ aos principais clientes, ou sejam, 2521 km, bem como metade (1260 km) e o dobro desse valor (5041 km). Foi assim possível perceber de que forma é que a distância que as molas têm que percorrer desde que são produzidas na FAZ (processo “Produção de molas de lâmina”) e os principais clientes afeta as categorias de impacte consideradas nesta ACV.

➤ **Estudo comparativo 3: variação da % de perdas de material durante a fase de uso das molas**

Neste caso, o estudo efetuado relata o modo como a reciclagem do aço utilizada na produção de molas de lâmina é importante na quantificação de impactes produzidos no ciclo de vida. Para a concretização deste estudo consideram-se várias percentagens de perdas ocorridas na fase de uso para além da relativa ao inventário de ciclo de vida que foi de 5% (dado da FAZ). Assim, estudaram-se os seguintes valores de perdas na fase de uso das molas: 0%, 10%, 25%, 50% e 95%. A opção de estudar 100% de perdas na fase de uso ainda foi considerada, mas surgiram alguns problemas de conflito do *software* pelo que não foi possível utilizar este valor.

Segundo as recomendações ILCD/PEF (*International Reference Life Cycle Data System - Sistema Internacional de Dados de Referência de Ciclo de Vida / Product Environmental Footprint – Pegada Ecológica de Produto*), disponíveis na ferramenta informática GaBi, podem ser calculadas as seguintes categorias de impactes:

- Acidificação, excedência acumulada [eq-mol H<sup>+</sup>];
- Ecotoxicidade para água doce aquática, USEtox (recomendado) [CTUe];
- Eutrofização da água doce, modelo EUTREND, ReCiPe [eq-kg P];
- Toxicidade humana efeitos cancerígenos, USEtox (recomendado) [CTUh];
- Toxicidade humana efeitos não cancerígenos, USEtox (recomendado) [CTUh];
- Radiação ionizante, modelo de efeitos na saúde humana, ReCiPe [eq-kg U235];
- Aquecimento global IPCC, excluindo o carbono biogénico [eq-kg CO<sub>2</sub>];
- Aquecimento global IPCC, incluindo o carbono biogénico [eq-kg CO<sub>2</sub>];
- Eutrofização marinha, modelo EUTREND, ReCiPe [eq-kg N];
- Diminuição da camada de ozono, modelo WMO, ReCiPe [eq-kg CFC-11];
- Matéria particulada / inorgânicos respiráveis, RiskPoll [eq-kg PM<sub>2,5</sub>];
- Formação de ozono fotoquímico, o modelo LOTOS-EUROS, ReCiPe [kg NMVOC];
- Depleção de recursos, fósseis e minerais, baseado em reservas, CML2002 [eq-kg Sb];
- Eutrofização terrestre, excedência acumulada [eq-mol N];
- Consumo total de água doce, incluindo a água da chuva, Swiss Ecoscarcity [kg].

No entanto, a FAZ apenas está interessada apenas em cinco categorias de impacto, que são:

- Toxicidade humana efeitos cancerígenos;
- Aquecimento global IPCC, incluindo o carbono biogénico;
- Diminuição da camada de ozono, modelo WMO;
- Matéria particulada / inorgânicos respiráveis;
- Depleção de recursos, fósseis e minerais, baseado em reservas.

Nas figuras seguintes podem-se observar as contribuições que cada um dos processos do ciclo de vida para cada um das cinco categorias de impacto acima referidas. De referir que as letras A, B, C e D, e os algarismos 1 e 2 se referem a:

A – Transporte (e respetivo gásóleo) das barras de aço da fábrica até à FAZ;

B - Transporte (e respetivo gásóleo) das molas da FAZ até aos clientes;

C – Transporte (e respetivo gásóleo) durante a fase de uso das molas;

D – Transporte (e respetivo gásóleo) da sucata de aço da FAZ até ao seu destino final;

1 – Eletricidade utilizada diretamente no processo “Produção molas lamina”;

2 – Eletricidade utilizada no processo “Automotive painting”

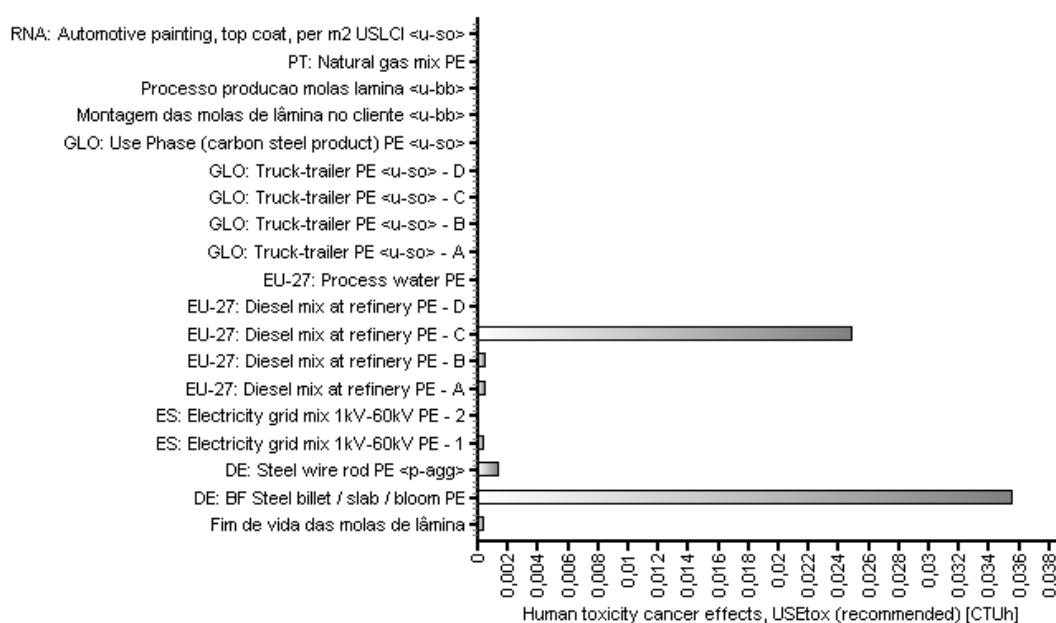


Figura 4.22 - Representação esquemática da contribuição dos vários processos do ciclo de vida para a categoria de impacto “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos”, em CTUh

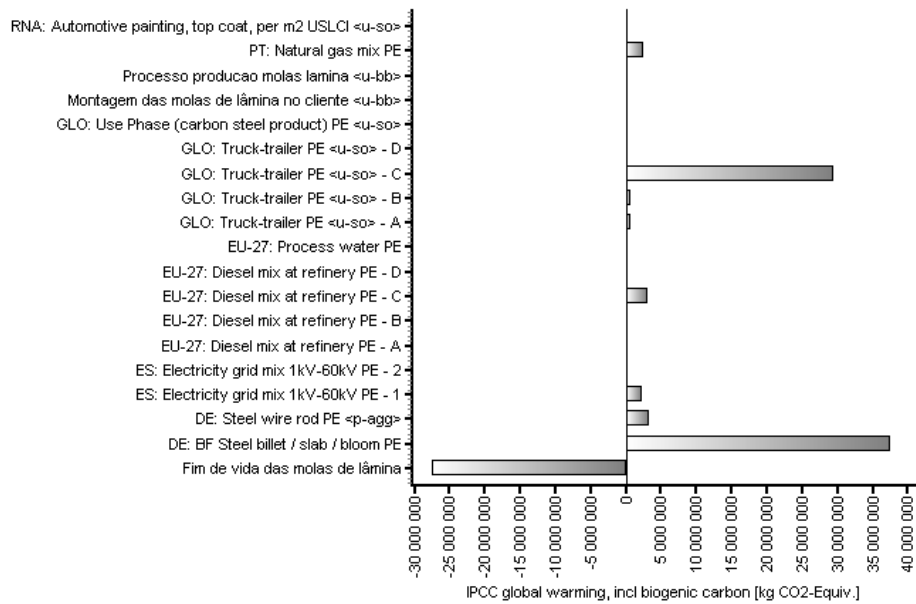


Figura 4.23 - Representação esquemática da contribuição dos vários processos do ciclo de vida para a categoria de impacte “Aquecimento global, incluindo o carbono biogénico”, em eq-kg CO<sub>2</sub>

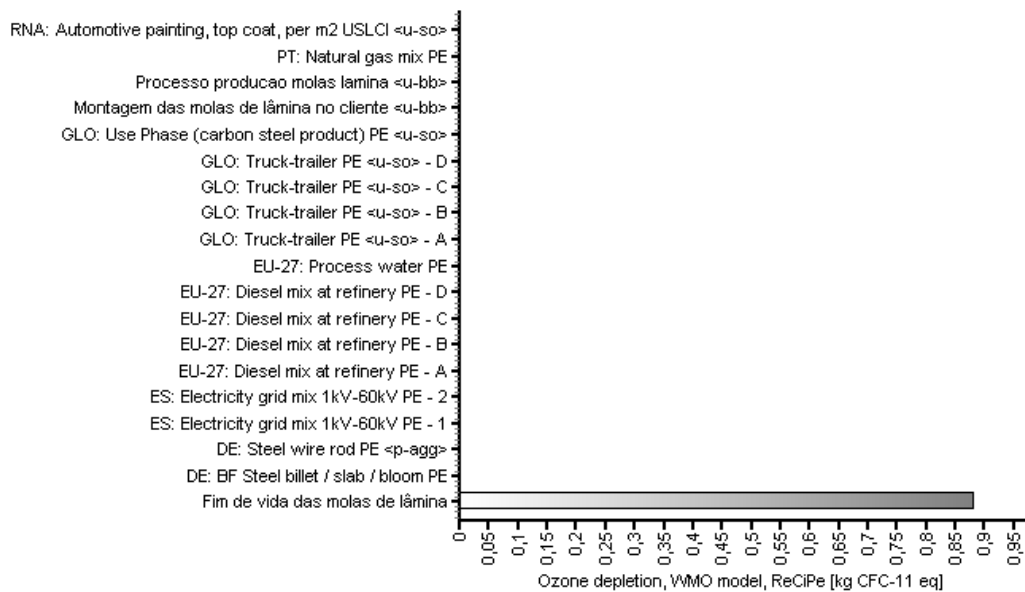


Figura 4.24 - Representação esquemática da contribuição dos vários processos do ciclo de vida para a categoria de impacte “Diminuição da camada de ozono”, em eq-kg de CFC-11

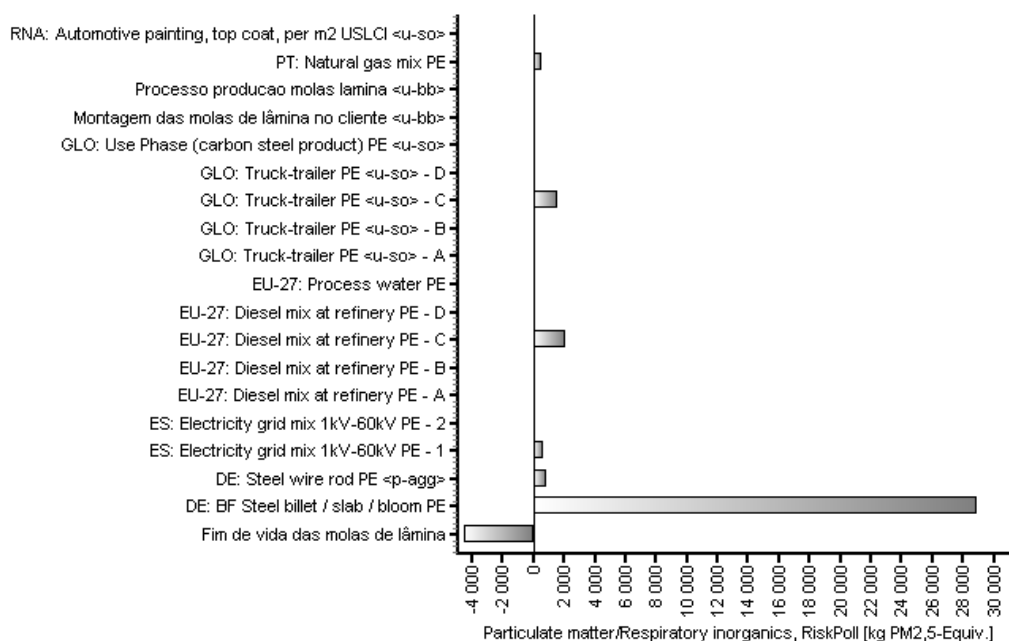


Figura 4.25 - Representação esquemática da contribuição dos vários processos do ciclo de vida para a categoria de impacte “Matéria particulada/Inorgânicos respiráveis”, em eq-kg de PM2,5

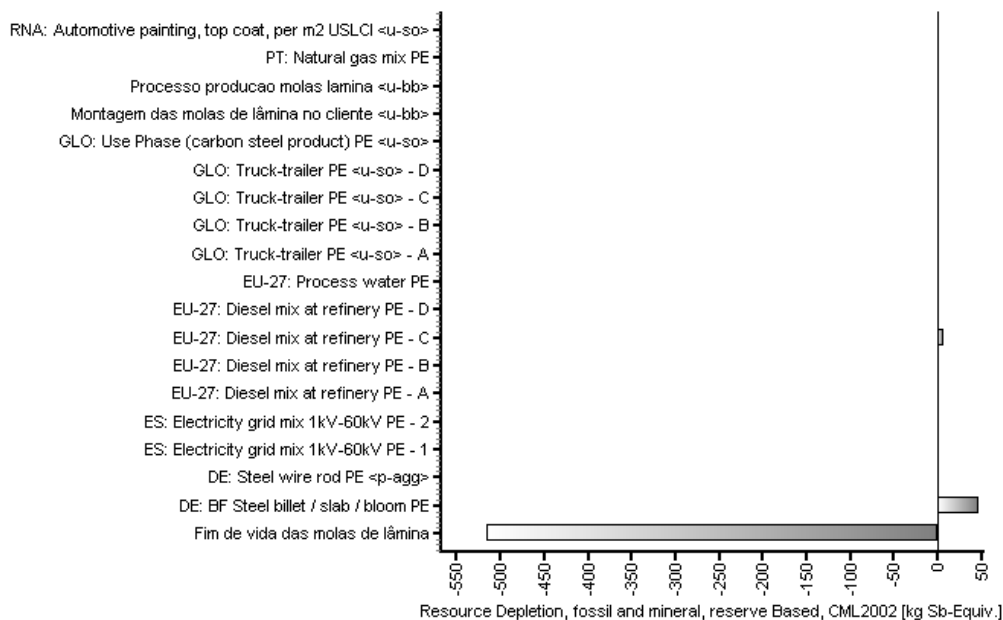


Figura 4.26 - Representação esquemática da contribuição dos vários processos do ciclo de vida para a categoria de impacte “Depleção de recursos”, em eq-kg de Sb

Da análise das figuras, observa-se que os processos que mais contribuem para cada uma das categorias são:

- ✓ Toxicidade humana: “Steel billet” e “Diesel mix at refinery C”;
- ✓ Aquecimento global: “Steel billet” e “Truck-trailer C”, o “Fim de vida das molas de lâmina” contribui de forma positiva para esta categoria, devido a se ter considerado 95% de aço que é reciclado;
- ✓ Diminuição da camada de ozono: “Fim de vida das molas de lâmina”;
- ✓ Matéria particulada/inorgânicos respiráveis: “Steel billet”;
- ✓ Depleção de recursos: “Steel billet”, o “Fim de vida das molas de lâmina” contribui de forma positiva para esta categoria pois considerou-se que as perdas de matérias eram muito reduzidas (5%).

Os resultados obtidos para as cinco categorias de impacto analisadas, para cada um dos três estudos realizados são apresentados de seguida.

### ➤ Resultados do estudo comparativo 1

Nas figuras seguintes é possível verificar que uma diminuição de 10% no peso das molas de lâmina produzem uma diminuição dos impactos ambientais estudados.

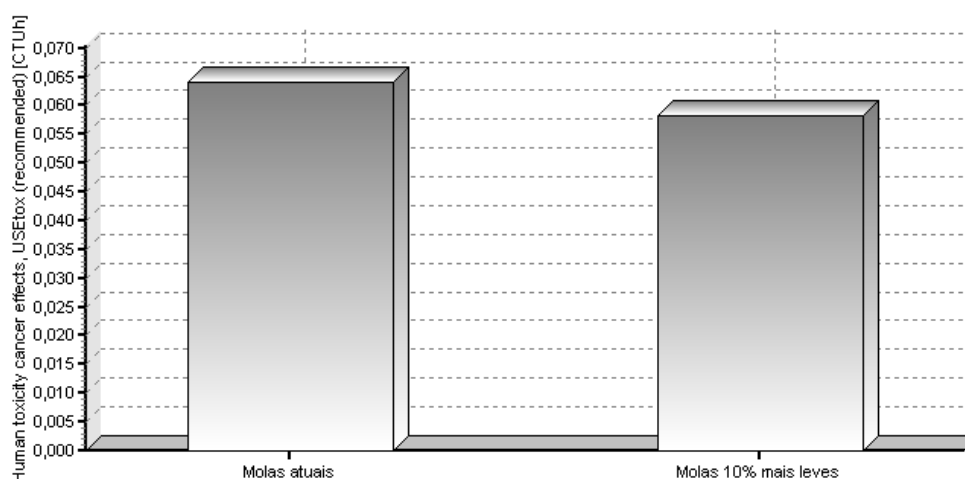


Figura 4.27 - Representação esquemática da categoria de impacto “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos”, em CTUh, para o estudo comparativo 1

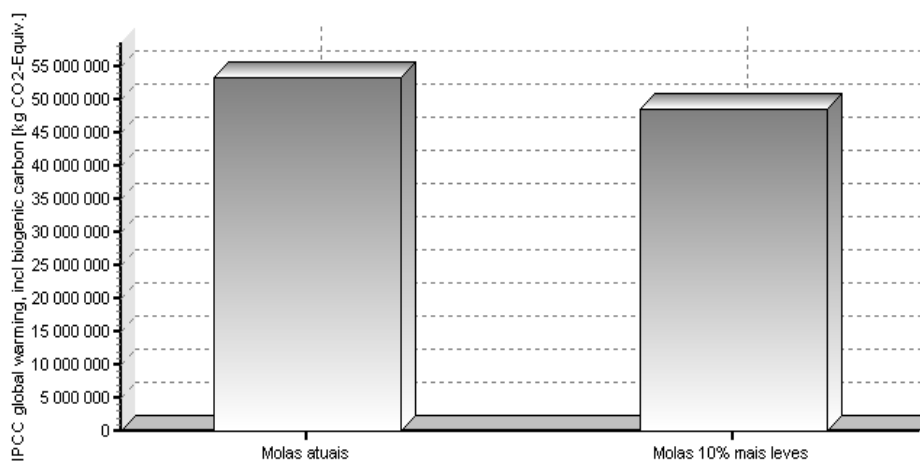


Figura 4.28 – Representação esquemática da categoria de impacte “Aquecimento global IPCC, incluindo o carbono biogénico”, em eq-kg CO<sub>2</sub>, para o estudo comparativo 1

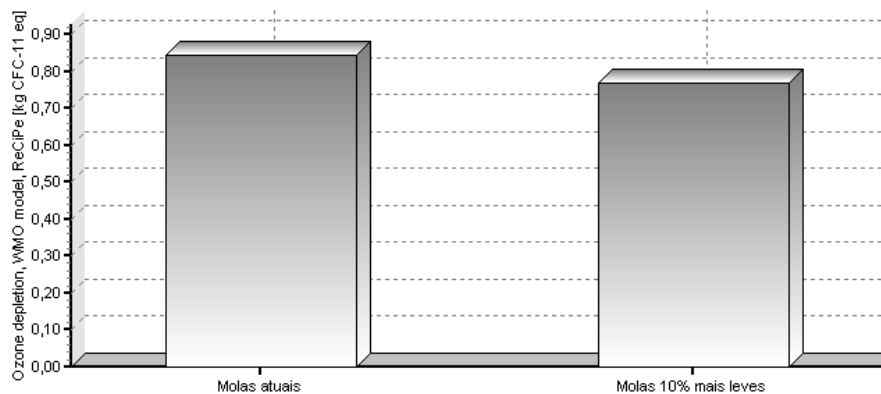


Figura 4.29 – Representação esquemática da categoria de impacte “Destruição da camada de ozono”, em eq-kg CFC-11, para o estudo comparativo 1

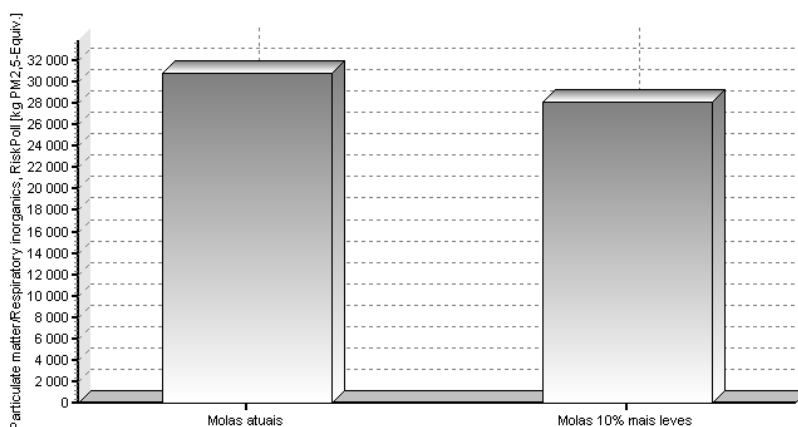


Figura 4.30 - Representação esquemática da categoria de impacte “Matéria particulada / inorgânicos respiráveis”, em eq-kg PM<sub>2,5</sub>, para o estudo comparativo 1

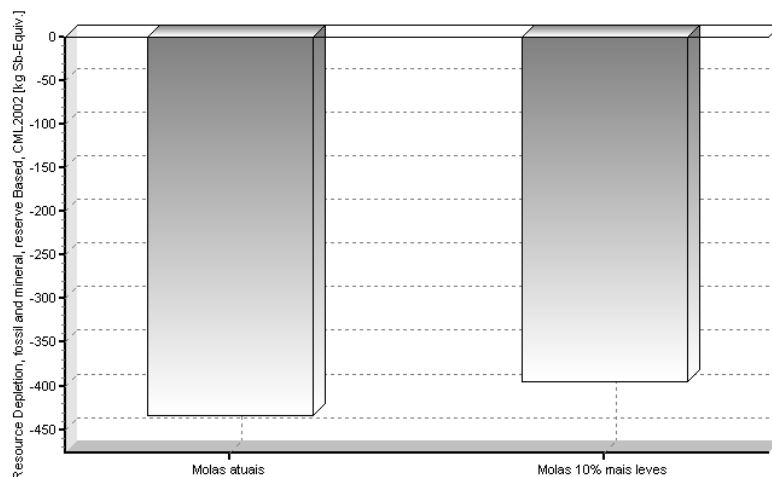


Figura 4.31 - Representação esquemática da categoria de impacto “Depleção de recursos, fósseis e minerais”, baseado em reservas, em eq-kg Sb, para o estudo comparativo 1

Relativamente aos resultados normalizados com as emissões europeias de acordo com o método “CML2001 – Apr. 2013”, pode-se observar na figura 4.32, verifica-se que as molas de lâmina com menos 10% de peso contribuem com menos impactes para o ambiente, sendo maiores as diferenças relativamente às molas atuais para os impactes mais significativos: “Depleção abiótica - elementos”, “Toxicidade humana” e “Aquecimento global”.

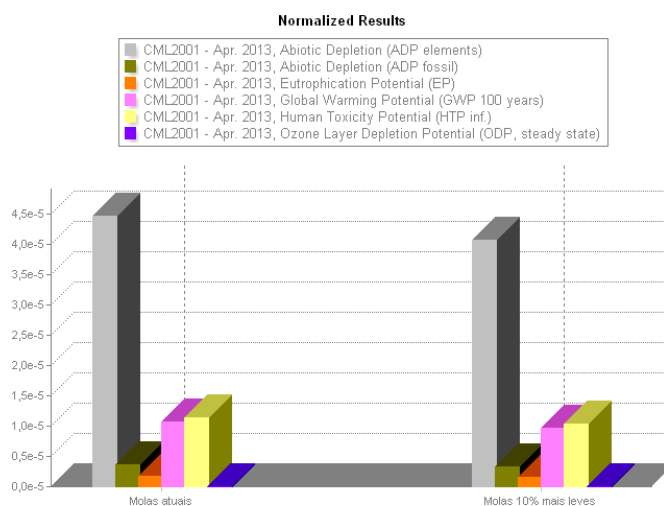


Figura 4.32 - Representação esquemática dos resultados normalizados (CML2001 – Apr. 2013, EU 25+3), para o estudo comparativo 1

## ➤ Resultados do estudo comparativo 2

A distância que as molas de lâmina percorrem desde a FAZ até aos seus principais clientes apenas influencia a “Toxicidade humana” e o “Aquecimento global, incluindo o carbono biogénico” do grupo de impactes estudados. Para esses impactes verifica-se que quanto maior a distância maior é o impacte causado.

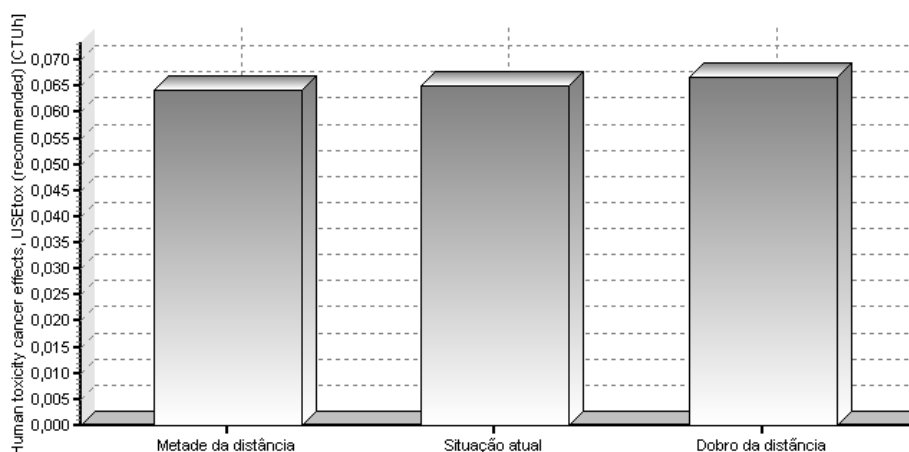


Figura 4.33 - Representação esquemática da categoria de impacte “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos”, em CTUh, para o estudo comparativo 2

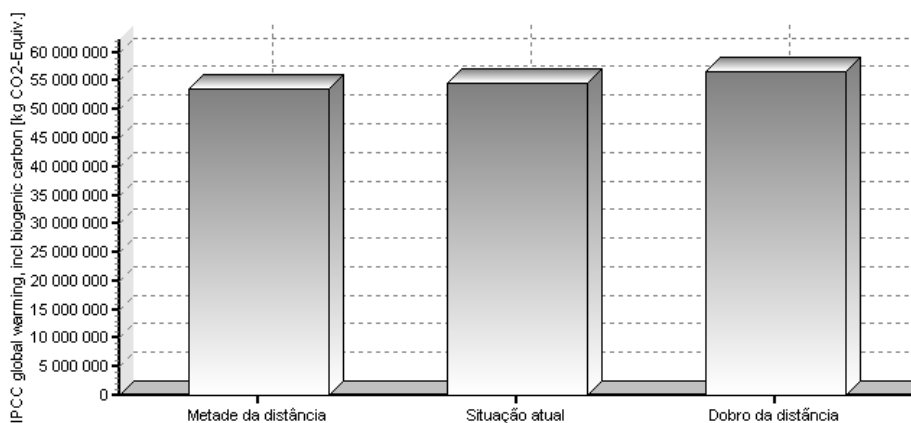


Figura 4.34 – Representação esquemática da categoria de impacte “Aquecimento global IPCC, incluindo o carbono biogénico”, em eq-kg CO<sub>2</sub>, para o estudo comparativo 2

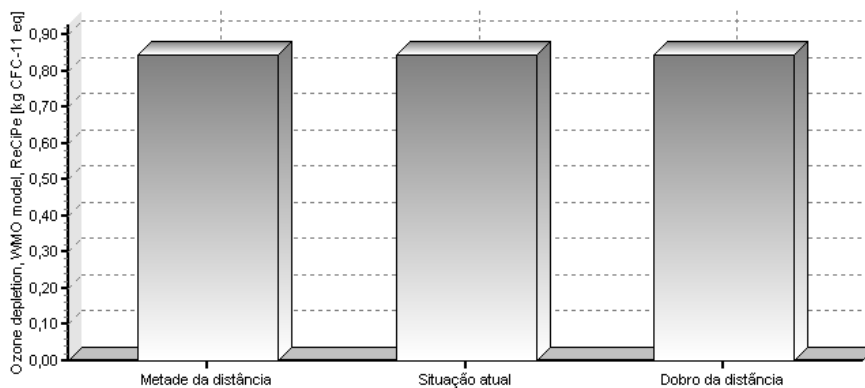


Figura 4.35 – Representação esquemática da categoria de impacto “Destruição da camada de ozono”, em eq-kg CFC-11, para o estudo comparativo 2

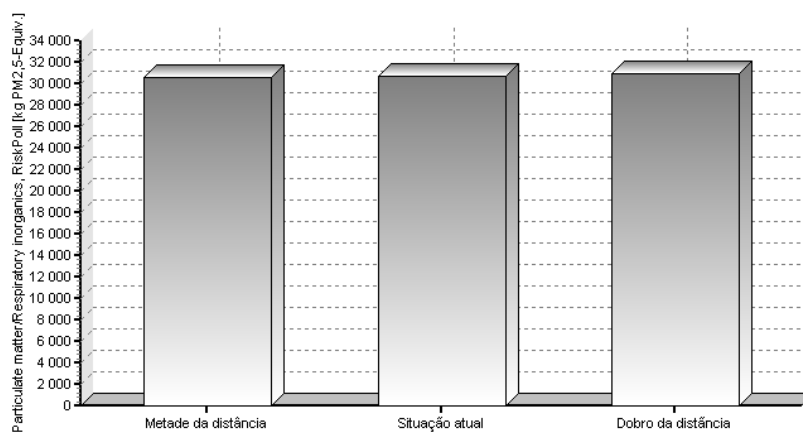


Figura 4.36 - Representação esquemática da categoria de impacto “Matéria particulada / inorgânicos respiráveis”, em eq-kg PM2,5, para o estudo comparativo 2

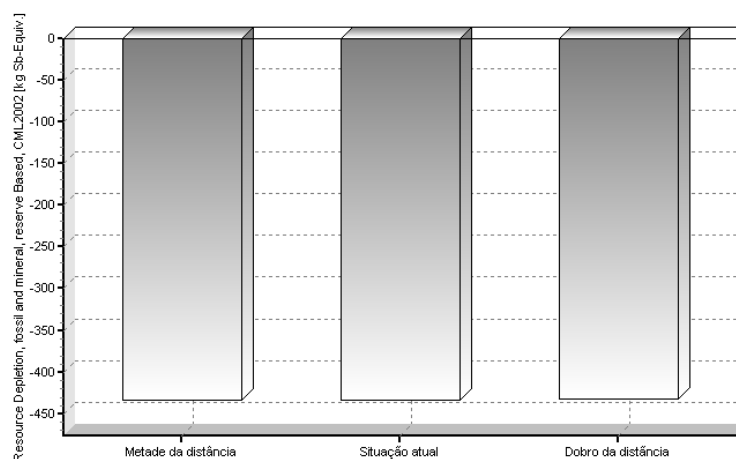


Figura 4.37 - Representação esquemática da categoria de impacto “Depleção de recursos, fósseis e minerais, baseado em reservas”, em eq-kg Sb, para o estudo comparativo 2

➤ **Resultados do estudo comparativo 3**

Relativamente ao efeito que as perdas de aço sofrem durante a fase de uso, os resultados obtidos encontram-se nas seguintes figuras:

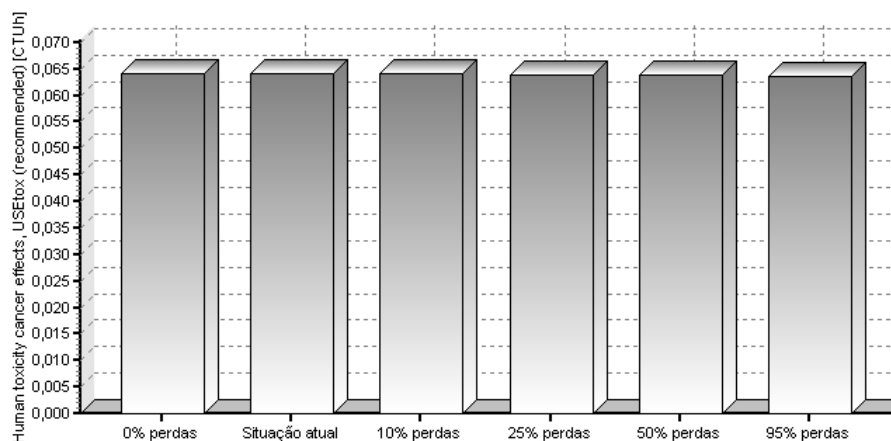


Figura 4.38 - Representação esquemática da categoria de impacto “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos”, em CTUh, para o estudo comparativo 3

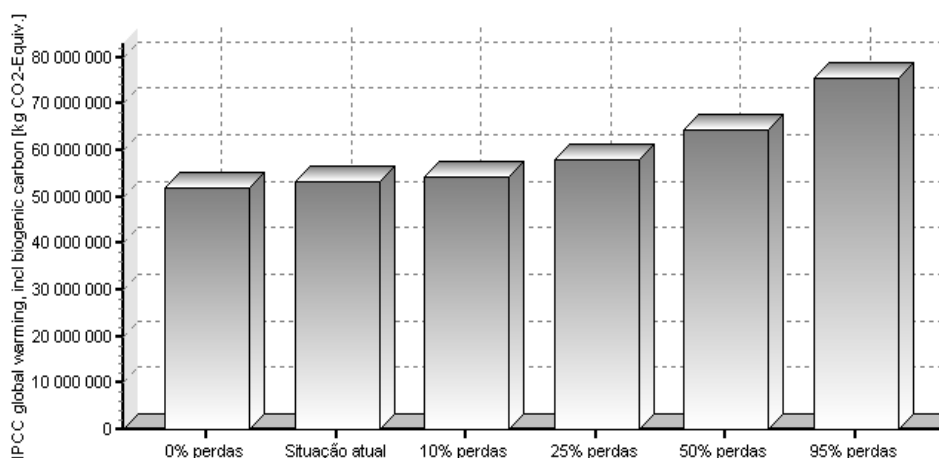


Figura 4.39 – Representação esquemática da categoria de impacto “Aquecimento global IPCC, incluindo o carbono biogénico”, em eq-kg CO<sub>2</sub>, para o estudo comparativo 2

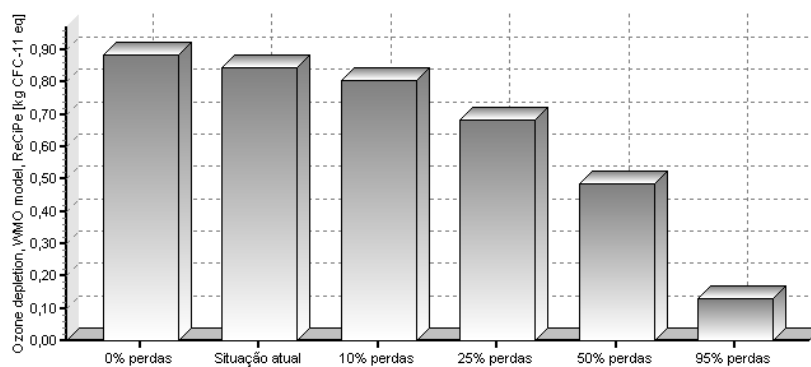


Figura 4.40 – Representação esquemática da categoria de impacte “Diminuição da camada de ozono”, em eq-kg CFC-11, para o estudo comparativo 2

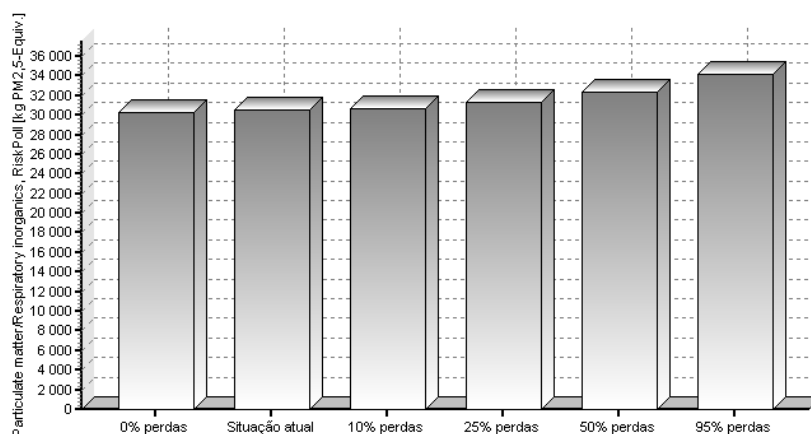


Figura 4.41 - Representação esquemática da categoria de impacte “Matéria particulada / inorgânicos respiráveis”, em eq-kg PM2,5, para o estudo comparativo 2

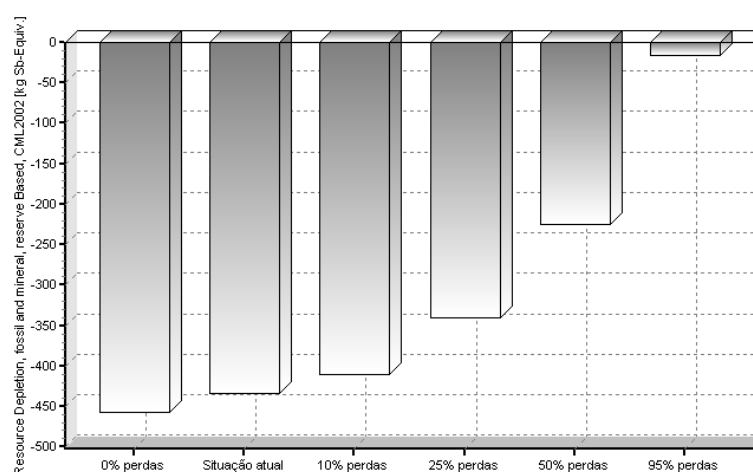


Figura 4.42 - Representação esquemática da categoria de impacte “Depleção de recursos, fósseis e minerais, baseado em reservas”, em eq-kg Sb, para o estudo comparativo 2

Verifica-se que quanto mais material se perde maiores são os impactos “Aquecimento global, incluindo o carbono biogénico”, “Matéria particulada/inorgânicos respiráveis” e “Esgotamento de recursos, fósseis e minerais, baseado em reservas”. O impacto “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos” não é influenciado pela quantidade de perdas de material. Relativamente ao impacto “Diminuição da camada de ozono” verifica-se que ele é menos significativo para perdas maiores de aço. Esta constatação pode ser explicada pelo facto de quanto maiores forem as perdas menor a sucata de aço que irá ser reciclada. Na figura 4.24, podemos verificar que o único processo considerado no ACV que contribui para este impacto é o “Fim das molas de lâmina”, o que corrobora a explicação anterior.

#### 4.4.4 Fase de interpretação

Após a realização do ICV verificou-se que os fluxos elementares com mais significância para o ciclo de vida das molas de lâmina são os “Recursos” e as “Emissões para a água doce”.

Os impactos estudados na AICV foram ao encontro das necessidades da FAZ e basearam-se nas recomendações metodológicas do ILCD. Estudaram-se as seguintes categorias de impactos: toxicidade humana, aquecimento global, diminuição da camada de ozono, matérias particulada / inorgânicos respiráveis e depleção de recursos fósseis e minerais, baseado em reservas. Observou-se que para todas estas categorias, à exceção da “diminuição da camada de ozono”, o processo que mais contribuiu para a maximização dos impactos foi o relativo à produção de lingotes de aço “*Steel billet*”. Verificou-se também que o processo de transporte “*Truck-trailer C*”, que representa a fase de uso das molas de lâmina, é um dos maiores contribuidores para o impacto “Aquecimento global” e o gásóleo consumido durante esta fase “*Diesel mix at refinery C*” contribuiu bastante para o impacto “Toxicidade humana”. Além disto, observou-se que o processo “Fim de vida das molas de lâmina” contribui positivamente para a minimização dos impactos “Aquecimento global” e “Depleção de recursos de recursos fósseis e minerais”, devido a só se terem considerado 5% de perdas na fase de uso, o que implica uma poupança de matérias-primas. No entanto, o processo “Fim de vida das molas de lâmina” é o único a contribuir para o impacto “Diminuição da camada de ozono”.

Durante a AICV realizaram-se três estudos comparativos. No primeiro estudaram-se dois cenários possíveis que traduziram as condições operatórias das molas atuais e das molas com menos 10% de peso, verificando-se que quando se diminui 10% no peso numa mola de lâmina os impactes ambientais estudados apresentaram também uma diminuição de efeitos. No segundo estudo, comparou-se a distância que as molas percorrem desde a FAZ até chegar aos seus principais clientes com a metade e o dobro do seu valor, observando-se apenas efeitos nos impactes “Toxicidade humana” e “Aquecimento global” que aumentam à medida que a distância aumenta. Por último, no terceiro estudo realizado, compararam-se diferentes perdas relativas de material ocorridas na fase de uso em comparação com os 5% de perdas atuais. Neste caso, observou-se que, para todos os impactes produzem mais efeitos à medida que as perdas de material aumentam, excetuam-se os impactes “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos”, que se mantêm inalterado, e “Diminuição da camada de ozono”, que diminui os seus efeitos com o aumento da taxa de reciclagem de sucata de aço.

Na realização do estudo de ICV existiu dificuldade em traduzir alguns dados do processo real de produção das molas de lâmina para processos existentes no *software* GaBi, por exemplo, no caso relativo à pintura das molas de lâmina ou à sua fase de uso. No entanto, estas situações foram contornadas, verificando-se que, quer a fase de ICV, quer a AICV, estão em sintonia com o objetivo e o âmbito do estudo. Relativamente ao controlo de coerência, os limites do sistema, a alocação e a avaliação de impactes são coerentes com o objetivo e o âmbito do estudo. Relativamente à qualidade de dados, foi a possível dentro das limitações de *software* e dos dados existentes para os processos a montante e jusante do processo “Produção de molas de lâmina”. Não foi realizado o controlo de sensibilidade à ACV.

Apesar das limitações encontradas, a ACV permitiu observar o desempenho ambiental de molas de lâmina 10% mais leves que era o objetivo do estudo, concluindo-se que ao melhor o design das molas de lâmina se diminuem os impactes ambientais considerados.

## 5. Conclusões finais

Pretendeu-se com este trabalho efetuar um levantamento das principais ferramentas informáticas utilizadas para a avaliação do desempenho ambiental de produtos com foco na indústria automóvel, selecionando a ferramenta que mais se adequava ao produto em causa, utilizando para tal a metodologia multicritério de apoio à decisão MACBETH. Esta metodologia apoia-se no *software* M-MACBETH e permite avaliar diferentes opções segundo uma multiplicidade de critérios, requerendo apenas juízos qualitativos sobre a diferença de atratividade entre elementos, de modo a gerar pontuações para as opções de acordo com cada critério de avaliação e também para determinar os pesos de cada critério em análise.

Para a escolha da ferramenta informática para ACV foram identificados um conjunto de oito critérios: aplicação, tipo de ferramenta, características da ferramenta, serviços de apoio disponíveis, plataforma informática, linguagens disponíveis, tópicos de desempenho abrangidos, utilização pela comunidade científica, e considerou-se um conjunto de doze opções: Athena Impact Estimator for Building, CMLCA, COMPASS, eVerDEE, GaBi, GEMIS, OpenLCA, REGIS, SavvyPack, SimaPro, Sustainable Minds e Umberto. Após a aplicação da metodologia MACBETH selecionou-se a ferramenta informática GaBi como a mais atrativa. Esta decisão foi corroborada pelas análises de sensibilidade ao peso dos critérios, de robustez das opções e de benefício-custo

Após a seleção da ferramenta GaBi procedeu-se à ACV, do “berço ao túmulo”, das molas de lâmina para carroçarias de camiões. Os objetivos desta ACV foram a identificação dos benefícios para a sociedade de molas de lâmina 10% mais leves.

O estudo de ACV realizado foi constituído pelas quatro fases, previstas nas normas NP EN ISO 14040:2008 e NP EN ISO 14044:2010, e que são: definição do objetivo e âmbito, inventário, avaliação de impactes e interpretação.

Na primeira fase foram definidos os objetivos e âmbito. O estudo baseou-se nos dados fornecidos pela empresa que o solicitou, a FAZ, e tem como objetivo observar o desempenho ambiental de molas de lâmina mais leves que resultam de um melhoramento do seu design. Definiu-se uma mola de lâmina como unidade funcional e consideram-se que as fronteiras do sistema vão desde produção do aço até à fase de fim de vida das molas

de lâmina, sem se incluir os seus tratamentos de fim de vida (consideram-se apenas créditos para reciclagem).

Na fase do inventário fez-se um levantamento de todas as entradas e saídas de materiais e emissões do sistema, verificando-se que os fluxos elementares “Recursos” e as “Emissões para a água doce” são aqueles que mais relevância têm.

Relativamente à AICV e de acordo com o pretendido pelo público-alvo consideraram-se cinco categorias de impactes ambientais: toxicidade humana, efeitos cancerígenos; aquecimento global IPCC, incluindo o carbono biogénico; destruição da camada de ozono, modelo WMO; matéria particulada / inorgânicos respiráveis; e, depleção de recursos, fósseis e minerais, baseado em reservas. Esta AICV teve como metodologia as recomendações do ILCD. Os impactes observados mostraram que o processo de produção de lingotes de aço (“*Steel billet*”) é o que mais contribuiu para esse impactes, exceto para o impacte “diminuição da camada de ozono” que se deve unicamente ao processo “Fim de vida das molas de lâmina”. O processo de transporte “*Truck-trailer C*”, que representa a fase de uso das molas de lâmina, contribuiu também bastante para o impacte “Aquecimento global”, assim como o gásóleo consumido durante esta fase “*Diesel mix at refinery C*” para o impacte “Toxicidade humana”. Outra observação interessante foi o facto do processo “Fim de vida das molas de lâmina” contribuir positivamente para os impactes “Aquecimento global” e “Depleção de recursos de recursos fósseis e minerais”, uma vez que o consumo de matérias-primas é minimizado por se considerarem apenas 5 % de perdas durante a fase de uso.

Ainda durante a fase de AICV realizaram-se três estudos comparativos: “molas atuais” *versus* “molas 10% mais leves”; distância atual que as molas percorrem desde a FAZ até chegar aos seus principais clientes em comparação com a metade e o dobro do seu valor; e, perdas relativas de aço durante a fase de uso das molas. Verificou-se que: os impactes para molas de lâmina 10% mais leves eram menores do que para as molas atuais; os impactes “Toxicidade humana” e “Aquecimento global” aumentaram com o aumento da distância aos clientes; tirando os impactes “Toxicidade humana, efeitos cancerígenos”, que se mantêm inalterado, e “Diminuição da camada de ozono”, que diminui á medida que a taxa de reciclagem de sucata de aço aumenta, todos os outros impactes estudados aumentam de forma direta às perdas de material.

Na fase de interpretação, verificaram-se a existência de algumas lacunas no *software* GaBi que dificultaram a transposição de alguns dados e processos reais para o *software*. No entanto, foi possível contornar esta questão e realizar o estudo de ACV de acordo com os objetivos e âmbito definidos.

Após a realização do estudo de ACV a molas de lâmina para a indústria automóvel, a empresa conseguiu ter um maior conhecimento dos impactes ambientais existentes e teve a possibilidade de avaliar os impactes relacionados com alterações ao design do produto. Esta ACV levou à conclusão de que existe uma diminuição dos impactes ambientais associados à produção de molas de lâmina caso estas fossem 10% mais leves, o que poderá trazer benefícios para a própria empresa e para a sociedade.

As conclusões obtidas desta ACV podem trazer bastantes mais-valias à empresa, pois poderá ajudar os responsáveis pela tomada de decisão na seleção de produtos e/ou processos que resultem num menor impacte para o ambiente que, em conjunto com outra informação (dados de custos, performance), podem permitir um melhoramento nos seus resultados financeiros. Além disto, a imagem da empresa perante os clientes e a própria sociedade sai reforçada graças ao melhoramento do design das molas de lâmina que contribuem menos para a destruição do planeta.

## 6. Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização desta tese, foram aparecendo certas dificuldades, especialmente em relação à versão do *software* utilizada, e alguma vontade de explorar alguns temas que surgiram de questões que se foram colocando ao longo do desenvolvimento do trabalho. Além disto, durante a pesquisa bibliográfica, constatou-se que a ACV de molas de lâmina não é um tema muito explorado. Surgiram, assim, algumas ideias que poderão servir de sugestão para alguns trabalhos futuros e que são:

- Realizar o mesmo tipo de estudo, mas utilizando outro tipo de *software*, por exemplo o SimaPro, fazendo uma comparação dos resultados obtidos através de ambas as ferramentas informáticas;
- Efetuar uma ACV do tipo “porta a porta” de modo a identificar qual o processo dentro da FAZ que mais impactes ambientais produz e propor medidas de melhoria para esse processo identificado;
- Fazer um estudo mais pormenorizado à fase de uso das molas de lâmina para se ter a perceção de que uma mola que dura mais tempo produz, a longo prazo, menos impactes (relacionar o tempo de uso da mola com a quantidade de combustível utilizado durante o seu tempo de vida útil);
- Efetuar uma avaliação social do ciclo de vida das molas de lâmina para analisar os potenciais efeitos sociais e socioeconómicos que as molas de lâmina utilizadas em carroçarias de camiões produzem.

## 7. Referências bibliográficas

### 7.1 Bibliografia

Acero, A. P., *et al.* (2014), LCIA methods - Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, version 1.2, GreenDelta.

Alves, C., *et al.* (2010), Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites *Journal of Cleaner Production* 18: 313–327.

Bana e Costa, C. A. and Beinat, E. (2005), Model-structuring in public decision-aiding, London School of Economics and Political Science, Working Paper, LSEOR 05.79.

Bana e Costa, C. A., and Oliveira, M. D. (2012), A multicriteria decision analysis model for faculty evaluation, *Omega* 40, 424 – 436.

Bana e Costa, C.A., Corte, J. M. and Vansnick, J. C. (2012), MACBETH, *International Journal of Information Technology & Decision Making* 11 (2): 359-387.

Bana e Costa, C. A. and Vansnick, J. C. (2000), Cardinal value measurement with MACBETH, in *Decision Making: Recent Developments and Worldwide Applications*, S.H. Zanakis, G. Doukidis and C. Zopounidis Eds., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,: 317-329.

Bana e Costa *et al.* (2005), M - MACBETH - Guia do utilizador, Versão 1.1.

Bana e Costa, C. A., *et al.* (2008), Development of reusable bid evaluation models for the Portuguese Electric Transmission Company, *Decision Analysis*, 5 (1): 22-42.

Bana e Costa *et al.* (2014), Improving risk matrices using the MACBETH approach for multicriteria value measurement, *Proceedings of Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM) Conference 2014*.

Bana e Costa *et al.* (2015) M - MACBETH - Guia do utilizador, Versão 3.0.0 (beta).

Bartolozzi, I., *et al.* (2013), Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy *Applied Energy* 101: 103–111.

Curtis, H., and Walker, J. (2001), Design council European survey of manufacturing companies' attitudes towards design for sustainability. London: Design Council.

Enderle, P., *et al.* (2012), Potential alternative for water and energy savings in the automotive industry: case study for an Austrian automotive supplier. *Journal of Cleaner Production* 34: 146-152

Energy Workshop Report (2011), Continuous Improvement, Frauenthal Group.

Fact sheet (2014), Energy use in the steel industry, World Steel Association.

Farag, M. M. (2008), Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive componentes, *Materials and Design* 29: 374–380.

Ficha de dados de segurança da tinta utilizada para pintura das molas de lâmina, 2014.

Ficha técnica da tinta utilizada para pintura das molas de lâmina, 2010.

Froelich, D., *et al.* (2007), State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design, *Minerals Engineering* 20: 902–912

GaBi Paper Clip Tutorial – Part 1, Introduction to LCA and modelling using GaBi

GaBi Paper Clip Tutorial – Part 2, Scenario modelling for eco-design

Go, T. F., *et al.* (2012), Genetically-optimised-disassembly-sequence-for-automotive-component-reuse, *Expert Systems with Applications* 39: 5409–5417.

Guinée *et al.* (2002), *Handbook on Life Cycle Assessment*, Kluwer Academic publishers.

Guinée *et al.* (2011), Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future, *Environmental Science & Technology* 45: 90–96.

Hakamada *et al.* (2007), Life cycle inventory study on magnesium alloy substitution in vehicles, *Energy* 32: 1352–1360.

Herrmann, I. T., e Moltesen, A. (2014), Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi, *Journal of Cleaner Production* xxx: 1-7.

Hitchcock, D., *et al.* (2011), *Directory of Sustainability Life Cycle Assessment Tools*, International Society of Sustainability Professionals.

ILCD (março, 2010), International Reference Life Cycle Data System Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: First edition. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

ILCD (2010), International Reference Life Cycle Data System Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: First edition March 2010. EUR 24586 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

Jawahir *et al.* (2007), Design for sustainability (DFS): new challenges in developing and implementing a curriculum for next generation design and manufacturing engineers. International Journal of Engineering Education 23–6: 1053–64.

Karande, P., and Chakraborty, S. (2013), Using MACBETH method for supplier selection in manufacturing environment, International Journal of Industrial Engineering Computations 4: 259–272.

Karande, P., and Chakraborty, S. (2014), A Facility Layout Selection Model using MACBETH Method, Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia.

Lehtinen, H., *et al.* (2011), A Review of LCA Methods and Tools and their Suitability for SMEs, Biochem Project.

Life Cycle Assessment Methodology Report (2011), World Steel Association.

Luz, Sandra M., *et al.* (2010), Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components. Resources, Conservation and Recycling 54: 1135–1144.

Mayyas, A., *et al.* (2012), Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 1845–1862.

Mathieux *et al.* (2008), ReSICLED: A new recovery conscious design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability. Journal of Cleaner Production 16: 277–298.

Mbohwa, C. e Ganyo, B. (2008), Using life cycle assessment to assess and identify improvements of the environmental impacts of the vehicle leaf spring, Proceedings of the 2008 15<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Engineering, Sydney.

Mcauley, J. (2003), Global sustainability and key needs in future automotive design. Environmental Science & Technology 37: 5414–6.

Montibeller, G., and Franco, A. (2010) Handbook of Multicriteria Analysis, Applied Optimization 103, DOI 10.1007/978-3-540-92828-7\_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Nicolau, Inês (2014), Melhoria da Eficiência Energética do Processo de Produção de Molas para a Indústria Automóvel, Relatório do Trabalho Final de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

NP EN ISO 14040 (2008), Gestão ambiental. Avaliação do ciclo de vida. Princípios e enquadramento (ISO 14040:2006), IPQ.

NP EN ISO 14044 (2010), Gestão ambiental. Avaliação do ciclo de vida. Requisitos e linhas de orientação (ISO 14044:2006), IPQ.

Papadopoulos, A.M., and Konidari, P. (2011), Overview and selection of multi-criteria evaluation methods for mitigation/adaptation policy instruments, PROMITHEAS-4: Knowledge transfer and research needs for preparing mitigation/adaptation policy portfolios, European Union.

Presentation Impormol (maio, 2012), Automotive Components.

Rosa, G. e Loureiro, J. (2009), Auditoria Energética Styria Impormol, S.A., Iberdrola.

SOACT (2010), The State-of-the-Art Clean Technologies for Steelmaking Handbook, 2nd Edition, prepared by Lawrence Berkeley National Laboratory (California) and American Iron and Steel Institute (Washington).

Ungureanu, C.A., *et al.* (2007), Life-cycle cost analysis: aluminum versus steel in passenger cars. Proceedings of TMS Conference (the minerals, metals & materials society): 11–24.

World Steel Association, Overview of the Steelmaking Process - A fold-out poster.

Zhang, X. (2012), A new metric-based LCA method for assessing the sustainability performance of metallic automotive components. Theses and Dissertations--Mechanical Engineering - University of Kentucky.

## 7.2 Webgrafia

Artigos científicos sobre ferramentas ACV, 2015

Disponível em URL: <https://scholar.google.pt/>

Consultado a 08/09/2015

Correspondência m<sup>3</sup> para kWh de gás natural, 2015

Disponível em URL:

<http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/MercadoRegulado/Facturacao/Paginas/FacturaGasNatural.aspx>

Consultado a 22/06/2015

Custos COMPASS, 2015

Disponível em URL:

<http://www.sustainablepackaging.org/content/?type=5&id=compasscomparativepackagingassessment>

Consultado a 24/07/2015

Custos Sustainable Minds, 2015

Disponível em URL: <http://www.sustainableminds.com/getstarted>

Consultado a 25/07/2015

Custos CMLCA, 2015

Disponível em URL: <http://www.cmlca.eu/>

Consultado a 27/07/2015

Custos OpenLCA, 2015

Disponível em URL: <http://www.openlca.org/>

Consultado a 27/07/2015

Custos SimaPro, 2015

Disponível em URL: <http://www.pre-sustainability.com/pricelist>

Consultado a 25/07/2015

Custos eVerdEE, 2015

Disponível em URL: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/faces/tools/toolList.xhtml>

Consultado a 02/08/2015

Custos GaBi, 2014

Disponível em URL: <https://www.gabi-software.com/international/software/gabi-education/>

Consultado a 01/04/2014

Designação social da FAZ, 2015

Disponível em URL: <https://www.racius.com/frauenthal-automotive-azambuja-s-a/>

Consultado a 24/07/2015

Distância percorrida pelo aço até à FAZ, 2014

Disponível em URL: <https://www.google.pt/maps>

Consultado a 14/08/2014

Ferramentas informáticas de ACV, 2015 - Plataforma Europeia de ACV

Disponível em URL: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/tool.vm>

Consultado a 02/03/2015

Ficha GaBi do processo *Electricity grid mix 1kV-60kV*

Disponível em URL:

<http://gabi6lci/documentation.gabisoftware.com/xmldata/processes/e9d82aa90160499389456c4a1dc594f.xml>

Consultado a 05/04/2015

Ficha GaBi do processo *Diesel mix at refinery.*

Disponível em URL:

<http://gabidocumentation2013.gabisoftware.com/xmldata/processes/244524ed7b854548b345f58dc5cf9dac.xml>

Consultado a 05/04/2015

Ficha GaBi do processo *Natural gas mix.*

Disponível em URL:

<http://gabi-6-lci-documentation.gabi-software.com/xml-data/processes/8298730e-cb3e-4db1-9e35-755fec5e764c.xml>

Consultado a 05/04/2015

Lean, 2015

Disponível em URL:

<http://www.lean.org/>

Consultado a 10/09/2015

Localização da FAZ, 2013

Disponível em URL: <http://en.frauenthal-automotive.com/CONTACT/Locations#>

Consultado a 16/01/2013

Produção de aço, 2015

Disponível em URL: <http://www.worldsteel.org/faq/about-steel.html>

Consultado a 30/03/2015

*Software* SIMAPRO, 2015

Disponível em URL: <http://www.pre-sustainability.com/simapro>

Consultado a 10/06/2015

World Steel Association, 2015

Disponível em URL: <http://www.worldsteel.org/faq/about-steel.html>

Consultado a 22/01/2015

## 8. Anexos

### 8.1. Anexo I - Descritores qualitativos de performance para cada um dos critérios

Tabela I.1 - Descritor do critério “Aplicação”

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
É uma ferramenta macroeconómica, contempla diferentes áreas industriais, engloba diversas zonas geográficas	+ + +
Não é uma ferramenta macroeconómica, contempla diferentes áreas industriais, engloba diversas zonas geográficas	- + +
É uma ferramenta macroeconómica, contempla diferentes áreas industriais, não abrange diversas zonas geográficas	+ + -
É uma ferramenta macroeconómica, não contempla diferentes áreas industriais, engloba diversas zonas geográficas	+ - +
Não é uma ferramenta macroeconómica, contempla diferentes áreas industriais, não engloba diversas zonas geográficas	- + -
Não é uma ferramenta macroeconómica, não contempla diferentes áreas industriais, abrange diversas zonas geográficas	- - +
É uma ferramenta macroeconómica, não contempla diferentes áreas industriais, não abrange diversas zonas geográficas	+ - -
Não é uma ferramenta macroeconómica, não contempla diferentes áreas industriais, não engloba diversas zonas geográficas	- - -

Tabela I.2 - Descritor do critério “Tipo de ferramenta”

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
É uma ferramenta de modelação e tem uma base de dados	+ +
É uma ferramenta de modelação, mas não tem uma base de dados	+ -

Tabela I.3 - Descritor do critério “Características da ferramenta”

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
Permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, tem a capacidade de fazer gráficos, possui recursos de segurança para proteger o utilizador	+ + +
Permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, tem a capacidade de fazer gráficos, não possui recursos de segurança para proteger o utilizador	+ + -
Permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, não tem a capacidade de fazer gráficos, possui recursos de segurança para proteger o utilizador	+ - +
Não permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, tem a capacidade de fazer gráficos, possui recursos de segurança para proteger o utilizador	- + +
Permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, não tem a capacidade de fazer gráficos, não possui recursos de segurança para proteger o utilizador	+ - -
Não permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, não tem a capacidade de fazer gráficos, possui recursos de segurança para proteger o utilizador	- - +
Não permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, tem a capacidade de fazer gráficos, não possui recursos de segurança para proteger o utilizador	- + -
Não permite a importação/exportação de folhas cálculo e/ou documentos, não tem a capacidade de fazer gráficos, não possui recursos de segurança para proteger o utilizador	- - -

Tabela I.4 - Descritor do critério “Serviços de apoio disponíveis”

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
Tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), tem manual de utilizador, tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	+ + +
Tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), não tem manual de utilizador, tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	+ - +
Não tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), tem manual de utilizador, tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	- + +
Tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), tem manual de utilizador, não tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	+ + -
Não tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), não tem manual de utilizador, tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	- - +
Não tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), tem manual de utilizador, não tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	- + -
Tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), não tem manual de utilizador, não tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	+ - -
Não tem formação sobre <i>software</i> ( <i>workshops</i> ou <i>webinars</i> ), não tem manual de utilizador, não tem linha de apoio (e-mail, telefone ou <i>chat</i> )	- - -

Tabela I.5 - Descritor do critério “Plataforma informática”

<b>Descrição</b>	<b>Nível</b>
Pode ser utilizada em PC/Windows, Mackintosh e noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	+ + +
Pode ser utilizada em PC/Windows e em Mackintosh, mas não pode ser utilizada noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	+ + -
Pode ser utilizada em PC/Windows, não pode ser utilizada Mackintosh, pode ser utilizada noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	+ - +
Não pode ser utilizada em PC/Windows, mas pode ser utilizada em Mackintosh e noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	- + +
Pode ser utilizada em PC/Windows, não pode ser utilizada em Mackintosh nem noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	+ - -
Não pode ser utilizada em PC/Windows nem em Mackintosh, mas pode ser utilizada noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	- - +
Não pode ser utilizada em PC/Windows nem em Mackintosh, mas pode ser utilizada noutras plataformas informáticas (web-based, Linux, SAP, Unix)	- - +

Tabela I.6 - Descritor do critério “Linguagens disponíveis”

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
O <i>software</i> está disponível em inglês, em português e em francês ou castelhano	+ + +
O <i>software</i> está disponível em inglês e em português, mas não está disponível em francês ou castelhano	+ + -
O <i>software</i> não está disponível em inglês, mas está disponível em português e em francês ou castelhano	- + +
O <i>software</i> está disponível em inglês, não está disponível em português, mas está disponível em francês ou castelhano	+ - +
O <i>software</i> não está disponível em inglês, está disponível em português, não está disponível em francês ou castelhano	- + -
O <i>software</i> está disponível em inglês, não está disponível em português nem em francês ou castelhano	+ - -
O <i>software</i> não está disponível em inglês, não está disponível em português, mas está disponível em francês ou castelhano	- - +
O <i>software</i> não está disponível em inglês, nem está disponível em português, nem em francês ou castelhano	- - -

Tabela I.7 - Descritor do critério “Tópicos de desempenho abrangidos

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
Abrange áreas ambiental, social e económica	+++
Abrange áreas ambiental e económica, exceto área social	++
Abrange áreas ambiental e social, exceto área económica	++
Abrange áreas social e económica, exceto área ambiental	++
Abrange área ambiental, exceto áreas social e económica	++
Abrange área económica, exceto áreas ambiental e social	++
Abrange área social, exceto áreas económica e ambiental	++

Tabela I.8 - Descritor do critério “Utilização do *software* pela comunidade científica”

<b>Nível qualitativo</b>	<b>Abreviado</b>
% relativa ao número de resultados no Google Scholar >50%	+++
% relativa ao número de resultados no Google Scholar > 35% e < 50%	++
% relativa ao número de resultados no Google Scholar > 10% e < 35%	+
% relativa ao número de resultados no Google Scholar > 5% e < 10%	-
% relativa ao número de resultados no Google Scholar < 5%	--

## 8.2. Anexo II - Matrizes de julgamentos e escalas de cada um dos critérios

	+++	++	++	++	++	++	++	++	Escola actual	
+++	nula	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	100.00	extrema
++		nula	fraca	forte	forte	forte	mt. forte	mt. forte	60.00	mt. forte
++			nula	moderada	forte	forte	mt. forte	mt. forte	55.56	forte
++				nula	forte	forte	forte	mt. forte	44.44	moderada
++					nula	moderada	moderada	forte	28.89	fraca
++						nula	moderada	forte	22.22	mt. fraca
++							nula	forte	15.56	nula
++								nula	0.00	

**Julgamentos consistentes**

Figura II.1 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Aplicação”

	++	+-	Escola actual	
++	nula	forte	100	extrema
+-		nula	0	mt. forte
				forte
				moderada
				fraca
				mt. fraca
				nula

**Julgamentos consistentes**

Figura II.2 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Tipo de ferramenta”

	+++	++	++	++	++	++	++	++	Escola actual	
+++	nula	forte	forte	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	100.00	extrema
++		nula	forte	forte	forte	forte	forte	mt. forte	76.47	mt. forte
++			nula	moderada	forte	forte	forte	mt. forte	64.71	forte
++				nula	forte	forte	forte	mt. forte	55.88	moderada
++					nula	moderada	forte	forte	44.12	fraca
++						nula	forte	forte	35.29	mt. fraca
++							nula	forte	23.53	nula
++								nula	0.00	

**Julgamentos consistentes**

Figura II.3 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Características da ferramenta”

Serviços de apoio disponíveis

	+++	++	+	0	-	--	---	Escala actual	
+++	nula	forte	forte	forte	forte	extrema	extrema	100.00	extrema
++		nula	forte	forte	forte	forte	forte	71.43	mt. forte
+			nula	forte	forte	forte	forte	59.66	forte
0				nula	forte	forte	forte	55.10	moderada
-					nula	forte	forte	44.91	fraca
--						nula	forte	28.56	mt. fraca
---							nula	18.37	nula
---								0.00	

Julgamentos consistentes

Figura II.4 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Serviços de apoio disponíveis”

Plataforma informática

	+++	++	+	0	-	--	---	Escala actual	
+++	nula	forte	forte	forte	forte	mt. forte	mt. forte	100.00	extrema
++		nula	forte	forte	forte	forte	mt. forte	77.42	mt. forte
+			nula	moderada	moderada	forte	forte	54.84	forte
0				nula	moderada	forte	forte	45.16	moderada
-					nula	moderada	forte	35.49	fraca
--						nula	forte	22.58	mt. fraca
---							nula	0.00	nula

Julgamentos consistentes

Figura II.5 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Plataforma informática”

Linguagens disponíveis

	+++	++	+	0	-	--	---	Escala actual	
+++	nula	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	100.00	extrema
++		nula	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	82.01	mt. forte
+			nula	forte	forte	forte	forte	61.80	forte
0				nula	forte	forte	forte	57.30	moderada
-					nula	forte	forte	52.81	fraca
--						nula	forte	48.31	mt. fraca
---							nula	43.82	nula
---								0.00	

Julgamentos consistentes

Figura II.6 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Linguagens disponíveis”



Figura II.7 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”

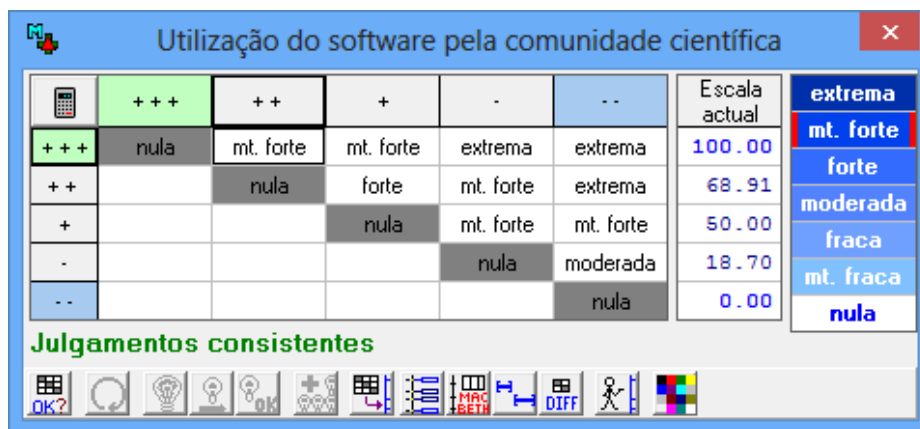


Figura II.8 - Matriz de julgamentos e escala para o critério “Utilização do *software* pela comunidade científica”

### 8.3. Anexo III -Análises de sensibilidade no peso para cada um dos critérios

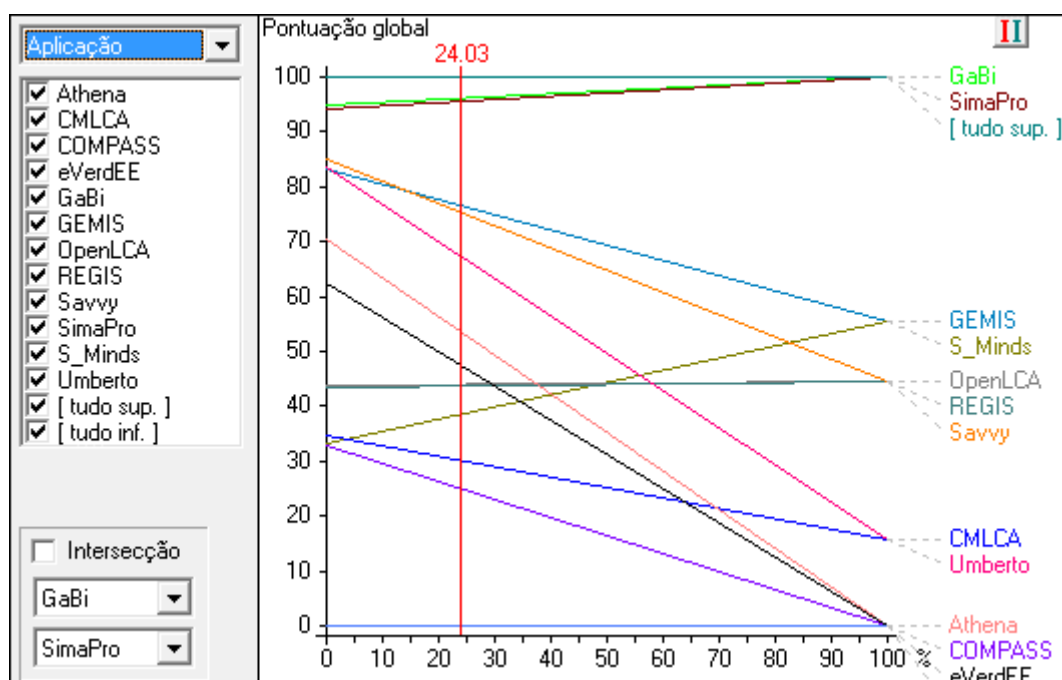


Figura III.1 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Aplicação”

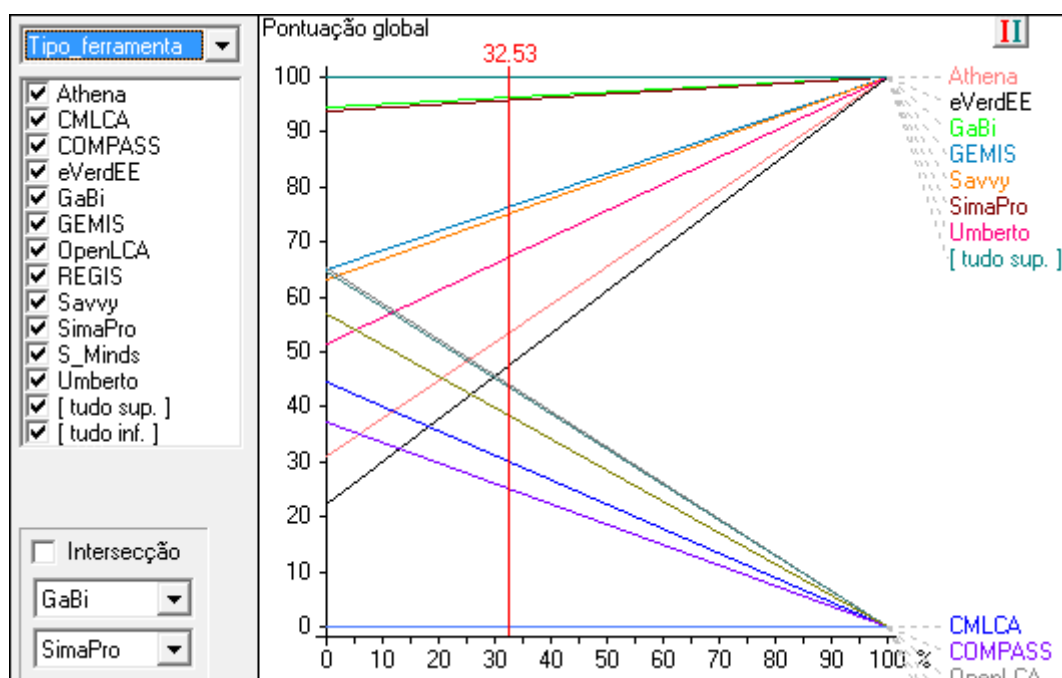


Figura III.2 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Tipo de ferramenta”

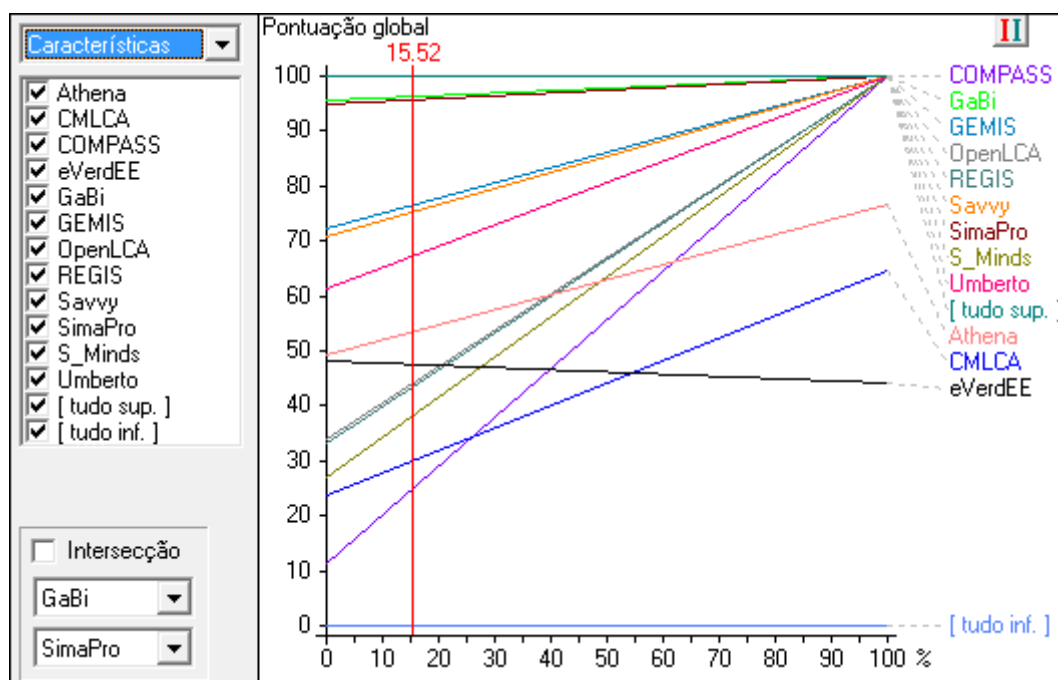


Figura III.3 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Características da ferramenta”

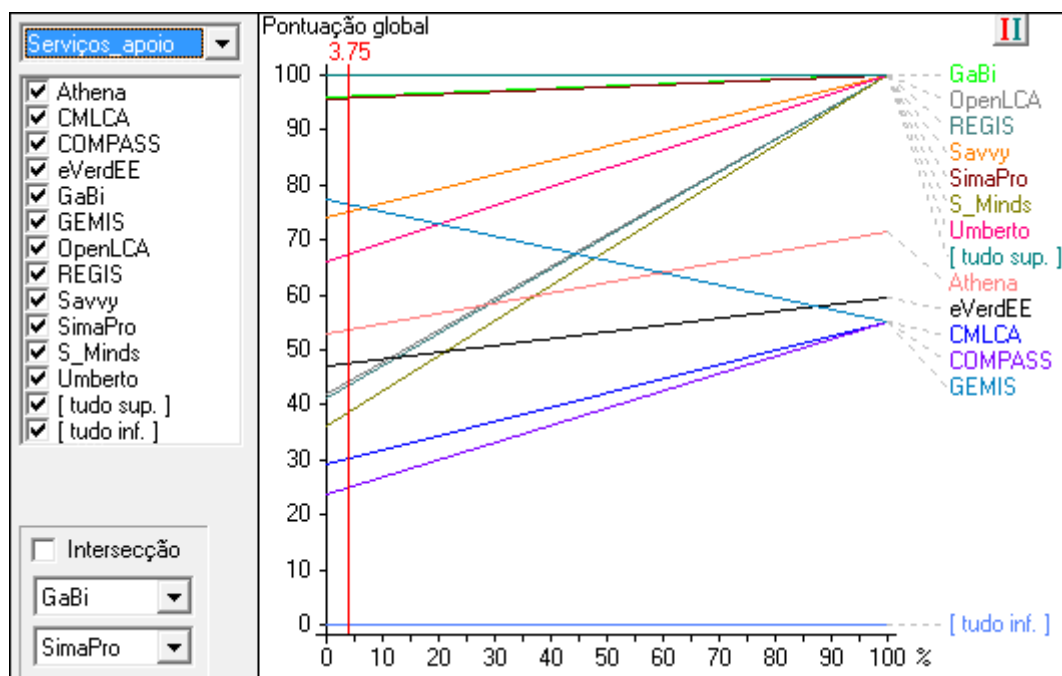


Figura III.4 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Serviços de apoio disponíveis”

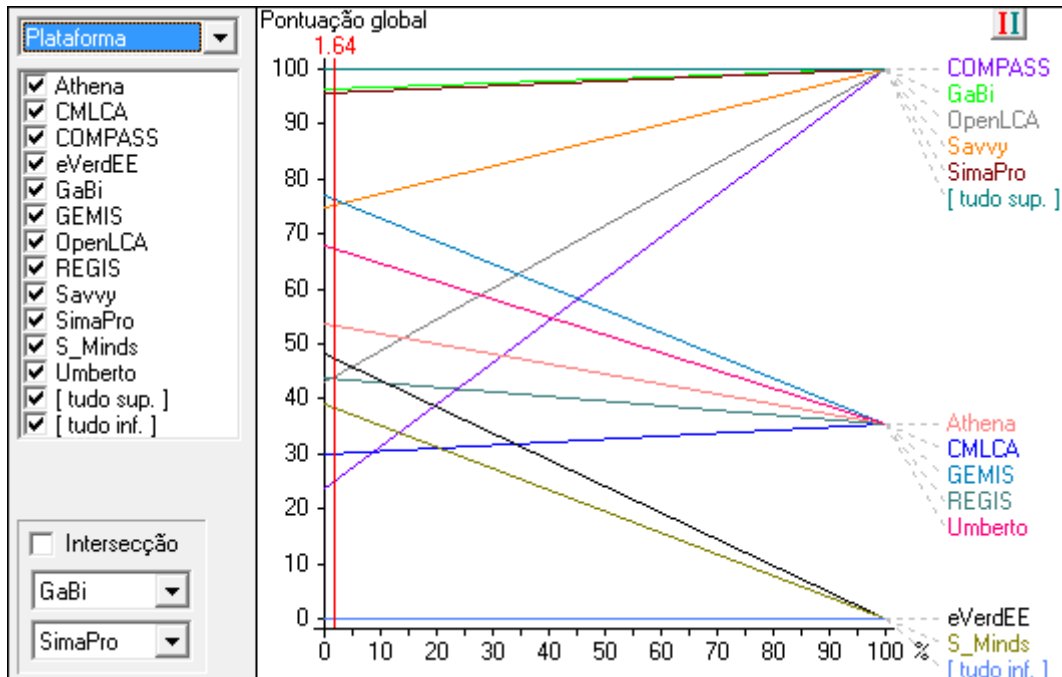


Figura III.5 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Plataforma Informática”

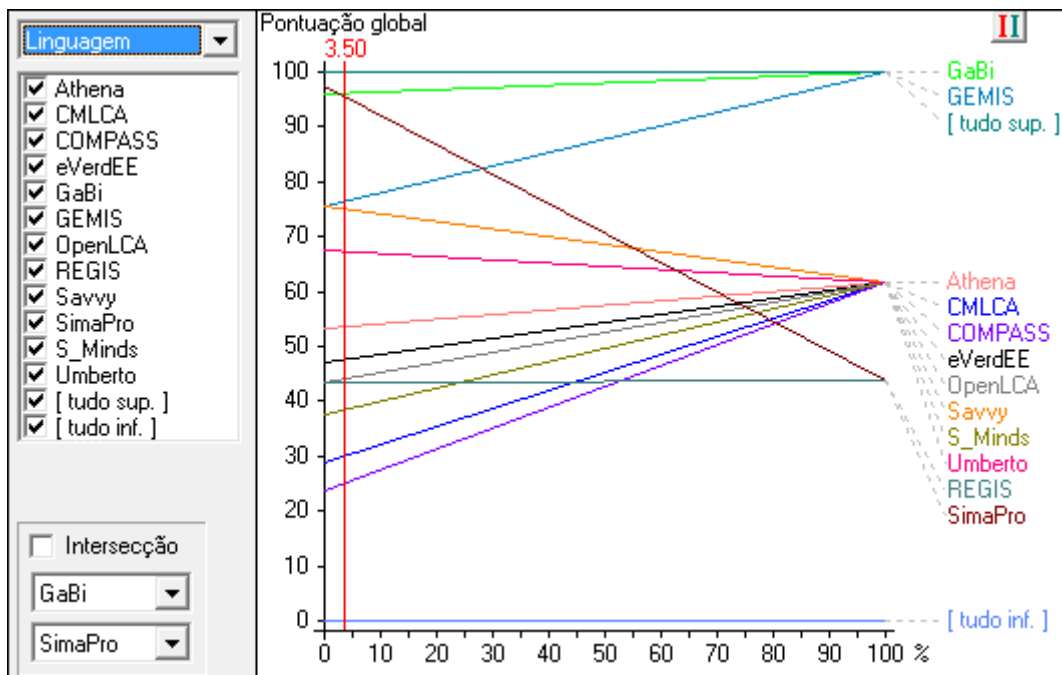


Figura III.6 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Linguagens disponíveis”

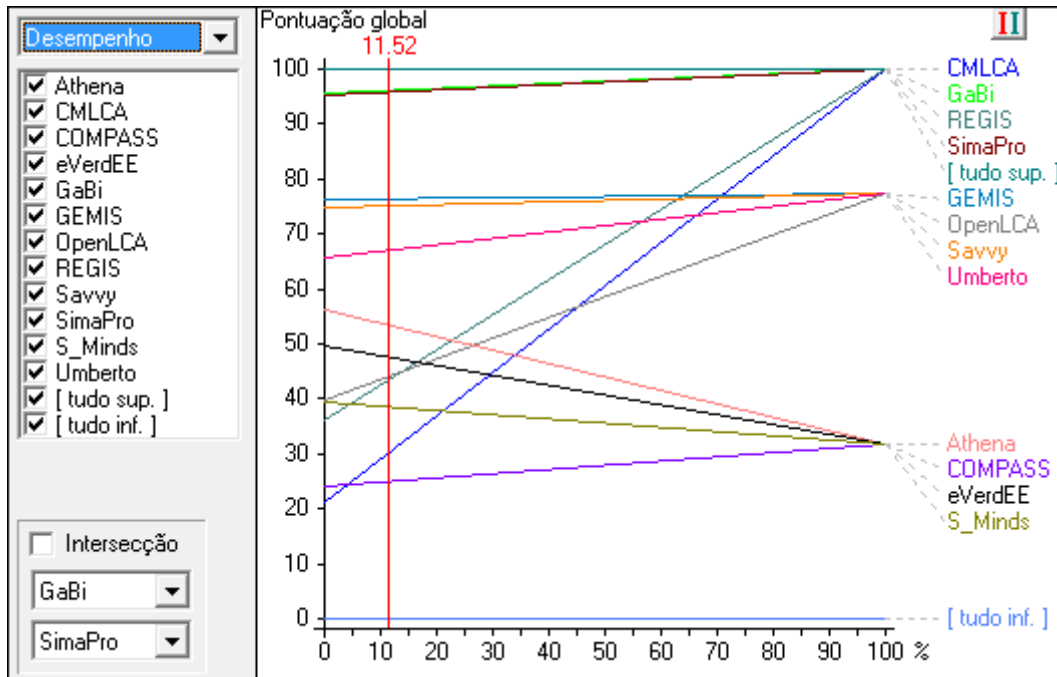


Figura III.7 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”

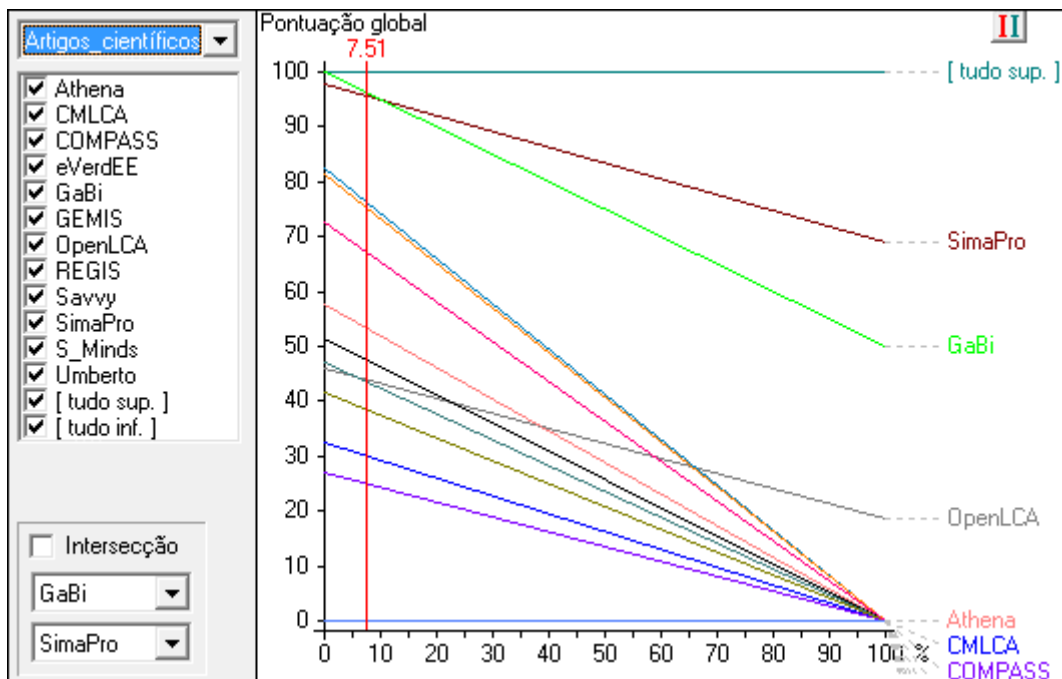


Figura III.8 – Representação esquemática da análise de sensibilidade no peso para o critério “Utilização do *software* pela comunidade científica”

### 8.4. Anexo IV -Análises de robustez para as opções em estudo

☰	[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	Savvy	GEMIS	Umberto	Athena	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi		=	+	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
SimaPro			=	+	+	+	+	+	+	▲	+	+	+	▲
Savvy				=	?	+	▲	+	+	+	+	+	+	▲
GEMIS					=	+	+	+	+	+	+	+	+	▲
Umberto						=	▲	+	+	+	+	+	+	▲
Athena							=	▲	+	+	+	+	+	▲
eVerdEE								=	+	+	+	+	+	▲
OpenLCA									=	+	+	+	+	▲
REGIS										=	+	+	+	▲
S_Minds											=	+	+	▲
CMLCA												=	+	▲
COMPASS													=	▲
[ tudo inf. ]														=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±3%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.1 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Aplicação”

☰	[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athena	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi		=	+	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
SimaPro			=	+	+	+	+	+	+	▲	+	+	+	▲
GEMIS				=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	▲
Savvy					=	▲	▲	▲	+	+	+	+	+	▲
Umberto						=	▲	▲	+	+	+	+	+	▲
Athena							=	▲	+	+	+	+	+	▲
eVerdEE								=	+	+	+	+	+	▲
OpenLCA									=	+	+	+	+	▲
REGIS										=	+	+	+	▲
S_Minds											=	+	+	▲
CMLCA												=	+	▲
COMPASS													=	▲
[ tudo inf. ]														=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±99%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.2 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Tipo de ferramenta”

[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athena	OpenLCA	eVerdEE	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SimaPro		=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GEMIS			=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Savvy				=	▲	▲	+	▲	+	+	+	▲	▲
Umberto					=	▲	+	▲	+	+	+	+	▲
Athena						=	+	▲	+	+	+	+	▲
OpenLCA							=	?	+	+	+	▲	▲
eVerdEE								=	+	+	+	+	▲
REGIS									=	+	+	+	▲
S_Minds										=	+	+	▲
CMLCA											=	+	▲
COMPASS												=	▲
[ tudo inf. ]													=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±22%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.3 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Características da ferramenta”

[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athena	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SimaPro		=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GEMIS			=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Savvy				=	▲	▲	▲	+	+	+	+	▲	▲
Umberto					=	▲	▲	+	+	+	+	+	▲
Athena						=	▲	+	+	+	+	+	▲
eVerdEE							=	+	+	+	+	+	▲
OpenLCA								=	+	+	+	▲	▲
REGIS									=	+	+	+	▲
S_Minds										=	+	+	▲
CMLCA											=	+	▲
COMPASS												=	▲
[ tudo inf. ]													=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±99%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.4 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Serviços de apoio disponíveis”

[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athens	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SimaPro		=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GEMIS			=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Savvy				=	▲	▲	▲	+	+	+	+	+	+
Umberto					=	▲	▲	+	+	+	+	+	+
Athens						=	▲	+	+	+	+	+	+
eVerdEE							=	+	+	+	+	+	+
OpenLCA								=	+	+	+	+	+
REGIS									=	+	+	+	+
S_Minds										=	+	+	+
CMLCA											=	+	+
COMPASS												=	+
[ tudo inf. ]													=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±99%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.5 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Plataforma informática”

[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athens	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SimaPro		=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GEMIS			=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Savvy				=	▲	▲	▲	+	+	+	+	+	+
Umberto					=	▲	▲	+	+	+	+	+	+
Athens						=	▲	+	+	+	+	+	+
eVerdEE							=	+	+	+	+	+	+
OpenLCA								=	?	+	+	+	+
REGIS									=	+	+	+	+
S_Minds										=	+	+	+
CMLCA											=	+	+
COMPASS												=	+
[ tudo inf. ]													=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±7%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.6 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Linguagens disponíveis”

[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athena	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SimaPro		=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GEMIS			=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Savvy				=	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Umberto					=	+	+	+	+	+	+	+	+
Athena						=	+	+	+	+	+	+	+
eVerdEE							=	+	+	+	+	+	+
OpenLCA								=	?	+	+	+	+
REGIS									=	+	+	+	+
S_Minds										=	+	+	+
CMLCA											=	+	+
COMPASS												=	+
[ tudo inf. ]													=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±5%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.7 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Tópicos de desempenho abrangidos”

[ tudo sup. ]	GaBi	SimaPro	GEMIS	Savvy	Umberto	Athena	eVerdEE	OpenLCA	REGIS	S_Minds	CMLCA	COMPASS	[ tudo inf. ]
[ tudo sup. ]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
GaBi	=	?	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SimaPro		?	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GEMIS			=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Savvy				=	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Umberto					=	+	+	+	+	+	+	+	+
Athena						=	+	+	+	+	+	+	+
eVerdEE							=	+	+	+	+	+	+
OpenLCA								=	+	+	+	+	+
REGIS									=	+	+	+	+
S_Minds										=	+	+	+
CMLCA											=	+	+
COMPASS												=	+
[ tudo inf. ]													=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Aplicação	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Tipo_ferramenta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Características	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Serviços_apoio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Plataforma	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Linguagem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Desempenho	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
Artigos_científicos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±4%

Informação global			
ordinal	MACBETH	restrições	cardinal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura IV.8 – Análise de robustez: estudo da margem de incerteza para o critério “Utilização do software pela comunidade científica”