



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Avaliação do ciclo de vida
Comparação de dois automóveis com diferentes tipos de
motorização

Bruno Miguel Gabriel Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão Industrial

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Carlos de Oliveira Matias

Covilhã, Outubro de 2014

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais por todo o apoio durante as minhas escolhas, e pela força que me deram para as conseguir concretizar.

Nota: A presente dissertação foi escrita usando o acordo ortográfico vigente até 2009.

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho não seria possível sem o apoio de algumas pessoas fundamentais nesta fase importante da vida. Assim, queria deixar o meu especial agradecimento:

- Ao Professor Dr. João Matias, pelo apoio, orientação, e saber científico durante a realização desta dissertação;
- Á D. Corinna Knödler da Daimler AG pela divulgação de informações sobre os automóveis;
- Á Eng. Kathleen Kiehl da Green Delta, pela partilha de informação dos softwares desenvolvidos e comercializados, e ainda pela demonstração do seu funcionamento;
- Aos meus pais por todo o apoio durante a realização deste trabalho, do percurso académico, da vida. Obrigado por tudo!
- Ao meu irmão por todo apoio principalmente nas alturas de maior trabalho;
- Á Rita por toda a paciência, ajuda e força, em especial nestes últimos meses mostrando-me que tudo é possível, e a não desistir;
- Á minha família por todas as palavras de apoio durante o percurso académico;
- Aos meus amigos de longa data, e aqueles conheci e me acompanharam durante estes seis anos na Covilhã.

Muito Obrigado.

Resumo

Com o acentuado aumento da poluição mundial, verificado nas últimas décadas, surgiu uma preocupação crescente em identificar as principais fontes causadoras da mesma, e, neste sentido, encontrar uma forma de minimizar o impacto ambiental provocado. Uma das principais fontes encontradas foi a utilização dos combustíveis fósseis, que constituem a principal fonte de energia dos automóveis na sua generalidade. Não apenas devido à poluição mas também por serem um recurso esgotável. Assim, surgiu a necessidade de procurar alternativas que contemplassem uma redução da dependência dos combustíveis fósseis para além da redução da poluição. Neste contexto, tem-se assistido ao aparecimento de inúmeras inovações com automóveis cada vez menos poluentes e fontes de energia alternativas como a electricidade.

Este estudo tem como principal objectivo observar quais os automóveis que poderão ser alternativos aos convencionais, e, conhecer qual o impacto ambiental causado pelos mesmos. Para isso, foram considerados um automóvel diesel e um híbrido (diesel e eléctrico).

Realizou-se um estudo observacional e descritivo com componente analítica. Foi utilizada a metodologia de avaliação de ciclo de vida dos diferentes automóveis para quantificar o desempenho ambiental de cada um. A avaliação de ciclo de vida realizada seguiu os padrões normalizados da norma NP EN ISO 14040:2008, incluindo as etapas de produção, fabrico de combustível e utilização do automóvel. Para tal, recorreu-se a um *software*, que, utilizando a metodologia de avaliação CML2001 permite quantificar o desempenho ambiental dos objectos em estudo em dez categorias.

Após quantificados os impactes, observou-se que a fase de utilização, em ambos os automóveis, foi a fase que apresentou maiores contribuições para as categorias de impacto estudadas, e, conseqüentemente, a fase de produção de combustível apresentou-se como a segunda com maior contribuição. Apesar de na fase de produção o automóvel híbrido apresentar pior desempenho ambiental, esta é compensada durante a fase de uso. Assim o automóvel híbrido apresenta um melhor desempenho ambiental ao longo do seu ciclo vida quando comparado com o automóvel diesel.

Palavras-chave

Avaliação do ciclo de vida, automóvel híbrido-diesel, automóvel diesel, CML2001, metodologia de avaliação do ciclo de vida

Abstract

After checking an increase in global pollution occurred in recent decades, and increasing concern to identify the main sources of it, and then find a way to minimize the environmental impact caused. The major source found was the use of fossil fuels, which are the main energy source for the cars in general. Not only due to pollution, but also fossil fuels being an exhaustible resource. Thus, the need to seek alternatives to contemplate a reduction of dependence on fossil fuels and the reduction in pollution emerged. In this context, we have seen the emergence of numerous innovations with less polluting cars and alternative energy sources such as electricity.

This study aims to see which cars could be alternative to conventional and know what the environmental impact caused by them. For this study were considered a diesel car and a hybrid one (diesel and electric).

Was conducted an observational, descriptive study with an analytical component. Was used the methodology of life cycle to quantify the environmental performance of each car during its life. The life cycle analysis was performed following the standard patterns of the NP EN ISO 14040: 2008, including the stages of production, fuel fabrication and car use. This analysis was performed by software, using the evaluation methodology CML2001 was used to quantify the environmental performance of the objects under study in ten categories.

Quantified the impacts, it has been observed that the use phase in both cars is the phase that presents the greatest contributions to the impact categories studied, and thus the phase of fuel production is presented as the second, with greatest contribution. Although the production phase of the hybrid automobile have worse environmental performance, which is compensated for in the phase of use. Thus, the hybrid automobile has a better environmental performance throughout its life cycle when compared to diesel automobile.

Keywords

Life cycle assessment, Hybrid-diesel car, Diesel car, CML2001, Life cycle assessment methodology

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Lista de figuras	xv
Lista de tabelas	xvii
Lista de acrónimos.....	xix
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento teórico	1
1.2 Objectivos da dissertação	3
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. Materiais e Métodos	5
2.1. Tipo de estudo.....	5
2.2. População-alvo	5
2.3. Recolha de informação.....	5
2.4. Pesquisa da literatura de referência	6
2.5. Método de avaliação de impacte ambiental	6
3. Automóveis ligeiros com diferentes sistemas de motorização	7
3.1 O Automóvel	7
3.2 O automóvel com motorização diesel	8
3.2.1 Motores de combustão interna	10
3.2.2 Mercedes-Benz E 300 cdi blueTEC EFFICIENCY	12
3.3 O automóvel com motorização híbrida (HEV).....	12
3.3.1 Constituinte de um automóvel híbrido	13
3.3.2 Avanços tecnológicos nos automóveis híbridos.....	16

3.3.3 Mercedes-Benz E 300 blueTEC HYBRID	18
4. Avaliação do ciclo de vida (ACV)	21
4.1 Aparecimento da metodologia de avaliação do ciclo de vida	21
4.2 Metodologia para a realização de uma ACV	24
4.2.1 Definição do Objectivo e do Âmbito	26
4.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	26
4.2.3 Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (AICV)	27
4.2.4 Interpretação do Ciclo de Vida	31
4.3 Levantamento de ferramentas de ACV.....	32
4.4 Métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	35
4.5 Base de dados	35
5. Aplicação da avaliação de ciclo de vida	37
5.1 Definição do objectivo e âmbito do estudo	37
5.1.1 Método de avaliação de impacte ambiental.....	38
5.2 Propriedades dos objectos em estudo e período de utilização	47
5.2.1 Propriedades dos automóveis	47
5.2.2 Período de utilização	47
5.3 Limitações do estudo.....	48
5.4 Inventário de ciclo de vida (ICV)	49
5.4.1 Fabrico do automóvel	50
5.4.2 Utilização do automóvel	51
5.4.3 Fabrico de combustível.....	52
5.5 Avaliação do impacte de ciclo de vida (AICV)	52
5.5.1 Selecção de categorias de impacte, indicadores de categoria e modelos de caracterização	52
5.5.2 Classificação - atribuição dos resultados de ICV.....	52
5.5.3 Caracterização - cálculo dos resultados dos indicadores de categoria	53
5.6 Interpretação dos resultados obtidos na caracterização	54
5.6.1 Análise individual das categorias de impacte	55

5.7 Normalização	62
6. Conclusões	65
6.1 Conclusões gerais	65
6.2 Desenvolvimentos Futuros.....	69
7. Bibliografia	71
8. Anexos.....	77
8.1 Catálogo de especificações dos automóveis	77
8.2 Estudo Jornal Público e ACAP.....	77

Lista de figuras

Figura 1- Sistema biela - manivela com o PMI e PMS [18].	10
Figura 2 - Quatro fases características de um motor de quatro tempos de um motor a gasolina. Adaptado de [22].....	11
Figura 3 - Montagens de um motor eléctrico com um motor de combustão interna. Adaptado de [7].....	13
Figura 4- Comparação da autonomia dos diferentes tipos de baterias, na unidade milhas por galão [26].....	15
Figura 5 - Exemplo de travagem regenerativa e de auxílio dos motores eléctricos em aceleração em veículos híbridos. Adaptado de [30].	17
Figura 6 - Exemplo de funcionamento da alimentação exclusivamente eléctrica, e do sistema de travagem regenerativa [7].	20
Figura 7 - Diferentes tipos de funcionamento do automovel; 1- Funcionamento fora de cidade; 2- Aceleração; 3- Funcionamento da motorização de combustão interna após fase 2 para repor energia eléctrica; 4 - utilização da desaceleração e da travagem regenerativa [7].....	20
Figura 8 - Exemplo de um ciclo de análise de ciclo de vida [36].	23
Figura 9 - Entradas e saídas em um sistema e subsistema de produto [34].	23
Figura 10 - Exemplo de um sistema de produto. Adaptado de [4].	25
Figura 11 - Fases da Análise de Ciclo de Vida [4].	25
Figura 12 - Elementos da fase de ACIV [34].	28
Figura 13 - Factores de normalização divididos em categoria de impacte, unidade e localização [41].	30
Figura 14 - Relações entre os elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV. Adaptado de [4].	32
Figura 15 - Árvore de processo de uma avaliação do ciclo de vida de um automóvel [59].	49
Figura 16 - Contribuição em termos percentuais de cada automóvel para cada categoria de impacte, na fase de caracterização.	55
Figura 17- Comparação do potencial de esgotamento de recursos abióticos, em particular dos combustíveis fósseis, entre os dois veículos, expresso em GJ.	55

Figura 18 - Comparação do potencial de aquecimento global entre os dois veículos, expresso em toneladas de dióxido de carbono.....	56
Figura 19 - Valores obtidos na comparação da categoria de impacte potencial de formação de ozono troposférico (POPC) entre os dois veículos, expresso em quilogramas de etileno.	57
Figura 20 - Valores obtidos para o Potencial de acidificação (AP) em comparação entre os dois veículos, expresso em quilogramas de dióxido de enxofre.....	58
Figura 21 - Valores obtidos para o Potencial de eutrofização (EP) em comparação entre os dois veículos, expresso em quilogramas de dióxido de fosfato.	59
Figura 22 - Valores obtidos para o Potencial de destruição da camada de ozono (ODP) em comparação entre os dois veículos, expresso em quilogramas de CFC-11.....	59
Figura 23 - Resultados obtidos para a categoria de impacte potencial de toxicidade humana, expresso em kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.)	60
Figura 24 - Resultados obtidos para a categoria de impacte FAETP, expresso em kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.).....	60
Figura 25 - Resultados obtidos para a categoria de impacte MAETP, expresso em kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.).....	61
Figura 26 - Resultados obtidos para a categoria de impacte TETP, expresso em kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.).....	61
Figura 27 - Contribuição das diferentes etapas do ciclo de vida do automóvel diesel para as categorias de impacte avaliadas.....	62
Figura 28 - Contribuição das diferentes etapas do ciclo de vida do automóvel híbrido para as categorias de impacte avaliadas.....	63

Lista de tabelas

Tabela 1 - Marca e modelos de possíveis automóveis contemplados para o estudo	5
Tabela 2 - Características do Mercedes-Benz E300 cdi blueTEC EFFICIENCY [7].	12
Tabela 3 - Características do Mercedes-Benz E300 blueTEC Hybrid [7].	19
Tabela 4- Descrição de algumas ferramentas de apoio à ACV.	33
Tabela 5 - Categorias de impacte ambiental e unidades utilizadas na sua quantificação [41].	38
Tabela 6- Produção energética renovável na Alemanha nos anos 2011 e 2012.	48
Tabela 7 - Recursos materiais utilizados durante a produção de cada automóvel.	50
Tabela 8 - Recursos energéticos necessários durante a produção de cada automóvel	50
Tabela 9 - Quantificação das categorias de impacte ambiental obtidos através do <i>software OpenLCA</i>	53
Tabela 10 - Elementos emitidos para o ar durante o ciclo de vida dos automóveis.	53
Tabela 11 - Elementos emitidos para a água durante o ciclo de vida dos automóveis.	54

Lista de acrónimos

ACV - Avaliação do ciclo de vida;
ADP - Abiotic depletion potential;
AICV - Avaliação do impacte de ciclo de vida;
AP - Acidification potential;
BEVs - Battery electric vehicles;
EP - Eutrophication potential
FAETP- Freshwater Aquatic *Eco Toxicity* Potential;
FCVs - Fuel cell vehicles;
GWP - Global warming potential;
HEVs - Hybrid electric vehicles;
HTP - Human toxicity potential;
ICVs- Internal combustion vehicles;
ICV - Inventário de ciclo de vida;
IPQ - Instituto Português da qualidade;
ISO - International organization for standardization;
MAETP - Marine Aquatic *Eco Toxicity* Potential;
MRI - Midwest research institute;
LCA - Life cycle assessment;
OMM -Organização mundial de meteorologia;
PHEVs - Plug-in Hybrid electric vehicles;
PRIRs - Pollutant Release and Transfer Registers;
REPA - Resource and environmental profile analysis
SETAC - Society of environmental toxicology and chemistry;
SOC - State of charge;
USEPA - United States environmental toxicology and chemistry;
USES - Uniform system for the evaluation of substances;
TETP- Terrestrial *Eco Toxicity* Potential.

1. Introdução

Neste primeiro capítulo pretende-se elaborar um enquadramento à temática abordada neste projecto de investigação. São também descritos os objectivos que se pretendem alcançar e a metodologia de investigação adoptada para a elaboração do trabalho. Por último é apresentada a estrutura da presente dissertação.

1.1 Enquadramento teórico

Com o aumento da poluição mundial e com a crescente preocupação com a saúde pública, estudos revelam que mais de 600 milhões de pessoas estão diariamente expostas a agentes poluentes criados pela poluição rodoviária, maioritariamente poluição atmosférica, provocada pelos diferentes automóveis. A poluição atmosférica e o seu impacte têm sido alvo de contínua investigação em diversas áreas, como nos transportes, na indústria, etc. Tem sido também investigada a influência da qualidade do ar na saúde pública. Sabe-se que a qualidade do ar está intimamente relacionada com a mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares. Os gases que mais se associam a estas preocupações são os produzidos durante o ciclo de vida de um automóvel convencional, destacando-se, o dióxido de carbono (CO_2), o ozono (O_3), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de enxofre (SO_2), o dióxido de azoto (NO_2), o chumbo (Pb), entre outros [1].

Devido à crescente preocupação com a poluição mundial a indústria automóvel tem sofrido pressão para reduzir o impacte ambiental na sua forma tradicional de fabrico de veículos a gasolina e a diesel, uma vez que estes serão insustentáveis a médio-longo prazo. As entidades reguladoras do sector têm orientado as indústrias para soluções mais ecológicas, e, tentam impor padrões de compra aos consumidores, levando-os também a procurar soluções mais sustentáveis. Este aspecto pode ser uma mais-valia para os profissionais da indústria, no sentido em que, a variável ambiental cada vez mais pode representar uma oportunidade de estes ganharem uma vantagem competitiva. Assim, os profissionais da indústria recorreram à análise de informação científica para desenvolver uma forma clara e confiável de medir o desempenho ambiental dos automóveis, para que se possam analisar os seus progressos, avaliar o impacte de soluções alternativas e relatar os seus resultados de sustentabilidade [2].

Uma das técnicas utilizadas para a análise do impacte ambiental provocado por um determinado produto, um conjunto de processos, ou fazer uma comparação entre produtos, ou processos de forma a visualizar qual o mais vantajoso a nível ambiental, é a avaliação de ciclo de vida dos mesmos. A avaliação de ciclo de vida (ACV), mais conhecida no seu termo Inglês por *Life Cycle Assessment (LCA)*, é uma metodologia que permite avaliar pormenorizadamente e quantitativamente todo o impacte provocado por um processo ou

produto desde o seu início de vida, ou seja, o processo de extracção de matérias-primas, até ao final de vida quando este é reciclado, ou recebe outro tratamento final [3]. A utilização da metodologia de avaliação de ciclo de vida deverá respeitar a normalização existente sobre a sua utilização, que, em Portugal, é, o Instituto Português da Qualidade (IPQ). Para a realização de uma ACV, esta deve estar de acordo com as normas vigentes, nomeadamente, a NP EN ISO 14040:2008, que diz respeito aos princípios e enquadramento da ACV, e, a NP EN ISO 14044:2010 onde são discriminados os requisitos e as linhas de orientação para a elaboração de uma ACV [4,5].

A motivação para a realização do estudo da presente dissertação surgiu com o aparecimento de um novo tipo de automóvel no mercado, o híbrido diesel. Este tipo de automóvel tem como principal objectivo reduzir os consumos de combustível através da utilização do motor eléctrico em diversas situações. Existem vários estudos em que são comparados automóveis com motorizações de combustão interna (diesel e gasolina) com automóveis eléctricos, híbridos a gasolina, híbridos Plug-in e fuel-cell de modo a perceber quais apresentam um melhor desempenho ambiental entre si [3,63,64]. Como se trata de um novo tipo de automóvel, ainda não existe um grande número de estudos comparativos. De facto, foi apenas encontrado um estudo realizado por uma marca de automóveis sobre isso mesmo. Como tal, este estudo, visa responder a duas questões pertinentes: Apresentará o veículo híbrido-diesel durante o seu ciclo de vida um melhor desempenho ambiental? Será esta motorização uma solução para o futuro?

A selecção dos automóveis para o desenvolvimento de um estudo comparativo de ACV é relevante para observar qual o impacte ambiental, nas suas diferentes fases de ciclo de vida. Os dois tipos de veículos seleccionados para a realização da ACV, e, também tema central desta dissertação de mestrado, são o automóvel diesel e o automóvel híbrido (diesel e eléctrico).

Por um lado, temos os veículos diesel, que são comumente conhecidos pelo seu baixo custo de utilização, sendo normalmente os veículos que percorrem mais quilómetros. Estes existem desde 1893, e, foram sofrendo alterações para aumentar a sua eficiência, representando, actualmente, 70% do mercado automóvel em Portugal [6]. Por outro lado, surgem os veículos híbridos, que normalmente possuem: um motor a gasolina por ser mais leve ou um motor diesel quando o binário é mais importante, e, um motor eléctrico que serve como auxílio ao motor de combustão. O motor de combustão poderá ser desactivado, por exemplo, quando o motor eléctrico é suficiente (filas de trânsito, zonas planas, etc...) constituindo deste modo, uma forma importante de economizar combustível, já que, irá apenas utilizar energia eléctrica acumulada num dispositivo responsável pela acumulação de energia [7].

1.2 Objectivos da dissertação

Esta dissertação tem como principal objectivo uma análise comparativa do desempenho ambiental de dois automóveis que possuem o mesmo nível de potência, tendo um motor de combustão interna alimentado totalmente por combustível de origem fóssil, o diesel, e, o outro, um motor de combustão interna alimentado pelo mesmo combustível fóssil juntamente com um motor eléctrico. Esta análise, pretende entender qual o impacte ambiental criado por ambos os automóveis, (diesel, e híbrido-diesel) durante o seu ciclo de vida, e verificar se existem preocupações ambientais adicionais (relativamente aos automóveis já existentes) associadas ao aparecimento deste segundo automóvel.

Como tal, utilizou-se a metodologia de avaliação de ciclo de vida para cada um dos diferentes tipos de automóvel, onde foram abrangidas três fases do ciclo:

- A fase de produção;
- A produção do combustível para a utilização;
- A utilização do automóvel;

Para efectuar esta análise foram analisados diversos *softwares*, assim como diversas bases de dados existentes no mercado, sendo adoptado para o estudo o *software OpenLCA*. Foram também definidos alguns objectivos complementares de forma a conseguir alcançar o objectivo principal da dissertação, sendo eles:

- Selecção de dois automóveis com a mesma marca, modelo e combustível, e que apresentassem melhorias ambientais, menores consumos, e diferentes sistemas de propulsão - um a diesel e outro híbrido (diesel e electricidade);
- Análise de diversos *softwares* de análise de ciclo de vida;
- Análise das características de cada um dos automóveis;
- Análise e comparação do impacte ambiental do ciclo de vida de cada um dos automóveis.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida por capítulos no sentido de apresentar de forma clara e detalhada toda a informação. Assim, temos:

- Capítulo 1: No primeiro capítulo será apresentada uma breve contextualização do tema, os objectivos e ainda a estrutura que esta apresenta;
- Capítulo 2: O segundo capítulo relata o tipo de estudo efectuado, a população alvo a que este se destina, como foi efectuada a recolha de informação e ainda a metodologia adoptada no estudo;
- Capítulo 3: Este capítulo fala sobre os objectos em estudo. Descreve os dois tipos de automóveis em estudo, assim como, as tecnologias que foram aparecendo e a

sua aplicabilidade. Contém ainda a descrição do modo de funcionamento de cada um dos automóveis;

- Capítulo 4: No quarto capítulo é apresentada toda a informação relativa á análise do ciclo de vida, que é o método que permite a comparação do impacte ambiental causado pelos automóveis em estudo. Apresenta ainda um levantamento de *softwares* que permitem uma realização mais rápida e facilitada de ACV;
- Capítulo 5: O quinto capítulo apresenta a aplicação do método de avaliação do ciclo de vida ao estudo comparativo entre os dois automóveis, as limitações do estudo, e, os resultados obtidos através da utilização do *software*;
- Capítulo 6: Apresenta a conclusão do trabalho com discussão dos resultados obtidos. Destaca também outras comparações já executadas entre outros tipos de automóveis e apresenta sugestões para possíveis trabalhos;
- Capítulo 7: Neste último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para a realização da dissertação.

2. Materiais e Métodos

2.1. Tipo de estudo

Na presente dissertação realizou-se um estudo observacional e descritivo com uma componente analítica onde são comparados os dois automóveis.

2.2. População-alvo

Esta dissertação tem como público-alvo o meio académico. Pode ainda ser utilizada por empresas que pretendam seguir a metodologia de ACV para o seu ramo de actividade.

2.3. Recolha de informação

A recolha de dados para a presente dissertação passou primeiramente por avaliar quais os automóveis híbridos do mercado, e, observar qual o segmento a que estes pertenciam. De seguida, foram contactadas as marcas internacionais, assim como os respectivos importadores, requisitando dados sobre os automóveis em questão. Foi solicitado quais os materiais utilizados pelos veículos e quais os estudos já realizados. Na tabela 1, em baixo, estão algumas das propostas de veículos que poderiam ser válidos para o nosso estudo.

Tabela 1 - Marca e modelos de possíveis automóveis contemplados para o estudo

Marca	Modelo
Toyota	Prius 1.8
Honda	CRz 1.5
Citröen	DS5 2.0 e-hdi
Mercedes-Benz	E300 HYBRID

Marca	Modelo
Toyota	Auris 1.33
Honda	Civic 1.4
Citröen	DS5 2.0 hdi
Mercedes-benz	E300 cdi

Seguidamente, após recolher as respostas e analisar a informação cedida foram seleccionados os automóveis a serem estudados. A escolha recaiu sobre os dois veículos da Mercedes-benz uma vez que estes apresentam uma viatura do mesmo modelo com diferente motorização, dentro do que era expectável para o nosso estudo, e, também, devido à informação facultada para o estudo.

2.4. Pesquisa da literatura de referência

A pesquisa da literatura foi realizada a partir de algumas bases de dados como: ScienceDirect, Springer Link, IEEE Xplore digital library e também através da RSC publishing. As palavras utilizadas para a pesquisa foram: avaliação do ciclo de vida, avaliação do ciclo de vida em automóveis, automóvel diesel, automóvel híbrido e CML2001.

2.5. Método de avaliação de impacte ambiental

Para a realização da avaliação do impacte ambiental deste estudo foram recolhidos os dados e colocados no *software* informático de avaliação do ciclo de vida *OpenLCA*. O método de avaliação do impacte ambiental seleccionado para a ACV dos dois automóveis foi um dos métodos preferenciais na Europa, o CML2001. Este método nasceu em 2001 quando um grupo de cientistas sob a direcção do CML(Center of Environmental Science of Leiden University) propôs um conjunto de categorias de impacte bem como métodos de caracterização para a etapa da sua avaliação, substituindo o método liderado por essa instituição até a essa altura, o CML 1992. Este método é aplicado seguindo o guia criado para o efeito, o manual Holandês “Dutch handbook on LCA”. Este guia, fornece uma lista de categorias de avaliação do impacte, orientados para o estudo em “mid-point”, ou seja, faz uma abordagem orientada aos problemas (versão “*baseline*”) e também pode fazer uma abordagem aos danos causados (versão “*non-baseline*”) [8,9].

Para o nosso estudo foi usada a metodologia CML2001 “*baseline*” que apresenta as categorias de impacte ambiental:

- Potencial de aquecimento global (ADP),
- Potencial de aquecimento global (GWP),
- Potencial de formação de ozono troposférico (POCP),
- Potencial de acidificação (AP),
- Potencial de eutrofização (EP),
- Potencial de destruição da camada de ozono (ODP),
- Potencial de Eco-toxicidade humana (HTP),
- Potencial de Eco-toxicidade de água doce (FAETP),
- Potencial de Eco-toxicidade Marinha (MAETP),
- Potencial de Eco-toxicidade Terrestre (TETP).

3. Automóveis ligeiros com diferentes sistemas de motorização

Neste terceiro capítulo pretende-se elaborar um enquadramento aos automóveis que serão alvo de estudo bem como aos seus diferentes sistemas de motorização. São também descritas quais as diferenças de funcionamento entre os dois automóveis e ainda as vantagens e desvantagens da utilização dos mesmos.

3.1 O Automóvel

Os automóveis vieram mudar o modo como as pessoas se deslocam no seu dia-a-dia. Permitiram uma forma, mais cómoda, de se deslocarem através do meio terrestre, oferecendo muitos benefícios à sociedade, entre eles a diminuição do tempo de viagem. No entanto, os automóveis possuem também desvantagens devido aos seus altos custos relativamente à segurança, à poluição do ar, ao consumo de combustíveis fósseis e de outros recursos. Grupos de especialistas têm tentado arranjar uma forma de combater estas desvantagens, tentando tornar os veículos sustentáveis, alterando-lhe características como o design, componentes de segurança ou componentes de locomoção. Mas, a grande maioria das alterações, tem-se verificado a nível dos consumos de combustíveis, e, das emissões poluentes, uma vez que tem existido um tendencial aumento do número de automóveis e conseqüentemente dos efeitos prejudiciais dos mesmos [10].

Algumas tecnologias têm aparecido no combate a estas desvantagens apresentadas pelos veículos convencionais (com motor de combustão interna) como válvulas EGR (Válvula de recirculação de gases), filtro FAP (Filtros anti-partículas) e sistemas start&stop que permitem a redução de consumo de combustível em situações específicas e também uma redução significativa das emissões de óxidos nitrosos (NO_x). Porém, existe um aumento de material particulado (PM), mas que pode ser combatido através da utilização do filtro FAP [11,12,13]. Além desta evolução tecnológica, têm aparecido combustíveis alternativos, os biocombustíveis, que alimentam os veículos com motor de combustão interna (ICVs), os veículos de bateria eléctrica (BEVs) e os veículos de célula de combustível de hidrogénio (FCVs). Existem também soluções híbridas, tais como veículos eléctricos a bateria equipados com extensores de alcance (Plug-in Hybrid Electric Vehicles ou PHEVs), sejam motores de combustão interna ou células de combustível. Os três combustíveis (biocombustíveis, electricidade e hidrogénio) alternativos aos convencionais (diesel e gasolina) podem ser a forma de reduzir a dependência do petróleo. O hidrogénio e a electricidade apresentam um valor nulo de emissões poluentes para o ar durante o seu uso. No entanto, e no caso dos biocombustíveis estes devem traduzir uma redução significativa das emissões dependendo das fontes de energia primária e dos processos utilizados na sua produção, embora não haja

informações adequadas sobre os impactos da sua utilização na qualidade do ar, quando utilizados em grande escala [14].

Em Portugal, o parque automóvel está envelhecido, com uma média de onze anos por automóvel, e, como tal, os automóveis com combustíveis derivados de petróleo são predominantes. Um estudo levado a cabo pelo Jornal Público com base em dados fornecidos pela ACAP mostra que em 2012 num total de 5.807.100 automóveis, existia a predominância dos automóveis diesel com 3.530.716 unidades (60,8%), 2.238.056 de automóveis a gasolina (27,5%), 37.648 unidades de automóveis híbridos (1,9%), e, 580 unidades de automóveis eléctricos (0,01%). Dados revelados pela ACAP mostram que em 2012 existia uma tendência para um aumento do parque automóvel diesel, pois as vendas representaram 70,6% (67.288 unidades) dos automóveis diesel, 27,5% (26.209 unidades) dos automóveis a gasolina, e os veículos movidos por outros combustíveis (eléctricos, híbridos) representaram 1,9% (1810 carros) [15].

Apesar da sensibilização de todos os utilizadores dos automóveis que possuem motorizações que consomem exclusivamente combustíveis fósseis, de que estes são dependentes de uma fonte de recursos esgotáveis, ainda é notável a falta de aceitação de automóveis com veículos movidos com combustíveis alternativos, ou mesmo totalmente eléctricos, como é notável no volume de vendas de 2012, previamente analisado. Estudos realizados mostram que a falta da implementação de viaturas eléctricas (as quais existem em menor quantidade no parque automóvel e pertencem às menos vendidas) pode ter duas causas possíveis: a autonomia e o preço elevado. A sua aceitação seria maior se existisse uma ajuda por parte do governo subsidiando em parte o valor destes à compra. O factor económico é de tamanha importância para os potenciais compradores, que estes retiram importância à autonomia (sendo que esta determina a capacidade do automóvel se deslocar em grandes distâncias), em prol do aspecto económico. Assim, o cliente irá preferir um veículo com menor autonomia, mas com um custo mais baixo [16].

Uma alternativa que permite a redução do consumo de combustíveis dependentes do petróleo são os veículos híbridos (PHEVs e HEVs), e como tal tem-se verificado uma crescente procura a estes modelos, não apenas pelo consumo mais moderado, mas também devido ao imposto de circulação mais reduzido. Segundo a ACAP, em 2013, foram vendidos 1994 veículos híbridos, o que revela um crescimento bastante acentuado relativamente ao anterior ano.

3.2 O automóvel com motorização diesel

Os automóveis com motorização diesel possuem em si uma enorme semelhança com os automóveis com motorização a gasolina. Normalmente encontramos os mesmos modelos de automóveis com as diferentes motorizações gasolina e diesel. Estes possuem o mesmo

princípio de funcionamento para se moverem, convertendo a energia do combustível em energia mecânica através de um processo termodinâmico do calor libertado na combustão do combustível. Apesar destas semelhanças o automóvel diesel apareceu mais tarde relativamente ao automóvel a gasolina. O motor diesel que hoje conhecemos surge de princípios propostos por Sadi Carnot no início do século XIX (1824), que determinava os princípios da combustão interna. Em 1892 o engenheiro Rudolf Diesel aplicou os princípios de Sadi Carnot num ciclo de combustão, o qual patenteou, e ficou conhecido como “O ciclo Diesel”. Para isso usou um motor que durante a compressão da mistura de combustível e ar, criava uma fonte de ignição e gerava o calor por si desejado. Diesel teria esta ideia nos seus tempos de estudante quando assistia a palestras na universidade que frequentava e se apercebia que os motores que predominavam, os motores a vapor, tinham uma quebra de rendimento muito elevada, aproveitando apenas 3% da energia que era introduzida para combustão, e que nisso resultaria um enorme desperdício e uma grande quantidade de poluição atmosférica [17,18]. Desde então, tem havido uma preocupação com o aumento da eficiência das motorizações como por exemplo a introdução de turbo-compressores. Neste contexto tem-se verificado ao longo dos anos uma crescente potência nos automóveis, reduzindo os seus consumos e conseqüentemente as suas emissões poluentes [19]. Esta evolução tem sido impulsionada pela existência de normas europeias com o objectivo de diminuir o impacte ambiental negativo dos veículos rodoviários no ambiente e na saúde, tentando diminuir uma vasta gama de emissões poluentes: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não-metânicos (NMVOC), hidrocarbonetos totais (HC), e também óxidos de azoto (NO_x) [20].

Actualmente, os automóveis diesel ligeiros deverão respeitar as seguintes características, Euro 5 [21]:

- Monóxido de carbono: 500 mg/km;
- Partículas: 5 mg/km (uma redução de 80 % das emissões em relação à anterior norma Euro 4);
- Óxidos de azoto (NO_x): 180 mg/km (uma redução de mais de 20 % das emissões em relação à norma Euro 4);
- Emissões combinadas de hidrocarbonetos e de óxidos de azoto: 230 mg/km.

É importante referir que a partir de Setembro de 2014, os veículos terão que respeitar os parâmetros da norma Euro 6 à saída da fábrica e todos os automóveis comercializados a partir de Janeiro de 2015 também.

3.2.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna mais comuns são os de pistão. Em teoria estes funcionam através do princípio de biela-manivela, como é possível observar na figura 1. Na prática estes são constituídos por cilindros nos quais deslizam os pistões que estão ligados pela biela à cambota, e através da combustão de uma mistura de ar-combustível fazem mover este conjunto, provocando assim um movimento de rotação da cambota que dá origem ao funcionamento do motor.

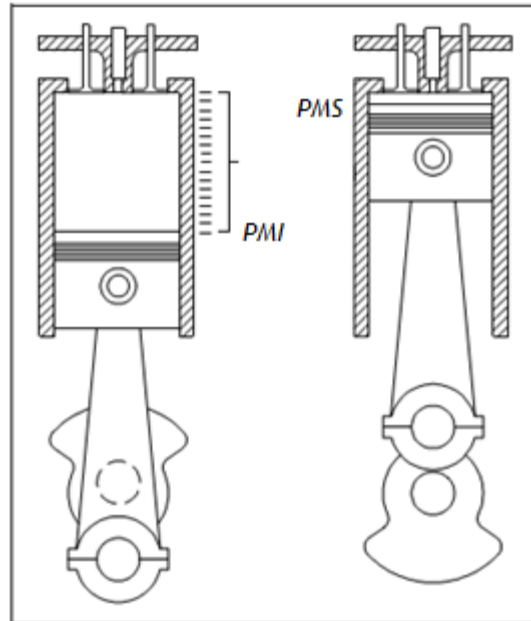


Figura 1- Sistema biela - manivela com o PMI e PMS [18].

Como é possível visualizar na figura 1 existem dois pontos neste ciclo. O ponto mais alto que o pistão poderá atingir dentro do cilindro, denomina-se de ponto morto superior (PMS). Já o ponto mais baixo denomina-se por ponto morto inferior (PMI). Através destes, é possível calcular a taxa de compressão a que o motor funciona.

Os motores de combustão interna podem ser classificados consoante os seus ciclos (ou tempos) em dois tempos e quatro tempos. No caso dos motores diesel, os mais comuns são os motores de quatro tempos. Na figura 2 são apresentados os ciclos de funcionamento de um motor a quatro tempos e é feita a descrição do processo que ocorre em cada ciclo.

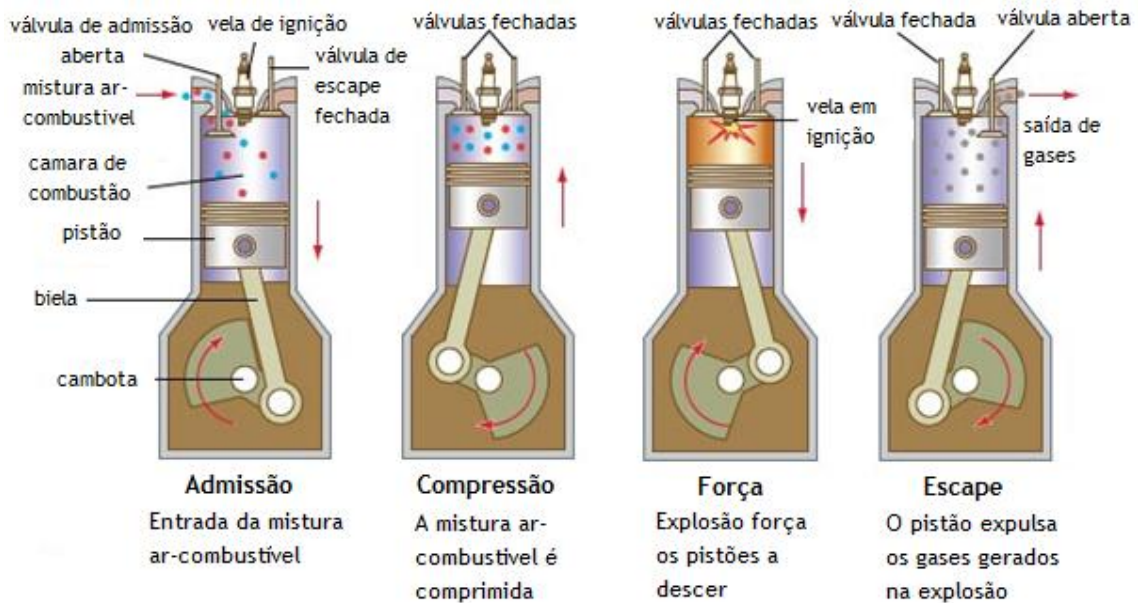


Figura 2 - Quatro fases características de um motor de quatro tempos de um motor a gasolina.¹ Adaptado de [22].

1ª Fase - Admissão: O pistão irá deslocar-se no sentido descendente do PMS até ao PMI com a válvula de admissão aberta, e este permite a admissão à entrada da mistura ar-combustível. Quando o pistão atingir o PMI a válvula de admissão irá fechar para que o cilindro fique fechado e se consiga exercer a 2ª Fase do ciclo.

2ª Fase - Compressão: Na fase de compressão o pistão exerce o movimento ascendente de PMI até PMS, com ambas as válvulas fechadas. O processo de compressão poderá parecer um ciclo desnecessário, mas é o responsável pelo aumento da eficácia do combustível, pois caso contrário a combustão produziria pouca potência mecânica e a energia do combustível escaparia sob a forma de calor.

3ª Fase - Explosão ou Força: Após a fase de compressão ocorre a explosão, momento em que o pistão desce de PMS para PMI através da expansão dos gases resultantes da combustão da mistura de ar-combustível dando então rotação à cambota. Nesta fase o motor pode funcionar (rodando a cambota) sozinho até à próxima combustão.

4ª Fase - Escape: Na última fase, a válvula de escape abre, e, com o movimento ascendente do pistão de PMI para PMS, os gases saem do cilindro, e quando o pistão está perto de atingir o PMS, a válvula volta a fechar, estando preparado para o início de um novo ciclo.

¹ Existe uma enorme semelhança entre o ciclo de quatro tempos de um motor a gasolina e de um diesel. A única diferença surge no acto de explosão em que o automóvel a gasolina precisa de uma vela como fonte de ignição e o diesel não.

3.2.2 Mercedes-Benz E 300 cdi blueTEC EFFICIENCY

O Mercedes-Benz E 300cdiblueTEC EFFICIENCY foi o modelo diesel seleccionado para o estudo realizado nesta dissertação. É considerado um modelo familiar de luxo e apresenta uma forte presença no mercado, com um forte nome e com exemplares antecessores que remetem ao ano de 1984. Apresenta as seguintes características:

Tabela 2 - Características do Mercedes-Benz E300 cdi blueTEC EFFICIENCY [7].

Mercedes-Benz E 300 cdi blueTEC EFFICIENCY		
Características	Motorização	Motor diesel de 6 cilindros
	Cilindrada	2987 cc
	Potência	231cv (170kW) - 540 Nm
	Peso	1760 kg
	Emissões	
		[g/km]
	CO ₂	153-159
	NO _x	0.147
	CO	0.303

Este automóvel encontra-se dentro dos parâmetros de poluição referidos em 3.2 classificando-se como respeitante da norma Euro 5.

3.3 O automóvel com motorização híbrida (HEV)

A definição de um veículo híbrido sugere que um automóvel é considerado híbrido quando possui duas ou mais fontes de energia ou potência distintas [23]. Os automóveis com motorização híbrida estão sempre associados a uma motorização de combustão interna (gasolina ou diesel). Podem apresentar duas versões: a de veículo híbrido (HEV) ou de híbrido “*plug-in*” (PHEV). A versão HEV é caracterizada pelo seu funcionamento do motor eléctrico, e em simultâneo de um motor de combustão interna, que permite uma redução do consumo de combustíveis algo significativa. Por outro lado, os PHEVs são uma evolução dos híbridos convencionais, pois conseguem colocar o automóvel em movimento recorrendo da mesma forma que o híbrido convencional, ou então exclusivamente através do motor eléctrico. Em modo exclusivamente eléctrico os híbridos “*plug-in*” utilizam a energia existente na bateria, a qual pode ser acumulada ligando um cabo à corrente eléctrica convencional das casas (algo que não se passa nos HEV), e, conseguem efectuar uma determinada distância que varia consoante a condução, o automóvel ou mesmo a inclinação da estrada, com semelhança a um automóvel eléctrico [24,25]. Em situações mais extremas, como uma necessidade de

utilização do pedal de acelerador com uma carga elevada, o motor de combustão é activado fornecendo maioritariamente a potência ao sistema de transmissão e, funcionando o motor eléctrico como um *boost* (um suplemento de potência). O motor de combustão interna é também activo quando a quantidade de energia na bateria atinge o limite mínimo conhecido como reserva a partir do qual o motor de combustão passa a funcionar frequentemente, de forma a garantir o normal funcionamento do automóvel. Existem ainda modelos que são considerados eléctricos, mas na verdade são veículos híbridos, pois usam um motor de combustão interna para recarregar a bateria que alimenta o automóvel, apesar de apenas ser utilizado exclusivamente o motor eléctrico para colocar o automóvel em movimento, como é o caso dos automóveis Opel Ampera e Chevrolet Volt [7,24].

3.3.1 Constituinte de um automóvel híbrido

Os automóveis híbridos apresentam muitas semelhanças com os automóveis convencionais, de combustão interna. Além da motorização de combustão interna, estes possuem dois constituintes que o destacam dos restantes:

- Motorização eléctrica;
- Baterias de armazenagem de energia.



Figura 3 - Montagens de um motor eléctrico com um motor de combustão interna. Adaptado de [7].

A figura 3 representa uma aplicação prática de um sistema de motorização híbrida. Neste caso é a forma como é montada esta motorização no Mercedes-Benz blueTEC E300 Hybrid. É possível observar o motor eléctrico situado entre a caixa de velocidades e o motor diesel,

mais concretamente na parte da embraiagem, que permite uma poupança de espaço considerável, não exigindo necessidade de modificar o design do automóvel [7].

Por outro lado, outra das características principais dos automóveis híbridos é o facto de poderem acumular energia, e em particular dos híbridos “*plug-in*” por poderem recarregar os seus sistemas de acumulação de energia através da rede de abastecimento público. O sistema mais comum de acumulação de energia são as baterias. Estas possuem a capacidade de armazenamento de energia a um relativo baixo custo, através de um electrólito presente nas mesmas e de diferentes materiais que constituem os pólos positivo e negativo que ao reagirem com o electrólito permitem armazenar a energia. Além disso, apresentam capacidade de resistir a variações de temperatura e dependendo do electrólito e dos materiais que constituem a bateria é possível obter diferentes capacidade de acumulação de energia [26,27].

3.3.1.1 Baterias

Existem diferentes tipos de baterias com diferentes materiais constituintes, e, com diferentes capacidades. Nos automóveis híbridos e *Plug-in* híbridos são possíveis de utilizar os seguintes tipos [26]:

- Chumbo-ácido (Lead-Acid);
- Níquel-Hidreto metálico (NiMH);
- Iões de Lítio (Li-ion);
- Níquel-Zinco (Ni-Zn);
- Níquel-Cádmio (Ni-Cd).

Através de um importante parâmetro é possível saber o nível de energia da bateria. O estado da carga ou *SoC- State of charge* é definido como o rácio entre a capacidade da bateria num dado momento e a sua carga completa. Assim, 100% é o nível máximo que a bateria poderá atingir, e, 0% será quando esta se encontra completamente descarregada. Este é definido por [27]:

$$SoC = \frac{\text{Carga actual disponivel}}{\text{Capacidade total da bateria} - \text{taxa de descarga}} \quad (1)$$

As baterias mais comuns de encontrar nos automóveis híbridos e nos *Plug-in híbridos* são as NiMH e as Li-ion, apresentando os seus valores em ampere-hora. Devido às suas

características e ao seu baixo risco de utilização apresentam-se como as principais a utilizar nestes automóveis.

As baterias NiMH apresentam um longo ciclo de vida, uma gama de temperatura de utilização elevada, e uma grande resistência à sobrecarga e descarga, que lhe permite uma melhor acumulação de energia e conseqüentemente garante uma maior autonomia aos veículos onde é aplicada. Todavia, apresenta uma grande desvantagem uma vez que se sofrer sucessivas descargas totais poderá encurtar a sua vida útil para apenas 200 a 300 ciclos de carga, sendo que apresenta um ponto óptimo de utilização dentre os 20 e os 50% de carga.

Por outro lado temos as baterias de íões de lítio que apresentam uma enorme vantagem relativamente às anteriores que é o facto de serem integralmente recicláveis. Além disso, possuem um baixo efeito memória que lhe permite ter uma longevidade maior e uma potência por quilograma superior. A grande desvantagem é que o seu custo é mais elevado em relação às de NiMH [26].

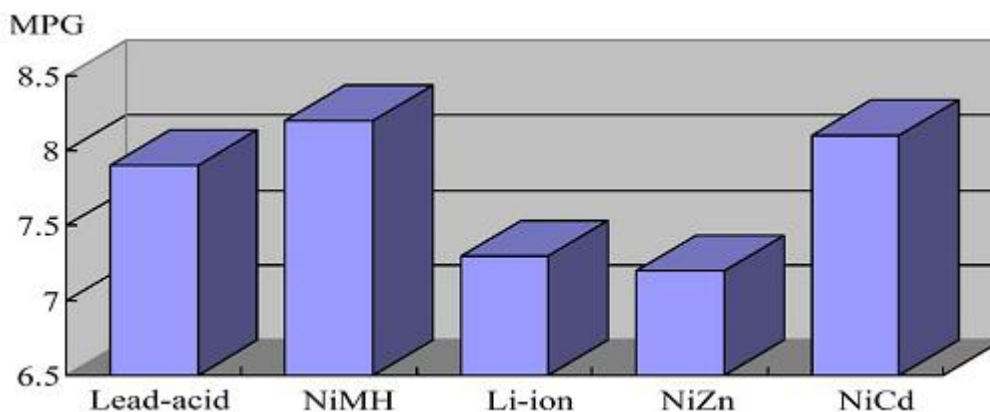


Figura 4- Comparação da autonomia dos diferentes tipos de baterias, na unidade milhas por galão [26].

3.3.1.2 Super-condensadores

Além das baterias existem ainda outras formas de acumular energia, os super-condensadores. Estes têm a capacidade de armazenar pequenas quantidades de energia em baixa tensão, dividindo as cargas e armazenando-as em duas placas paralelas que são separadas por um isolante. Isto permite a não existência de variações químicas nos eléctrodos, aumentando assim o ciclo de vida dos super-condensadores. Apresentam ainda uma densidade de potência mais elevada comparativamente às baterias pois as cargas estão fisicamente armazenadas nos eléctrodos e não no electrólito.

A utilização dos super-condensadores é apontada como uma ajuda à bateria em caso de existir uma elevada necessidade de potência por parte do sistema híbrido, como por exemplo

numa ultrapassagem, ou mesmo numa subida. Devido à sua rapidez de carga e descarga, são também utilizados em situações de menor exigência de energia, como o trânsito urbano onde existe uma condução frequente de “para-arranca”, permitindo ao sistema híbrido funcionar em modo eléctrico mais frequentemente. Esta característica é também possível devido à existência de avanços na tecnologia como a travagem regenerativa que permite a carga dos super-condensadores através da travagem do automóvel [26,28].

Devido às vantagens que têm sido verificadas através da utilização de super-condensadores existem neste momento investimentos nesta tecnologia. Assim, estão em desenvolvimento cinco tecnologias distintas para criar novo super condensadores, sendo elas [26]:

- Partículas de carbono num elemento ligador;
- Filmes de polímero condutor sobre um tecido de carbono;
- Revestimentos de óxidos de misturas de metais sobre uma folha metálica;
- Espuma de carbono;
- Compósitos metálicos de fibra de carbono.

A capacidade dos super-condensadores é geralmente apresentada em Coulombs ou em ampere - segundo, e podem ser mesurados através da seguinte relação matemática [27]:

$$Q = CV = \frac{A\varepsilon}{d}V \quad (2)$$

Assim, a capacidade de armazenamento de energia de um super-condensador é proporcional à área A das placas e a permissividade do dieléctrico ε é inversamente proporcional à distância d entre as placas [27].

3.3.2 Avanços tecnológicos nos automóveis híbridos

Como referido em 3.2.1.2 com o aparecimento dos automóveis híbridos (quer híbridos convencionais quer *plug-in* híbridos) apareceram também um crescente conjunto de tecnologias que visam incrementar a economia dos automóveis, e, conseqüentemente, uma diminuição da poluição por este emitida. As principais tecnologias são: sistema de travagem regenerativa, *boost* com motor eléctrico, e, o start&stop [7,29].

3.3.2.1 Sistema de travagem regenerativa

O sistema de travagem regenerativa, tal como referido em 3.2.1.2, foi uma das principais tecnologias pois permite recuperar parte da energia cinética dos automóveis quando são

accionados os travões. É possível armazenar essa energia de modo a ser utilizada pelo motor eléctrico.

Esta tecnologia é apenas usada por veículos híbridos e veículos eléctricos pois só estes possuem motores eléctricos onde é possível utilizar esta energia. Permite uma economia significativa de combustível, no caso dos automóveis híbridos, e, um aumento da autonomia nos automóveis eléctricos.

A travagem regenerativa tem um maior impacto em cidade do que em auto-estrada, pois é com a variação de velocidade e o constante uso do sistema de travagem do automóvel que permite a recarga dos acumuladores de energia, e isto é algo que não acontece vulgarmente em auto-estrada [30].

Normalmente estes veículos utilizam motores-geradores, ou seja, motores que permitem converter energia eléctrica em binário necessário à movimentação do veículo, ou o contrário, aproveitam a energia cinética para recarregar as baterias aproveitando a inércia criada nos motores, fornecendo energia eléctrica às baterias. Este tipo de travagem permite reduzir a velocidade do automóvel e gerar energia, permitindo aumentar a longevidade dos travões convencionais pois a sua utilização é reduzida. Por vezes a inércia gerada pelos motores-geradores poderá não ser suficiente para imobilizar o automóvel, e nessas situações serão accionados como auxílio os travões convencionais.

Na figura 5 é possível observar um possível caso de aceleração inteiramente eléctrica e um caso de travagem regenerativa [30].

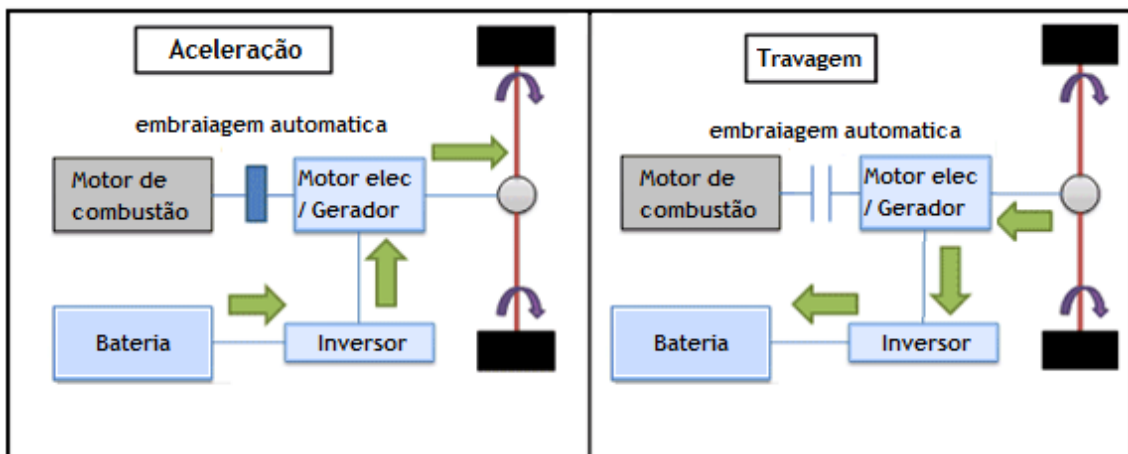


Figura 5 - Exemplo de travagem regenerativa e de auxílio dos motores eléctricos em aceleração em veículos híbridos. Adaptado de [30].

3.3.2.2 *Boost* do motor eléctrico

Outra tecnologia importante para a evolução dos automóveis, em particular dos híbridos, foi a assistência do motor eléctrico. Em situações muito particulares os motores eléctricos existentes nos veículos híbridos podem ter um papel fundamental no desempenho dos mesmos.

Já foi referida a importância destes durante a travagem, mas além disso, podem ter um papel muito importante em casos de aceleração, como é possível observar na Figura 5. Estes podem funcionar como um impulso extra ao motor de combustão, auxiliando em situações como acelerações repentinas ou em subidas, e, neste sentido podem contribuir para uma redução do consumo de combustível, utilizando a energia existente nas baterias [29].

Para além destas funcionalidades, o motor eléctrico permite que o veículo inicie a sua marcha usando exclusivamente o motor eléctrico, possibilitando deste modo uma redução de consumo por parte do motor de combustão interna.

3.3.2.3 Start&Stop

O sistema start&stop presente na maioria dos automóveis novos comercializados foi uma das tecnologias que permitiram uma redução substancial da energia desperdiçada quando o automóvel se encontra a trabalhar mas não em marcha. Este permite que o veículo após atingir um determinado conjunto de parâmetros seja desligado e apenas seja reactivado o motor de combustão interna quando for accionado o pedal de embraiagem.

A sua principal vantagem é permitir uma poupança significativa de combustível. Normalmente é utilizado em situações citadinas como semáforos e situações de *pára-arranca* [7,13,29].

3.3.3 Mercedes-Benz E 300 blueTEC HYBRID

O Mercedes-Benz E 300 blueTEC HYBRID foi o modelo híbrido seleccionado para o estudo realizado nesta dissertação. A par do modelo diesel referido em 3.2.2, além de manter as características de um automóvel de luxo, marca o início de uma nova geração no conceituado nome que representa. Na tabela 3 encontram-se descritas as suas características.

Tabela 3 - Características do Mercedes-Benz E300 blueTEC Hybrid [7].

Mercedes-Benz E 300 blueTEC Hybrid		
Características	Motorização	Motor diesel de 4 cilindros + Motor eléctrico
	Cilindrada	2143 cc
	Potência	Diesel: 204cv (150kW) + Eléctrico: 27cv (20kW) - 500Nm +250Nm
	Peso	1770 kg
	Emissões	[g/km]
	CO ₂	109-112
	NO _x	0.158
	CO	0.248

3.3.3.1 Características híbridas do E 300blueTEC HYBRID

O Mercedes-Benz E300 blueTEC Hybrid apresenta todos os avanços tecnológicos referidos em 3.3.2. Além disso, possui um sistema denominado *sailing*, que permite ao motor de combustão interna desligar-se em velocidades até 160 km/h, permitindo que seja usado apenas o motor eléctrico para manter a velocidade do automóvel. Quando a energia disponível na bateria se esgota, o automóvel volta a accionar o motor de combustão interna silenciosamente.

Outro ponto importante a referir é o facto de este utilizar inteiramente o motor eléctrico para fazer manobras, como por exemplo estacionar ou em pequenas manobras. Isto permite uma redução significativa do consumo de combustível.

Quando se encontra em desaceleração, por exemplo em aproximação a um semáforo, graças a uma gestão inteligente, o motor de combustão desliga-se ficando apenas o motor eléctrico activo, quer como motor quer como gerador. Pode efectuar um arranque totalmente eléctrico que poderá manter durante um quilómetro a uma média de 35 km/h [7].

A Mercedes-Benz em parceria com sua a equipa de fórmula 1 (*Mercedes AMG Petronas Formula One Team*) desenvolveu o sistema de navegação COMAND. Este sistema analisa a estrada e permite maximizar a *performance* do veículo e os seus consumos, através da gestão inteligente do motor eléctrico. Segundo os representantes da marca, os automóveis híbridos desperdiçam muita energia em descidas pois as baterias já estão cheias. Deste modo, através do sistema de navegação e da análise da estrada, o sistema prevê os sete quilómetros na frente do carro permitindo uma melhor gestão da energia [31].

Na figura 6 e 7 podem observar-se vários tipos distintos de funcionamento e como se comporta o veículo híbrido.

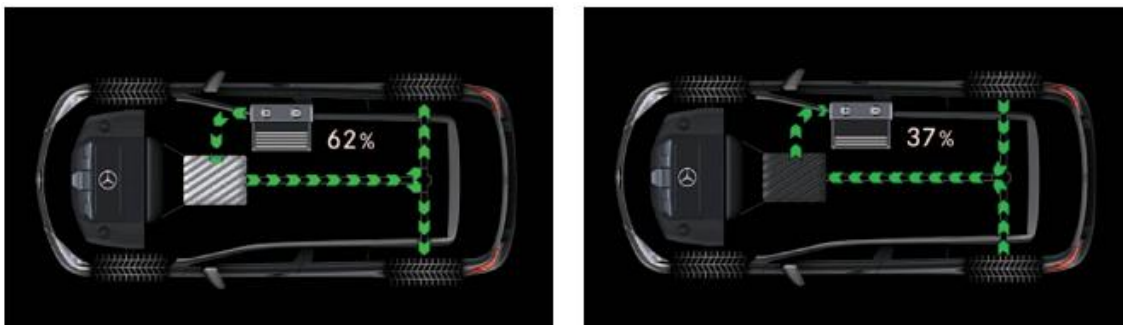


Figura 6 - Exemplo de funcionamento da alimentação exclusivamente eléctrica, e do sistema de travagem regenerativa [7].

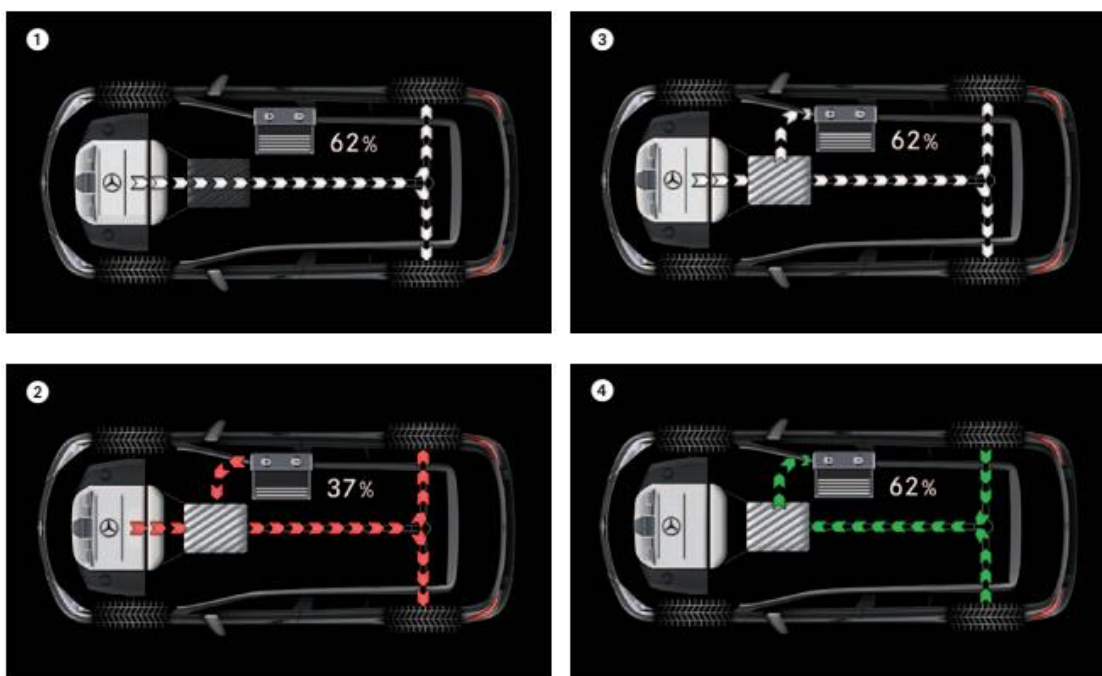


Figura 7 - Diferentes tipos de funcionamento do automóvel; 1- Funcionamento fora de cidade; 2- Aceleração; 3- Funcionamento da motorização de combustão interna após fase 2 para repor energia eléctrica; 4 - utilização da desaceleração e da travagem regenerativa [7].

4. Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Neste presente capítulo apresenta-se toda a envolvente da avaliação do ciclo de vida, a metodologia utilizada para o desenvolvimento de uma ACV e ainda alguns dos *softwares* existentes no mercado que permitiram diversificar e facilitar todo o processo de realização de uma ACV.

4.1 Aparecimento da metodologia de avaliação do ciclo de vida

Com o aparecimento das preocupações ambientais, nomeadamente da questão da elevada utilização de recursos naturais (matérias primas), nos anos 60 do século XX, houve necessidade de encontrar formas que permitissem avaliar o consumo de matérias-primas assim como o de energia, do qual resultou a Avaliação de Ciclo de vida (ACV).

O termo Avaliação do ciclo de vida apenas foi conhecido nos anos 90, pois desde 1970 e até aos anos 90 a designação para estes estudos era REPA “*Resource and Environmental Profile Analysis*”. A primeira utilização da metodologia REPA mais recentemente chamada de ACV foi nos EUA em 1969 para a Coca-Cola®, onde esta comparou os recipientes dos seus produtos (em termos de energia e materiais utilizados), verificando quais os que apresentavam um maior impacto no decorrer da sua vida (desde a extracção da matéria-prima até ao seu depósito). Esta estratégia da marca, levou à percepção do real impacto dos seus recipientes no meio ambiente, uma vez que estaria a mudar as suas embalagens de vidro por embalagens plásticas e de alumínio. Ao promover este estudo queria provar que as garrafas de plástico não seriam piores do ponto de vista ambiental comparativamente às de vidro, contrariando os estudos realizados anteriormente sobre os plásticos [32,33,34].

Anos mais tarde, já no final de 1972, o instituto “*Midwest Research Institute*” (MRI), o mesmo que realizou o estudo para a Coca-Cola®, iniciou um estudo nas embalagens de cervejas e refrigerantes, encomendado pela “U.S. Environmental Protection Agency” (USEPA), que marcou o início do desenvolvimento da ACV como se conhece hoje. A USEPA queria comprovar que a Coca-Cola® estaria certa, e, para isso, envolveu a REPA num ambicioso estudo que envolveu a indústria do vidro, aço, alumínio, papel e plástico, envolvendo o estudo de cerca de 40 materiais. Quando o estudo foi terminado, toda a gente reconheceu que as garrafas reutilizáveis seriam claramente superiores [34]. Após este reconhecimento a Coca-Cola®, promoveu um programa de recolha de latas de alumínio juntamente com entidades governamentais de recolha de resíduos, que lhe permitiu poupar 90% da energia utilizada no ciclo de vida de uma só lata [32].

Com este incentivo e com o crescente número de estudos levados a cabo entre os anos 1970 e 1975 (cerca de 15 REPAs), em que nem sempre houve uma concordância nos resultados obtidos, surgiu a necessidade de normalizar a metodologia. Essa normalização surge nos anos 90, altura em que houve uma crescente preocupação devido ao uso inadequado de análises ACV para fins de marketing e divulgação de alguns produtos. Realizaram-se então congressos e *workshops* com membros do “Society of Environmental Toxicology and Chemistry” (SETAC), de elevada experiência na temática da ACV, e que anos mais tarde incentivados pela “International Organization for Standardization” (ISO) começaram a trabalhar com o intuito de desenvolverem uma normalização da ACV [33,34].

A ISO criou, em 1992, um comité técnico, denominado TC207/SC 5, tendo em vista a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo ACV. Surgiu então a família de normas 14000 [34]:

- ISO 14040: 1997 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework;
- ISO 14041: 1998 Environmental management -- Life cycle assessment -- Goal and scope definition and inventory analysis;
- ISO 14042: 2000 Environmental management -- Lifecycle assessment -- Life cycle impact assessment;
- ISO 14043: 2000 Environmental management - Life cycle assessment -- Life cycle interpretation.

A norma EN ISO 14040, que é representada actualmente em Portugal pela NP EN ISO 14040:2008, define os princípios e a estrutura de uma ACV, e a norma NP EN ISO 14044:2010 diz respeito aos requisitos e linhas de orientação de uma ACV. Desde 2006 que estas duas normas substituíram as quatro normas que vigoravam até à altura: ISO 14040; ISO 14041; ISO 14042 e ISO 14043, formando assim duas normas mais condensadas e de maior facilidade de aplicação [35].

Segundo a norma NP EN ISO 14040:2008 uma ACV pode ser definida com uma técnica, ou método, que compila e avalia as entradas, saídas e os potenciais impactes ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (desde a extracção da matéria-prima, o seu processamento, uso e manutenção e a eliminação final via reciclagem, incineração ou outro processo) [4].



Figura 8 - Exemplo de um ciclo de análise de ciclo de vida [36].

Para realizar uma ACV devemos descrever um sistema e o seu desempenho. Este deverá ser descrito por subsistemas ligados entre si por fluxos de matérias ou de energia, sendo que cada um destes poderá ser considerado como um novo sistema em que deverá receber energia e materiais, e deverá emitir poluentes para o ar e para a água, bem como resíduos sólidos e outros resíduos ambientais, como descreve a figura 9. Além dos impactos da matéria-prima, também as descargas ambientais associadas com a produção, utilização, transporte e deposição dos materiais utilizados no sistema devem ser incluídos nos limites do sistema [34].

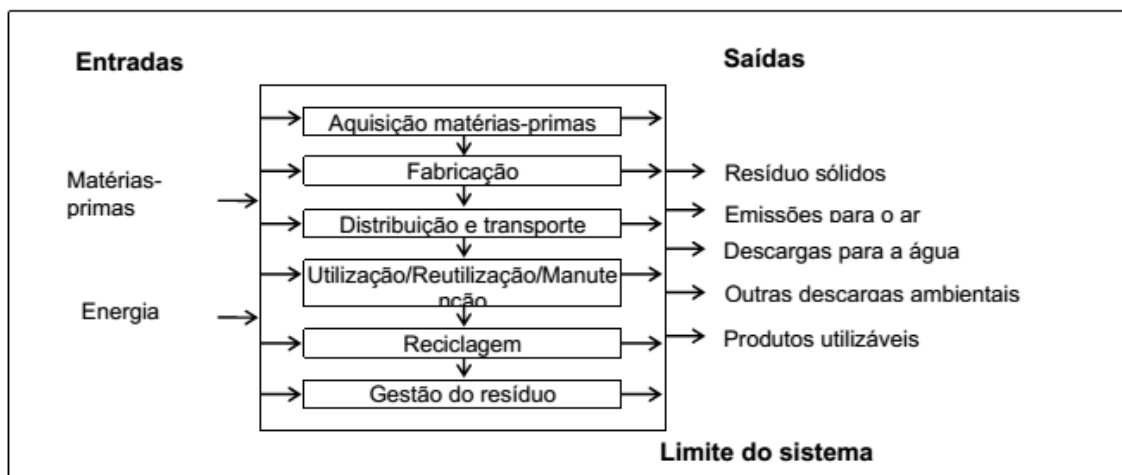


Figura 9 - Entradas e saídas em um sistema e subsistema de produto [34].

A adopção de um conceito de reflexão centrada no ciclo de vida por parte de uma empresa no processo de tomada de decisão constitui um primeiro passo para a sustentabilidade ambiental [37]. Na indústria, muitas empresas têm utilizado esta metodologia com diversos objectivos, por exemplo [38,39]:

- Desenvolver uma avaliação sistemática das consequências ambientais associadas a um dado produto;
- Analisar trocas ambientais associadas com um ou mais produtos (ou processos), de forma a obter aprovações para algumas acções planeadas por parte de entidades importantes, como o estado ou mesmo uma comunidade;
- Quantificar as emissões para o ar, água e terra em relação a cada estágio do ciclo de vida, ou em relação ao processo que mais contribui;
- Identificar as áreas de oportunidade para obter uma maior eficiência económica;
- Planear e desenvolver novos produtos.

Assim, a reflexão centrada no ciclo de vida constitui um importante passo na tomada de decisão por parte das empresas, possibilitando-lhes a consciência real dos obstáculos e oportunidades, importantes para desenvolver novos produtos e também para a sustentabilidade da empresa [37].

4.2 Metodologia para a realização de uma ACV

Para a realização de uma ACV deve recorrer-se à norma em vigor no país onde se pretende realizar a mesma. No caso de Portugal vigora a NP EN ISO 14040 de 2008, que fornece os princípios e a estrutura de uma ACV. Nesta, é exemplificado um modelo de um sistema de produto, em que as fases do ciclo de vida estão representadas por processos unitários, que são ligados por fluxos. Fluxos intermédios de produtos e de resíduos para tratamentos, fluxos elementares e fluxos de outros produtos formam o conjunto de processos unitários que dão origem ao sistema de produto. Desta forma, torna-se mais fácil identificar entradas e saídas do nosso sistema. Na figura 10 podemos observar o exemplo apresentado na norma NP EN ISO 14040:2008.

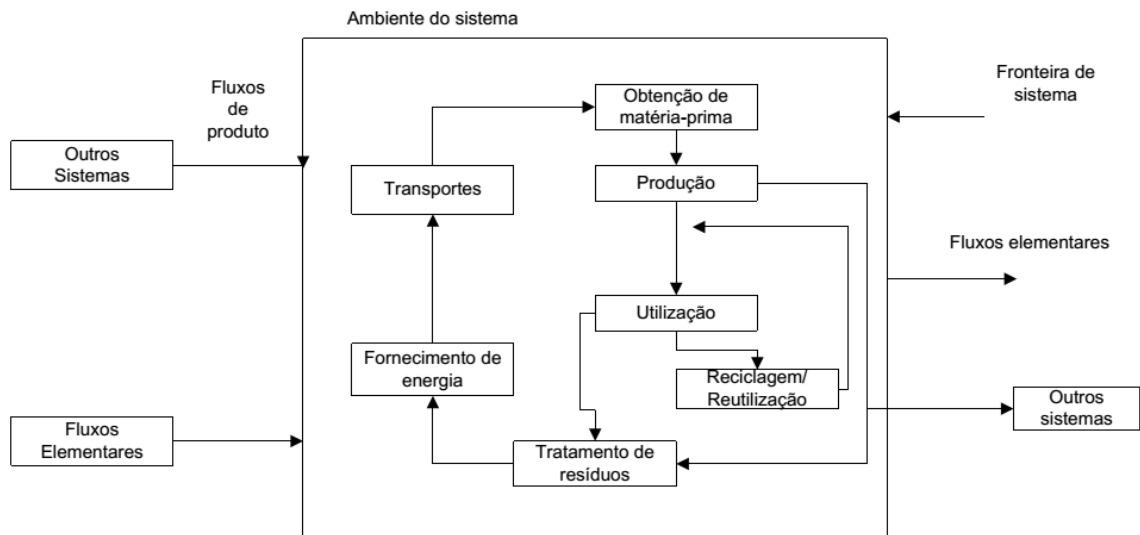


Figura 10 - Exemplo de um sistema de produto. Adaptado de [4].

Após definido o nosso sistema, podemos então realizar a nossa ACV. Segundo a norma NP EN ISO 14040:2008 deve ser realizada num sistema faseado por quatro fases:

- 1) Definição do Objectivo e Âmbito;
- 2) Inventário do Ciclo de Vida (ICV);
- 3) Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (AICV);
- 4) Interpretação.

Na figura 11 apresenta-se um esquema que define a troca de informação entre as diversas fases da ACV:

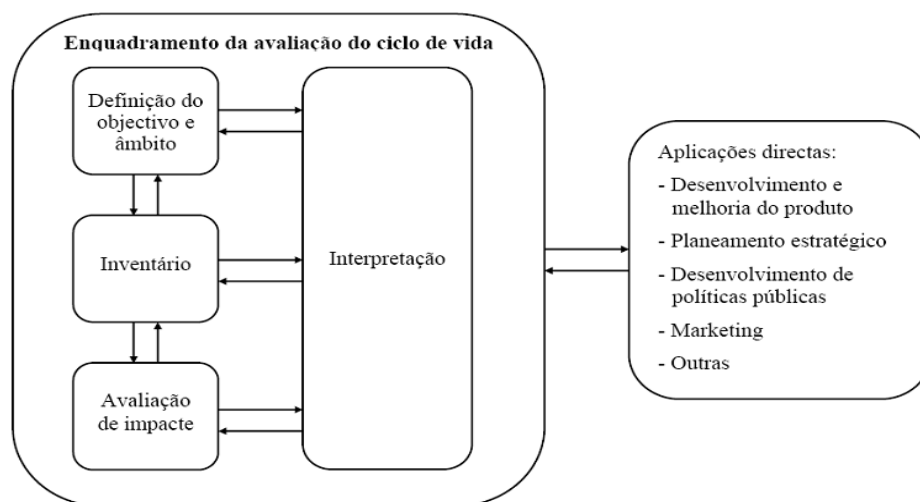


Figura 11 - Fases da Análise de Ciclo de Vida [4].

4.2.1 Definição do Objectivo e do Âmbito

A definição do objectivo e do âmbito consiste em definir quais os objectos de estudo, qual o público-alvo a que se destina o estudo a realizar, o seu âmbito, qual a função do sistema de produto, qual a unidade funcional, a fronteira do sistema, quais as categorias de impacte seleccionadas e metodologias de avaliação de impacte e qual a estratégia de recolha de dados. Quanto ao estudo da ACV deve especificar as funções do sistema em estudo, quer isto dizer, deverá especificar as características de desempenho.

O principal objectivo é fornecer uma referência que relacione os dados de entrada e saída, de maneira a assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV, que poderá ser alvo de crítica quando se avaliam sistemas diferentes.

A fronteira do sistema define todos os processos unitários que serão incluídos no sistema. Este sistema deverá ser modelado para que as entradas e as saídas sejam fluxos elementares na fronteira. Na definição da fronteira de sistema deverão ser consideradas várias etapas do seu ciclo de vida, bem como processos unitários e fluxos, como por exemplo [34,5]:

- Extracção de matérias-primas;
- Entradas e saídas na sequência principal de fabricação ou processamento;
- Transporte;
- Produção;
- Utilização, manutenção, e consumo de combustíveis;
- Destino final de resíduos do processo e de produtos.

A fase de definição do objectivo e do âmbito é considerada a fase mais importante de todo o processo de avaliação do ciclo de vida, pois é nesta que se define todos os objectivos do estudo e não podemos esquecer que estes são estudos longos, e, nos quais está envolvido um factor monetário de elevada importância. Assim todo o estudo deve ser desenvolvido no mais curto espaço de tempo possível e com definição de objectivos claros, para evitar desperdícios [39].

4.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O vasto número de processos que podem aparecer numa ACV proporciona a construção de uma base de dados dos processos mais utilizados. Existem muitos *softwares* (alguns deles referenciados mais à frente em 4.3) que possuem um levantamento destes processos, que variam com a localização (daí existirem uma vasta gama de entradas), e, que permitem o acelerar as ACV [3].

O IVC é a fase onde são recolhidos os dados e procedimentos de cálculo que permitem quantificar quais as entradas e saídas relevantes do sistema em estudo.

Para o inventário estar completo deve quantificar as matérias-primas, a energia consumida durante todo o processo, bem como as suas emissões ambientais associadas às diferentes etapas do ciclo de vida.

Assim o inventário deverá organizar-se da seguinte forma [34]:

- Primeiramente deve proceder-se à construção da árvore do processo pois esta é a melhor forma de representar as componentes de um sistema;
- De seguida procede-se à definição dos limites do sistema para determinar quais os processos que fazem parte do sistema em estudo e quais fazem parte do sistema ambiente;
- O terceiro passo é a recolha de dados, tanto qualitativos como quantitativos.
- Por fim, procedem-se aos cálculos.

É comum encontrar os materiais constituintes do(s) objecto(s) em estudo separados das fontes de energia nas entradas do processo, assim como nas saídas também é comum encontrarem-se por materiais, fontes de energia e radioactividade no caso de se aplicar [3].

4.2.3 Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida (AICV) é a fase, numa ACV, onde as entradas e saídas de fluxos elementares que foram recolhidos e relatados no inventário, são traduzidos em resultados dos indicadores de impacte para a saúde humana, o ambiente natural e esgotamento de recursos [40]. Por outras palavras, a AICV é definida como um processo quantitativo e/ou qualitativo que permite avaliar os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, matéria-prima, água e das descargas ambientais referidas na análise do inventário.

A AICV tem como objectivos [34]:

- Tornar os dados presentes no inventário mais relevantes através do conhecimento dos potenciais impactes ambientais,
- Facilitar a interpretação dos dados do inventário de forma a promover uma maior facilidade na tomada de decisão.

Os resultados de AICV devem ser vistos como potenciais indicadores de impacto ambiental relevante, ao invés de previsões sobre os efeitos ambientais reais [40].

Esta fase possui elementos obrigatórios e elementos opcionais como podemos verificar na Figura 12.

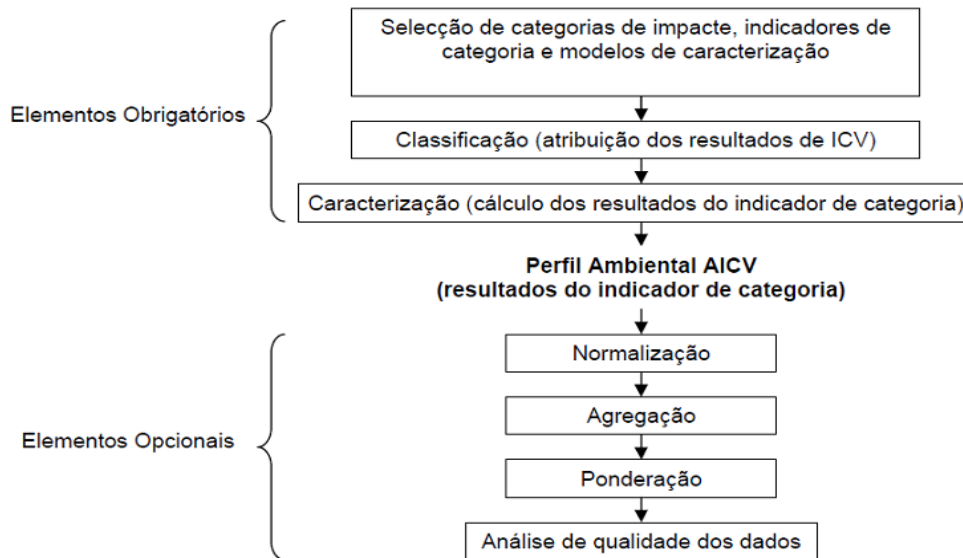


Figura 12 - Elementos da fase de ACIV [34].

A presença dos elementos obrigatórios permitem converter os resultados do inventário em resultados de indicadores para as diferentes classes de impacte. Já os opcionais ajudam a normalizar e a contabilizar o peso dos resultados [34].

Primeiramente deve ser feita a **selecção das categorias de impacte**. Esta selecção deverá ser executada durante a fase inicial de definição do objectivo e âmbito do trabalho, para orientar o processo de recolha de dados para o inventário.

A selecção das categorias de impacte deverá ter em conta [39]:

1. As categorias de impacto seleccionadas devem ser consistentes como objectivo e âmbito da ACV definidas anteriormente;
2. As categorias de impacto seleccionadas devem formar um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao objectivo e âmbito da ACV.

De seguida deve ser feita a **classificação**. Depois de escolhidas quais as categorias de impacte aplicáveis ao estudo é na fase de **classificação** que os elementos ou substâncias identificados na fase de inventário como constituintes do ciclo de vida do produto, são agora agrupados em diferentes categorias de acordo com o seu impacte ambiental, de forma a gerar uma pontuação de efeito.

Existem elementos do ICV que poderão contribuir para uma ou mais categorias de impacte. Quando contribuem para uma só categoria, a aplicação deste é directa. Quando contribuem para duas ou mais categorias de impacte diferentes, a regra estabelecida para classificação é [34]:

- Mecanismo paralelo (os efeitos são dependentes uns dos outros) - afectar uma porção representativa dos resultados de ICV às categorias de impacte para as quais eles contribuem;
- Mecanismo série (os efeitos são independentes uns dos outros) - afectar todos os resultados de ICV a todas as categorias de impacte para as quais eles contribuem.

A última fase obrigatória é a **caracterização** que é também conhecida como o cálculo dos resultados do indicador de categoria. Nesta são utilizados factores de caracterização para calcular os valores do indicador, e assim colocá-los na respectiva categoria de impacte. Os valores obtidos no final da fase de caracterização podem ser referidos como o *perfil ambiental*, que é constituído por um número de medidas de impacte ou descrições [34].

Estas são as três fases obrigatórias durante a análise do inventário de ciclo de vida. Existem ainda fases opcionais que ajudam à melhor interpretação da ACV, sendo elas a **Normalização**, a **Agregação** e a **Ponderação**.

A fase de **normalização** tem como objectivo compreender a grandeza de cada resultado do indicador do sistema de produto de estudo. A normalização de resultados implica calcular a magnitude relativa de uma certa informação de referência, que poderá ser útil para [5,34]:

- Analisar inconsistências;
- Comunicar informação numa significância relativa do resultado dos indicadores;
- Preparar para procedimentos adicionais, tais como, agrupamento, ponderação ou interpretação do ciclo de vida (seguintes fases opcionais).

Na figura 13 é possível visualizar os factores de normalização que permitem aproximar os resultados aos médios na Europa ou no Mundo. Estes factores são obtidos através de interpolações de resultados cedidos pelos registos poluentes dos diversos países, ou seja, dos registos PRTRs (*Pollutant Release and Transfer Registers*) dos Estados Unidos da América, Canadá, Japão e Austrália, e na Europa da *European emission databases EMEP* [41].

Comparação de dois automóveis com diferentes tipos de motorização

Impact category	Unit	EU ₂₅₊₃	World	EU ₂₅₊₃ (% of world)
Climate change				
TH=20 years	kg CO ₂ -eq.	6.57E+12	5.76E+13	11
TH=100 years	kg CO ₂ -eq.	5.21E+12	4.18E+13	12
TH=500 years	kg CO ₂ -eq.	4.49E+12	3.36E+13	13
Ozone depletion	kg CFC-11-eq.	6.79E+06	2.10E+08	3
Acidification				
TH=20 years	kg SO ₂ -eq.	2.23E+10	3.01E+11	7
TH=100 years	kg SO ₂ -eq.	2.36E+10	3.18E+11	7
TH=100 years	kg SO ₂ -eq.	2.49E+10	3.36E+11	7
TH=500 years	kg SO ₂ -eq.	2.84E+10	3.78E+11	8
Fresh water eutrophication	kg P-eq. (to fresh water)	3.47E+08	3.77E+09	9
Marine eutrophication	kg N-eq. (to fresh water)	5.89E+09	5.71E+10	10
Respiratory effects				
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC-eq.	2.80E+10	3.51E+11	8
Particulate matter formation	kg PM ₁₀ -eq.	8.12E+09	9.92E+10	8
Human toxicity				
TH=100 years	kg 1,4-DCB eq. (to urban air)	1.24E+11	1.20E+12	10
TH=infinite	kg 1,4-DCB eq. (to urban air)	2.27E+12	8.86E+12	26
Fresh water ecotoxicity				
TH=100 years	kg 1,4-DCB eq. (to fresh water)	5.83E+09	2.94E+10	20
TH=infinite	kg 1,4-DCB eq. (to fresh water)	6.03E+09	3.07E+10	20
Marine ecotoxicity				
TH=100 years	kg 1,4-DCB eq. (to seawater)	8.98E+09	2.85E+10	32
TH=infinite	kg 1,4-DCB eq. (to seawater)	1.78E+12	6.24E+12	29
Terrestrial ecotoxicity				
TH=100 years	kg 1,4-DCB eq. (to industrial soil)	4.07E+09	3.72E+10	11
TH=infinite	kg 1,4-DCB eq. (to industrial soil)	6.37E+09	5.09E+10	13
Ionising radiation	kBq U-235 eq.(to air)	2.90E+12	7.97E+12	36
Agricultural land occupation	m ² × year	2.10E+12	3.30E+13	6
Urban land occupation	m ² × year	1.89E+11	4.71E+12	4
Fossil energy resource depletion	kg Sb eq.	7.23E+11	7.78E+12	9

Figura 13 - Factores de normalização divididos em categoria de impacte, unidade e localização [41].

Outra das fases opcionais é a **agregação**. Tem como objectivo compreender e atribuir categorias de impacte numa ou mais séries, e, também, ordenar as mesmas numa hierarquia, por exemplo consoante a sua prioridade [5]. É importante referir que está envolvida a separação das categorias de impacte consoante as suas características, nomeadamente, as emissões e recursos, por escala espacial global, local ou regional.

Os procedimentos de agregação possíveis são [34]:

- Separar as categorias de impacte numa base nominal por exemplo pelas características como, emissões e recursos ou por escalas espacial global, regional e local;
- Ordenar as categorias de impacte numa dada hierarquia (prioridade alta, média e baixa).

Podemos ainda referir a **ponderação**, que é o processo que converte todos os resultados obtidos em diferentes categorias de impacte utilizando factores numéricos baseados em escolhas de valor [5]. São atribuídos pesos (normalmente no formato de valores) relativos às diferentes categorias de impacte baseado na sua importância ou relevância. Para isto existem dois procedimentos possíveis [34,40]:

- Converter os resultados do indicador ou resultados normalizados, caso tenham sido normalizados, em factores de peso;
- Agregar estes resultados de indicador convertidos ou resultados normalizados, se possível, às categorias de impacte.

O valor proveniente da agregação dos resultados dos indicadores pesados representa a *performance ambiental* do sistema de produto em estudo [34].

Por último, poderá haver necessidade de **avaliar a qualidade dos dados**, que construí o ultimo elemento opcional. A ferramenta de análise da qualidade dos dados poderá ser aplicada a vários níveis do processo da análise ACV, designadamente, aos resultados do ICV, resultados do indicador, resultados normalizados e resultados ponderados. Esta avaliação passa por efectuar três análises [34]:

- **Análise de gravidade** - é um procedimento estatístico que identifica os processos unitários que mais contribuem para o resultado do indicador;
- **Análise de incerteza** - mostra como a incerteza nos dados de ICV e/ou factores de caracterização se propagam nos resultados do indicador;
- **Análise de sensibilidade** - é utilizada para medir as alterações nos resultados do indicador quando são introduzidas alterações nos resultados de ICV, ou nos factores de caracterização, de normalização e de ponderação.

4.2.4 Interpretação do Ciclo de Vida

A fase de interpretação constitui a última fase da metodologia ACV. Aqui existe uma interacção entre as fases anteriores e esta fase final, tal como é possível observar na figura 14. Os resultados do inventário e a avaliação dos impactes ambientais são combinados, e através desta combinação obtemos resultados consistentes com o objectivo e âmbito definidos, e assim conseguiremos tirar conclusões, explicar limitações ou fazer algumas recomendações. Neste sentido esta etapa é fundamental para a descrição clara e coerente dos resultados da ACV permitindo responder a questões que possam surgir durante o trabalho como: “Qual a confiança dos resultados deste estudo ACV?”, “O que significam estas diferenças?”, “Estão os resultados de acordo com o objectivo e âmbito do estudo?”, permitindo assim aumentar o nível de confiança no trabalho realizado [34].

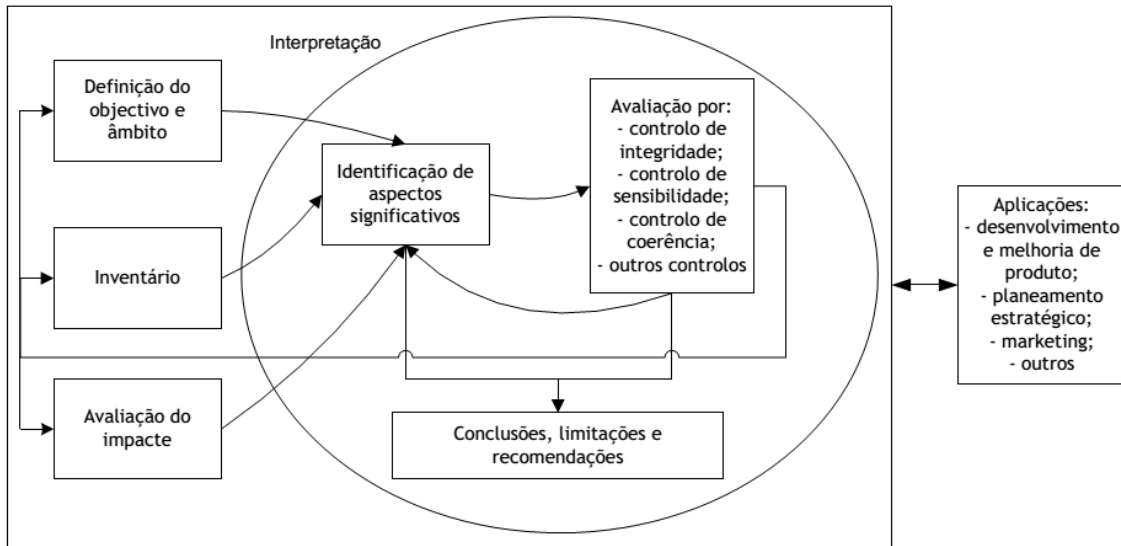


Figura 14 - Relações entre os elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV. Adaptado de [4].

Através da observação do diagrama da figura 14 conseguimos observar a interacção das três fases com a interpretação. Após esta fase final da ACV, esta poderá ser direccionada para actuar nas várias áreas que envolvem o estudo. A título de exemplo a ACV poderá ser utilizada para o desenvolvimento e melhoria de um produto, onde através da análise cuidadosa da ACV, se conseguem descobrir quais os pontos onde é possível minimizar perdas, ou identificar pontos para tornar o produto mais competitivo.

Recorrendo a esta metodologia é também possível traçar o plano estratégico de uma empresa, quais as políticas públicas que esta terá que desenvolver para aproximar o público num futuro próximo bem como campanhas de marketing para a promover. Em suma uma análise de ciclo de vida poderá marcar a diferença entre duas empresas do mesmo segmento podendo através desta análise alcançar alguma vantagem competitiva significativa.


4.3 Levantamento de ferramentas de ACV

Com o aparecimento de cada vez mais empresas a realizar estudos de ACV, e com a extensão de horizonte temporal que estes podem necessitar (devido a grande quantidade de dados que são necessários), têm aparecido no mercado empresas que desenvolvem ferramentas (*softwares*) que facilitam a gestão operacional dos estudos. Além do tempo poupado, a utilização destas ferramentas, permite uma maior fiabilidade dos cálculos e das restantes conclusões.

São apresentados de seguida, na tabela 4, alguns exemplos de ferramentas que permitem a realização de ACV.

Tabela 4- Descrição de algumas ferramentas de apoio à ACV.

Software	Empresa	Descrição
	Software desenvolvido pela empresa Pré-Consultants[42]	Permite analisar e monitorizar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços; Segue os critérios da norma ISO 14040; Possibilita a análise de todas as fases do ciclo de vida de um dado material.
	Software desenvolvido pela PE-INTERNATIONAL [43]	É uma ferramenta generalista, que neste momento pode trabalhar com a sua própria base de dados que possui cerca de 7000 processos, ou também com bases de dados como a da ecoinvent. Possui também uma vasta gama de tutoriais para ajudar os seus clientes
	Software desenvolvido pela Greendelta [44]	Este é um software gratuito que disponibiliza compatibilidade com a base de dados da ecoinvent, bem como oferece três bases de dados gratuitas.
	Software desenvolvido pela Greendelta [45]	De fácil utilização e mais virado para o design sustentável, permite aos seus utilizadores sem grande experiência um bom primeiro contacto com o LCA. Opera através da internet não consumindo requisitos ao computador do utilizador.
	Desnvolvido pela ifu Hamburg GmbH [46]	Possui uma grande variedade de pacotes de compra, onde no pacote máximo inclui as bases de dados da <i>gabi-software</i> , bem como as bases de dados da ecoinvent. Destaca-se ainda a interface gráfica que permite a obtenção de árvores de produto de fácil visualização.
	Software desenvolvido pela empresa Quantis [47]	Permite uma primeira ligação com a “pegada de carbono”, com fácil utilização; Destaca-se pelo foco no GEE, nos multi-indicadores e nas emissões para água.
	Software desenvolvido pela empresa Pré-Consultants [48]	Este software possui alguns dados relativos aos impactos ambientais e da pegada de carbono, de materiais comumente utilizados,

		tais como metais, plásticos, papel, cartão e vidro, bem como processos de tratamento de produção, transporte, energia e resíduos.
	Software desenvolvido pela GreenDelta [49]	Apresenta como principais características, o cálculo do berço ao túmulo, análise de impactos, demonstração interactiva de pontos com maior contribuição para a ACV dentro de cadeias de abastecimento e ainda a rápida construção de árvores de ACV.

Como é possível constatar, existe uma enorme variedade de softwares de auxílio ao estudo da ACV. O software que possui uma maior utilização e aceitação pelos especialistas em ACV é o *Simapro*, pois devido às constantes actualizações consegue transmitir uma elevada taxa de precisão nos seus resultados. Existem programas generalistas que permitem o uso destas ferramentas em qualquer área, bem como alguns mais específicos para certos sectores, como é o caso do *e-dea* que apresenta um desenvolvimento mais focado no design sustentável.

Após testar algumas das soluções acima indicadas durante o período de testes, optou-se por realizar o estudo da presente dissertação com o *software OpenLCA* da empresa *GreenDelta*, por este ser um software gratuito e a universidade não possuir nenhum software para o efeito. Este software tem uma interface moderna, com um crescente aumento do número de utilizadores pelo facto de ser gratuito, de alteração permitida e também por permitir avaliar e monitorizar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços de forma organizada seguindo os critérios da norma ISO 14040 [43].

A avaliação de impactes ambientais pode ser conduzida através de vários métodos de avaliação, resultando de cada um, diferentes conjuntos de indicadores de impacte. Os métodos fornecidos pelo *OpenLCA*, são de estrutura básica, ou seja, incluem a caracterização e a normalização, sendo que este último nem sempre é utilizado por todos os métodos de avaliação de impacte, pois é de carácter opcional.

Consoante a área demográfica existem preferências na utilização dos métodos de avaliação de impacte, sendo que na Europa se destacam pela preferência os métodos CML 2 baseline 2000 (base do método CML 2001), CML 2001 (inclui todas as categorias de impacte), Eco-Indicator 99, Ecological Scarcity 2006, EDIP 2003, EPD (2008), EPS 2000, Impact 2002+, ReCiPe Endpoint e o ReCiPe Midpoint [50].

4.4 Métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Existe uma variada gama de métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida, que são requeridos pelas diferentes bases de dados. O *software OpenLCA* possui uma lista de métodos própria que é compatível com todos os processos disponíveis, em qualquer das bases de dados disponíveis para trabalhar com o programa. Além disso possui também compatibilidade com os métodos da *ecoinvent*, e autorização para utilização dos mesmos gratuitamente [44].

4.5 Base de dados

Para a realização da ACV através de um software, este deve ter associada uma base de dados quer esta seja interna ao programa quer seja externa.

As bases de dados contêm toda a informação necessária à realização da ACV, permitindo assim a redução de tempo do estudo.

Para a presente dissertação foram incluídas as bases de dados gratuitas disponíveis com o *OpenLCA*, a ELCD (European reference Life Cycle Database), *bioenergydat*, *needs*, e, também alguns processos de bases de dados da CPM database.

5. Aplicação da avaliação de ciclo de vida

Neste quinto capítulo apresenta-se a ACV aplicada aos dois automóveis em estudo. A estrutura da presente análise baseou-se nas quatro etapas definidas na norma NP EN ISO 14040:2008, e que foram previamente descritas no capítulo 4. Estas fases serão:

- Definição do objectivo e âmbito;
- Inventário do ciclo de vida;
- Avaliação do impacte de ciclo de vida;
- Interpretação dos resultados.

5.1 Definição do objectivo e âmbito do estudo

A definição do objectivo e âmbito do estudo está dividida em várias partes. Esta deverá indicar quais os objectos em estudo, os objectivos do estudo, qual a população alvo, a unidade funcional considerada e ainda as fronteiras do sistema.

Definição dos objectos em estudo: Na presente dissertação realizou-se um estudo comparativo do desempenho ambiental de dois automóveis líderes de segmento de mercado e de vendas no mercado português em 2013 [51]. Um dos automóveis apresenta uma motorização a diesel, e, o outro apresenta um sistema híbrido, ou seja, apresenta uma motorização diesel e também motorização eléctrica. Estes dois veículos são semelhantes em termos de características, oferecendo a mesma carroçaria, e, variando apenas a nível do sistema de motorização, onde ambos possuem a mesma potência final.

Objectivo da avaliação: O principal objectivo da avaliação de dois automóveis é, através de dois tipos de automóveis semelhantes mas com diferentes sistemas de motorização, conseguir encontrar qual dos dois automóveis possui um melhor desempenho ambiental ao longo do seu ciclo de vida. Pretende-se também contribuir com informação que possibilite perceber se estas novas soluções de motorização contribuem para a sustentabilidade do planeta.

População-alvo: A população alvo da presente dissertação foi considerada a descrita no segundo capítulo da presente dissertação, em 2.2.

Unidade funcional: Para o presente estudo, foi definida como unidade funcional a unidade de um automóvel tendo o mesmo nível de potência de motor. Foram então seleccionados dois automóveis com diferentes sistemas de motorização, mas obtendo a mesma potência final, ou

seja, neste caso foram seleccionados: um automóvel como motorização diesel com uma potência de 170kW e um automóvel com motorização diesel mas com auxílio de um motor eléctrico com 150kW e 20kW, respectivamente, perfazendo um total de 170kW. Assim, a unidade funcional será “ Um automóvel com uma potência de 170kW (231cv) ”.

Fronteiras do sistema: Primeiramente é necessário definir as fronteiras de processo, ou seja, as fases do ciclo de vida onde o nosso estudo se enquadra. Deste modo, para o presente estudo, foram consideradas três fases do ciclo de vida:

- 1- Processo de produção;
- 2- Processo de produção de combustível;
- 3- Utilização do automóvel.

Fronteira temporal e geográfica: De seguida teremos que definir as fronteiras, geográfica e temporal. Como fronteira geográfica este estudo teve o mundo devido à proveniência de matéria-prima fora da Europa. Quanto à fronteira temporal, esta é mais complicada de definir, visto que os processos das bases de dados utilizadas têm início de recolha em 1992, e têm sofrido alterações constantes até 2013.

5.1.1 Método de avaliação de impacte ambiental

O método de avaliação do impacte ambiental seleccionado para a ACV dos dois automóveis foi um dos métodos preferenciais na Europa, o CML2001, conforme especificado em 2.5. Este abrange várias categorias de impacte que se encontram representadas na tabela 5:

Tabela 5 - Categorias de impacte ambiental e unidades utilizadas na sua quantificação [41].

Categorias de impacte ambiental - Factor de impacte	Sigla	Unidade
Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos	ADP	MJ
Potencial de aquecimento global	GWP	kg CO ₂ eq.
Potencial de formação de ozono troposférico	POCP	kg C ₂ H ₄ eq.
Potencial de acidificação	AP	kg SO ₂ eq.
Potencial de eutrofização	EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.
Potencial de destruição da camada de ozono	ODP	kg CFC-11 eq.
Potencial de Eco-toxicidade humana	HTP	kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq.
Potencial de Eco-toxicidade de água doce	FAETP	kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq.
Potencial de Eco-toxicidade Marinha	MAETP	kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq.
Potencial de Eco-toxicidade Terrestre	TETP	kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq.

Para melhor entender o significado de cada categoria de impacto ambiental faz-se, de seguida, uma breve descrição bem como a sua relação matemática para entender a complexidade do processo de obtenção destes factores de caracterização ou factores de impacto, e, constatar a importância do aparecimento dos *softwares* de ACV neste tipo de estudos.

Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP)

O principal objectivo da ADP é avaliar o problema ambiental que tem vindo a aparecer com a disponibilidade decrescente de recursos naturais, ou seja, dos minerais, materiais encontrados na terra, atmosfera ou mar, bem como os combustíveis fósseis.

A ADP está também relacionada com a protecção e preservação dos ecossistemas e ainda com a protecção da saúde dos seres humanos. O seu cálculo está relacionado com a quantidade de cada material, mineral ou combustível, extraídos da natureza, e, é influenciado pelas reservas disponíveis e a taxa de decréscimo das mesmas. De referir, que este indicador tem repercussões à escala mundial [9].

A relação matemática que permite calcular este factor de impacto é [34,39]:

$$S_j = \sum_i \frac{P_i}{P_{ref}} \cdot \left[\frac{R_{ref}}{R_i} \right]^4 \cdot m_i \quad (3)$$

Onde:

S_j - representa o resultado do impacto na categoria de impacto j ;

m_i - massa do recurso;

R_i - reserva de recurso abiótico medido na mesma unidade de m_i ;

R_{ref} - reserva de recurso abiótico de referência (normalmente o antimónio);

P_i - produção líquida do recurso (diferença entre a extracção e a regeneração);

P_{ref} - extracção anual global do recurso abiótico de referência (normalmente o antimónio);

Para obter o resultado da depleção abiótica expresso em kg de um recurso de referência através do seu factor de impacto é necessária a realização da seguinte operação matemática:

$$depleção\ abiótica = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (4)$$

Onde:

ADP_i - potencial de depleção abiótica de um recurso i ;

m_i - quantidade do recurso i extraído em kg.

No caso de ser um recurso abiótico de carácter energético, como é o caso dos combustíveis fósseis, é normalmente encontrado em unidades energéticas usando o poder calorífico de cada um dos combustíveis [52].

Potencial de aquecimento global (GWP)

O GWP de uma substância é a relação entre a contribuição para a absorção de radiação resultante da descarga instantânea de um quilograma de um gás com efeito de estufa. Destes, destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄), e a sua correspondente emissão de dióxido de carbono (CO₂) integrada ao longo do tempo.

Tem como base as emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera, expressando-se por potencial de aquecimento global num horizonte de tempo geralmente de longo efeito, ou seja, de 100 anos (GWP100). O âmbito geográfico deste indicador é considerado a escala global [34,53].

O potencial de aquecimento global pode ser calculado através da relação matemática em CO₂ equivalente por [34,39]:

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad (5)$$

Onde:

GWP_i- representa o potencial de aquecimento global da substância i expresso em equivalentes CO₂;

T - representa o horizonte de tempo (20, 100, 500 anos);

a_i- efeito de uma unidade de massa de substância i;

c_i(t) - a concentração da substância i no tempo t;

a_{CO₂} e c_{CO₂}- são parâmetros correspondentes para a substância de referência (CO₂).

Sabendo o factor de impacte é possível calcular o aquecimento global que é expresso em kg de CO₂ equivalentes através de:

$$Aquecimento\ global = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (6)$$

Onde:

m_i - representa a massa em (kg) da substância emitida.

Potencial de formação de ozono troposférico (POPC)

A POPC corresponde à formação de substâncias reactivas (principalmente ozono) que são prejudiciais para a saúde (sendo responsáveis por alguns problemas de saúde e mortes prematuras), aos ecossistemas (produtividade de culturas agrícolas, alterações na biodiversidade) e económicas pois ao baixar a produtividade agrícola causa impactos económicos.

Actualmente, considera-se o ozono troposférico o poluente mais grave da Europa. Esta formação é indicada como a responsável pelo aparecimento do “*smog de verão*”. As substâncias que mais contribuem para a formação de ozono troposférico são os óxidos de azoto (NO_x), os compostos orgânicos voláteis não metanosos (NMVOC), o monóxido de carbono (CO) e o metano (CH₄).

A POPC para emissão de substâncias para a atmosfera é calculada com o modelo UNECE, e expressa-se em kg de C₂H₄/kg de emissões. O âmbito temporal do estudo normalmente é de cinco dias e a escala geográfica varia entre a escala local e continental [9,53]. Este factor de impacte pode ser calculado através da seguinte fórmula [34,39]:

$$POPC_i = \frac{\frac{a_i}{b_i}}{\frac{a_{C_2H_4}}{b_{C_2H_4}}} \quad (7)$$

Onde:

a_i- representa a alteração na concentração de ozono devida a uma alteração na emissão do Composto orgânico volátil (COV) *i*;

b_i- emissão integrada do COV *i* até aquele tempo;

a_{C₂H₄} e b_{C₂H₄}- parâmetros para a substância de referência (o etileno - C₂H₄).

Conhecendo o factor de impacte podemos calcular a formação do oxidante:

$$Formação\ de\ oxidante = \sum_i POPC_i \times m_i \quad (8)$$

Onde:

m_i - representa a massa em (kg) da substância emitida.

Potencial de acidificação (AP)

As substâncias acidificantes causam uma ampla gama de impactos em diversas áreas, nomeadamente, nos solos, nas águas, nos organismos, nos ecossistemas e em diversos bens, quer móveis, quer imóveis (automóveis, edifícios, entre outros). O potencial de acidificação é

calculado segundo o modelo *RAINS 10*, que descreve a reacção que as substâncias causadoras da acidificação como o dióxido de enxofre (SO₂), o dióxido de nitrogénio (NO₂) e o amoníaco (NH₃) fazem com o vapor de água, descrevendo assim as chamadas chuvas ácidas.

Geralmente aparece expresso em kg SO₂ eq./kg de emissões. Quanto ao intervalo temporal é a eternidade e a escala geográfica varia entre a escala local e a escala continental [9,53,54].

O potencial de acidificação através do modelo *RAINS 10* pode ser calculado através da fórmula [34,39]:

$$AP_{x,r} = \frac{\sum_{e \in Europa} A_{e \in j} \times \frac{t_{r,x,j}}{CL_{e \in j}}}{\sum_{e \in Europa} A_{e \in j} \times \frac{t_{r,ref,j}}{CL_{e \in j}}} \quad (9)$$

Onde:

AP_{x,r}- potencial de acidificação regional da substância x na região r;

A_{e ∈ j}- ecossistema ena célula de grelha j;

CL_{e ∈ j}- carga crítica para ecossistema ena célula de grelha j;

t_{r,x,j}- factor transporte - fracção de E_{r,x} depositada em j;

E_{r,x}- emissão da substância x na região r.

Este modelo de cálculo do factor é um dos quatro possíveis. Para lidar com as diferenças locais à acidificação o modelo CML2001 decidiu que os modelos devem incluir sensibilidade regional e destino, e com este sentido foi considerado este modelo.

As substâncias acidificantes podem ser agregadas através do factor de impacte AP aplicando a equação:

$$Acidificação = \sum_i AP_i \times m_i \quad (10)$$

Onde,

AP_i- representa o potencial de acidificação da substância i;

m_i- massa da substância i em kg.

Potencial de eutrofização (EP)

A eutrofização (também conhecida como nutrificação) inclui todos os impactes devido ao excesso de macronutrientes no ambiente, provocados pelas emissões de nutrientes para a água, ar e solo.

O EP é baseado no procedimento de estequiometria de Heijungs, e expressa-se em kg PO₄³⁻ eq./ kg de emissões. A duração deste impacte ambiental é definida como infinita e contém repercussões entre a escala local e a escala continental [9].

O potencial de eutrofização pode ser calculado através da seguinte relação matemática [34,39]:

$$EP_i = \frac{\frac{v_i}{M_i}}{\frac{v_{PO_4^{3-}}}{M_{PO_4^{3-}}}} \quad (11)$$

Onde:

EP_i- representa o potencial de eutrofização de uma substância *i* em kg de PO₄³⁻;

v_i - representa o potencial de biomassa em equivalentes de azoto por quantidade M_i ;

v_{ref} - representa a quantidade emitida de uma substância de referência M_{ref};

As substâncias potencialmente eutrofizantes podem ser calculadas de acordo com a equação:

$$Eutrofização = \sum_i EP_i \times m_i \quad (12)$$

Onde:

m_i- representa a massa da substância *i* em kg.

Potencial de destruição da camada de ozono (ODP)

A emissão de gases poluentes para a atmosfera provoca a destruição da camada de ozono estratosférico que permite a habitabilidade no planeta terra. Esta diminuição proporciona o aumento das quantidades de radiação UV-B que atingem a superfície da terra e que apresenta efeitos negativos para a saúde quer animal, quer humana, afectando também os ecossistemas e ainda a durabilidade e desempenho dos materiais.

O modelo de caracterização ODP, foi desenvolvido pela OMM - Organização Mundial de Metrologia e define o empobrecimento de ozono através de diferentes gases, expressando-se normalmente em kg CFC-11 eq./ kg de emissões. Quanto à sua escala de tempo, esta é infinita [9].

O potencial de destruição da camada de ozono pode ser calculado através da seguinte fórmula [34,39]:

$$ODP_i = \frac{\delta[O_3]_i}{\delta[O_3]_{CFC-11}} \quad (13)$$

Onde:

ODP_i - representa o potencial de depleção do ozono da substância i ;

$\delta[O_3]_i$ - representa a alteração na coluna de ozono no estado de equilíbrio devido à emissão anual da substância i ;

$\delta[O_3]_{CFC-11}$ - representa a alteração na coluna de ozono no estado de equilíbrio devido à emissão anual de CFC-11.

O efeito da depleção do ozono é calculado através da seguinte expressão matemática:

$$Depleção\ do\ Ozono = \sum_i ODP_i \times m_i \quad (14)$$

Onde:

m_i - representa a massa da substância i em kg.

Potencial de toxicidade humana (HTP)

O HTP diz respeito aos efeitos que as substâncias tóxicas têm no ambiente humano. Os factores de caracterização do HTP são calculados através do método USES-LCA², descrevendo a exposição e os efeitos da exposição às substâncias para um horizonte de tempo infinito. Expressa-se em kg C₆H₄Cl₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.) / kg emissão. O âmbito geográfico deste indicador determina o destino de uma substância e pode variar entre a escala local e global [9].

A toxicidade humana pode ser calculada através das seguintes fórmulas matemáticas [34,39]:

$$Toxicidade\ humana_i = \sum_i \sum_{ecomp} m_{i,ecomp} \times HTP_{i,ecomp,t} \quad (15)$$

Onde:

Toxicidade humana_t- toxicidade humana, para o horizonte de tempo t , expresso em kg;

$HTP_{i,ecomp,t}$ - potencial de toxicidade humana da substância i emitida para o compartimento de

² O modelo USES é baseado na família de modelo (E) USES aplicado para avaliar o risco na União Europeia através do modelo Simplex 3,21. Permite calcular factores de eco toxicidade de maneira facilitada, aos seus utilizadores.

emissão e_{comp} para o horizonte de tempo t ;

$m_{i,e_{comp}}$ - emissão da substância i para o compartimento e_{comp} (kg).

$$HTP_{e,e_{comp}} = \frac{\sum_{f_{comp}} \sum_r F_{i,e_{comp},f_{comp}} \times T_{i,f_{comp},r} \times I_r \times E_{i,r}}{\sum_{f_{comp}} \sum_r F_{ref,i,ref_{comp},f_{comp}} \times T_{ref,f_{comp},r} \times I_r \times E_{ref,i,r}} \quad (16)$$

Onde:

$HTP_{i,e_{comp}}$ - potencial de toxicidade humana da substância i emitida para o compartimento de emissão e_{comp} ;

$F_{i,e_{comp},f_{comp}}$ - “factor destino” - representando o transporte intermediário da substância i do compartimento de emissão e_{comp} para o compartimento final f_{comp} e degradação dentro de e_{comp} ;

$T_{i,f_{comp},r}$ - “factor de transferência” - a fracção de substância i transferida de f_{comp} para o modo de exposição r ;

I_r - “factor dose” - representando a dose humana via modo de exposição r ;

$E_{i,r}$ - “factor efeito” - representando o efeito tóxico da dose de substância i via modo de exposição r .

A toxicidade humana é definida relativamente a uma substância de referência e compreende o destino, exposição ou dose, efeito e transferência dessa mesma substância. Daí a existência de vários factores em que existe o local de emissão e um destino.

Potencial de Eco-toxicidade de água doce (FAETP)

Este indicador refere-se a o impacte causado nos ecossistemas de água doce, como resultado das emissões de substâncias tóxicas para a atmosfera, água e solo. O FAETP calcula-se através do método USES-LCA, descrevendo o destino, a exposição e os efeitos das substâncias tóxicas. Expressa-se em kg $C_6H_4Cl_2$ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.) / kg emissão. O âmbito geográfico deste indicador determina o destino de uma substância e pode variar entre a escala local e global [9].

Potencial de Eco-toxicidade Marinha (MAETP) & Potencial de Eco-toxicidade Terrestre (TETP)

O MAETP e o TETP são indicadores semelhantes ao FAETP. Enquanto o FAETP indica o impacte causado nos ecossistemas de água doce, o MAETP refere-se aos impactes que as substâncias tóxicas causam no ecossistema marinho, e o TETP refere-se aos impactes provocados pelas substâncias tóxicas no ecossistema terrestre.

De igual forma ao FAETP, estes calculam-se usando o método USES-LCA e expressam-se em kg C₆H₄Cl₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.) / kg emissão. O âmbito geográfico de ambas é o mesmo de FAETP [9].

Os potenciais de eco-toxicidade que dizem respeito aos impactes causados por toxinas nos ambientes marítimo, terrestre, ou em águas doces, podem ser determinados usando as seguintes relações matemáticas comuns a todos eles:

$$Ecotoxicidade = \sum_i \sum_{ecom} m_{i,ecom} \times ETP_{i,ecom} \quad (17)$$

Onde:

Eco-toxicidade - resultado do indicador, eco-toxicidade expresso em kg;

ETP_{i,ecom}- potencial de eco-toxicidade da substância *i* emitida para o compartimento de emissão ecomp;

m_{i,ecom}- emissão da substância *i* para o compartimento ecomp(kg).

$$ETP_{i,ecom} = \frac{\sum_{fcomp} F_{i,ecom,fcomp} \times E_{i,fcomp}}{\sum_{fcomp} F_{refi,refecom,fcomp} \times E_{refi,fcomp}} \quad (18)$$

Onde:

F_{i,ecom,fcomp}- “factor destino” - representando o transporte intermediário da substância do compartimento de emissão ecomp para o compartimento final fcomp e degradação dentro do compartimento ecomp;

E_{i,fcomp}- “factor efeito” - representando o efeito tóxico da exposição de um dado ecossistema à substância *i* no compartimento fcomp.

O método utilizado para calcular os potenciais de eco-toxicidade através do modelo CML 2001, é o modelo USES-LCA pelas mesmas razões apresentadas para a toxicidade humana, ou seja, os potenciais têm que ser baseados no destino da sua utilização.

Assim, para o cálculo da eco-toxicidade de água doce (FATEP) temos a seguinte expressão matemática:

$$FAETP_{i,ecom} = \frac{PEC_{i,ecom, \acute{a}guadoce} \times E_{i, \acute{a}guadoce}}{PEC_{1,4-diclorobenzeno, \acute{a}guadoce} \times E_{1,4-diclorobenzeno, \acute{a}guadoce}} \quad (19)$$

Onde:

FAETP_{i,ecomp} - Sigla proveniente de Freshwater Aquatic EcoToxicity Potential que significa potencial de ecotoxicidade aquática na água doce da substância *i* emitida para o compartimento de emissão ecomp;

PEC_{i,ecomp,água doce} - Sigla de Predicted Environmental Concentration, ou seja, concentração ambiental prevista na água doce da substância *i* devido à sua emissão para o compartimento de emissão ecomp em kg.m⁻³;

PEC_{1,4-diclorobenzeno,água doce,água doce} é a mesma concentração prevista que a anterior mas para o 1-4 diclorobenzeno em kg.m⁻³;

E_{i,água doce} - factor efeito, representando o impacte tóxico da substância *i* no ecossistema água doce em m³.kg⁻¹;

E_{i,1,4-diclorobenzeno,água doce} é o mesmo factor efeito que o anterior mas para o 1-4 diclorobenzeno em m³.kg⁻¹.

Assim, da mesma forma que é calculado o FAETP é possível calcular o TETP e o MAETP, alterando os elementos da relação matemática de água doce para os factores terrestre ou marítimos dependendo de qual se pretende calcular.

5.2 Propriedades dos objectos em estudo e período de utilização

5.2.1 Propriedades dos automóveis

As propriedades dos automóveis vão de encontro às descritas previamente em 3.2.1 para o automóvel diesel, e em 3.3.1 para o automóvel híbrido.

5.2.2 Período de utilização

Para este estudo, foi considerado que um automóvel a diesel percorre em média vinte e cinco mil (25000) quilómetros por ano e o parque automóvel apresenta uma média de aproximadamente dez anos [55,56]. Assim, nesse período, estes automóveis percorrem uma média de duzentos e cinquenta mil (250000) quilómetros.

5.3 Limitações do estudo

Durante a realização do presente estudo foram enfrentadas diversas limitações.

Não foi possível considerar a etapa de transporte das matérias-primas para a linha de produção devido à falta de informação sobre o transporte das mesmas. Foi então assumido que a fase de início era a produção onde já se encontrariam as matérias-primas, e também que as peças são fabricadas na própria fábrica. Foi ainda descartado o processo de fabrico da bateria no caso do carro híbrido que é um processo que envolve um ganho de CO₂ e implicaria mudanças na categoria de impacto GWP [57].

Durante a fase de fabrico foi necessário criar o processo de fornecimento de energias renováveis, devido a inexistência deste nas bases de dados. Para isso recorreu-se a dados das fontes de energia renovável na Alemanha, onde fica situada a fábrica que produz este modelo de automóveis [58]. Assim, recorreu-se ao sítio da internet do “*Ministério Federal da Economia e Energia*” (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) para aquisição dos dados relativamente a este processo. Elaborou-se uma média entre os anos 2011 e 2012, dado que à data eram os dados mais actuais, como é possível ver na tabela 6. Verificou-se a necessidade de juntar a energia eólica *onshore* e *offshore* e retirar a “*Biogenic share of waste*”.

Tabela 6- Produção energética renovável na Alemanha nos anos 2011 e 2012.

	Hídrica [GWh]	Eólica [GWh]	Biomassa [GWh]	Fotovoltaica [GWh]	Geotérmica [GWh]	Total [GWh]
2011	17.674	48.883	31.920	19.340	18,8	117.836
2012	21.200	46.000	35.950	28.000	25,4	131.175
Média	19.437	47.441,5	33.935	27.670	22,1	124.506
%	15,61	38,10	27,26	19,01	0,02	100%

Assim, para a produção de 1kWh de energia renovável, vamos ter a contribuição de 0,1561kWh de energia hídrica, 0,3810 de energia eólica, 0,2726 kWh de energia proveniente da biomassa, 0,1901 kWh de energia solar, e, 0,002 kWh de energia geotérmica.

Foi também actualizado o processo de combustão de diesel segundo as normas euro 5, pois este apresentava dados obsoletos com elevado teor de SO₂, e a queima de um litro deste apenas poderá emitir 0,02g de SO₂.

Ainda durante a fase de uso, foram desprezados os pneus do automóvel pois é um dado que depende da condução praticada no automóvel bem como as suas intervenções de manutenção por falta de informação sobre as mesmas.

É também importante referir que foram consideradas as médias de consumo de combustível máximas anunciadas pela marca, para a produção e para o uso de combustível ao longo do ciclo de vida.

5.4 Inventário de ciclo de vida (ICV)

Nesta fase do estudo, o inventário de ciclo de vida, é onde são recolhidos os dados e procedimentos de cálculo que permitem realizar o estudo, e quantificar todas as entradas no sistema (*inputs*).

Inicialmente começa-se por construir uma árvore do processo para melhor visualizar todos os componentes do sistema, as fases da ACV, e todos os processo que possam ser entrada na nossa análise.

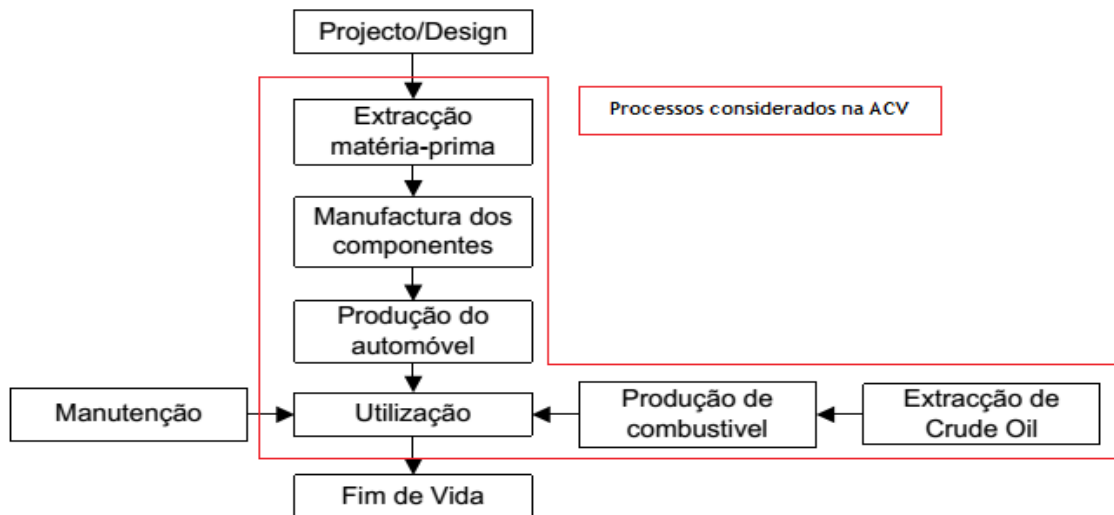


Figura 15 - Árvore de processo de uma avaliação do ciclo de vida de um automóvel [59].

Conhecendo então todo o processo, iremos limitar as fronteiras do processo. Neste caso iremos analisar o processo de ciclo de vida desde a produção, onde é incluída a extracção de matérias-primas, a fase de fabrico de combustível necessário ao uso do automóvel, e a fase de uso do automóvel. Infelizmente não foi possível obter dados relativos à parte de fim de vida dos automóveis em estudo.

Os automóveis utilizados para a realização da análise comparativa do ciclo de vida deste estudo, apresentam características muito semelhantes. Possuem o mesmo nível de equipamento estrutural, como equipamento de acabamento, e, variam apenas a nível de motorização/transmissão.

Na tabela 7 poderemos ver quais os materiais necessários para construir uma unidade de cada um dos dois automóveis. Já na tabela 8 podemos observar as fontes de energética se a quantidade de energia gasta durante a produção de uma unidade de cada automóvel.

Para uma visualização mais facilitada iremos denominar o automóvel a diesel por Automóvel D, e o automóvel híbrido por Automóvel HD.

Tabela 7 - Recursos materiais utilizados durante a produção de cada automóvel.

Recurso	Grandeza	Automóvel D	Automóvel HD	Diferencial
Bauxite	kg	718	727	1%
Dolomite	kg	110	128	16%
Ferro em minério	kg	977	995	2%
Mistura de minérios (Cu, Pb, Zn)	kg	120	146	22%
Minerais raros/ metais preciosos	kg	0.3	0.7	133%

Tabela 8 - Recursos energéticos necessários durante a produção de cada automóvel

Recurso	Grandeza	Automóvel D	Automóvel HD	Diferencial
Lignite	GJ	15.3	12.6	-22%
Gás natural	GJ	51	43	-18%
Petróleo bruto ³	GJ	41.9	49.7	16%
Carvão	GJ	45.1	46.1	-4%
Urânio	GJ	29	29	0
Energias renováveis	GJ	14.5	14	-4%

5.4.1 Fabrico do automóvel

Durante a fase de fabrico do automóvel, foi considerada a extracção das matérias-primas, e que estas estariam na fábrica para ser processadas, e dar origem às matérias que podem dar origem aos componentes do automóvel.

É possível verificar que existe uma diferença entre os recursos que cada automóvel necessita para ser produzido.

O aumento da necessidade do mineral bauxite, deve-se ao facto de o automóvel híbrido necessitar mais alumínio para a sua constituição, e a bauxite é o mineral que através de um conjunto de processos dará origem ao alumínio como principal constituinte.

³ Neste caso foi considerado o chamado *heavy oil*, que é um derivado do petróleo bruto e utilizado industrialmente como fonte de energia.

Já o aumento da quantidade de dolomite utilizada, está directamente relacionado com o aumento da necessidade de minério de ferro, pois a dolomite é a matéria-prima que dá origem ao magnésio que é responsável por baixar o teor de enxofre na durante a combinação do minério de ferro com carvão originando o aço que é o principal constituinte de ambos os automóveis.

Verificou-se um aumento por parte da mistura de minérios que dão origem a cobre, zinco e pequenas quantidades de chumbo, e de minerais raros no caso do automóvel híbrido deve-se ao facto deste apresentar uma maior quantidade de componentes electrónicos, nomeadamente o motor eléctrico, placas de controlo, assim como toda a cablagem do automóvel.

Foram ainda incluídos na fase de produção a utilização de termoplásticos e de vidros em ambos os automóveis em igual quantidade, pois ambos os automóveis apresentam semelhança estrutural. Nesse sentido os valores foram aproximados através de dados disponíveis em [7] de modo a não descartar as contribuições geradas.

5.4.2 Utilização do automóvel

Durante a fase de avaliação do automóvel, foram considerados duzentos e cinquenta mil quilómetros que deverão ser percorridos durante dez anos, atendendo ao tipo de utilização que é esperada para um automóvel diesel, e conseqüentemente para o híbrido-diesel.

Neste contexto, foi considerado que o automóvel diesel (E300 cdi) consumiria 6.1 litros por cada 100 quilómetros percorridos, e para o caso do automóvel híbrido (E300 hybrid) foi considerada uma média de 4.3 litros por cada 100 quilómetros percorridos, sendo estas as médias máximas indicada pela marca.

Tal como já referido nas limitações do estudo, não foram considerados os fluidos intervenientes nas manutenções dos automóveis, nem a utilização dos travões e pneus, pois a nível de manutenção estudos realizados revelam que estes não apresentam grande relevância no impacte ambiental a nível do ciclo de vida, e os travões e pneus utilizados dependem o local em que serão realizados os quilómetros (auto-estrada, urbano ou extra-urbano) e também do tipo de condução [7].

Assim, através de operações matemáticas foi possível calcular qual a necessidade de combustível utilizado por cada automóvel. Neste caso o automóvel diesel necessita de 15250 litros de diesel para percorrer os 250000 quilómetros, e o automóvel híbrido-diesel necessitará de 10750 litros de diesel para percorrer igual distância.

5.4.3 Fabrico de combustível

A fase de fabrico do combustível é uma fase consequente à fase de utilização, devido à necessidade de processar o petróleo bruto em diesel para utilização como fonte energética. Neste caso foram considerados os 15250 litros de diesel para o automóvel diesel e os 10750 litros de diesel para o automóvel híbrido-diesel. Devido à necessidade de converter para unidades energéticas o diesel, foi considerado que cada litro de combustível produz 36.4 MJ. Assim após esta conversão foi possível avaliar o impacte ambiental causado durante a fase de produção de combustível.

É de referir que esta fase é também uma das fases mais importantes de todo o ciclo de vida pois é responsável por garantir a produção de combustível durante toda a fase de uso do automóvel para a utilização do mesmo.

5.5 Avaliação do impacte de ciclo de vida (AICV)

A avaliação do impacte de ciclo de vida descreve todas as etapas obrigatórias referidas anteriormente no quarto capítulo. Os resultados das etapas de avaliação de impacte, são obtidas unicamente através da utilização directa do *software* de ACV seleccionado para o estudo.

5.5.1 Selecção de categorias de impacte, indicadores de categoria e modelos de caracterização

A selecção de categorias de impacte deve ser feita no inicio do estudo juntamente com a definição do âmbito e objectivo. Como referido em 5.1.1, este estudo seguiu o método de avaliação de impacte ambiental *CML 2001 baseline*, e como tal este comporta o estudo das categorias de impacte referidas na tabela 5, que irão ser apresentadas mais à frente na fase de caracterização (5.5.3) e na fase de normalização (5.7).

5.5.2 Classificação - atribuição dos resultados de ICV

A fase de classificação identifica os elementos de ICV como sendo os constituintes do ciclo de vida do produto, e agrupa-os em diferentes categorias de impacte. Através da utilização de um *software*, este processo é realizado de forma inteiramente automática, combinando os resultados de ICV com as categorias de impacte, e, apresentando os resultados consoante descrito pela metodologia utilizada, neste caso a *CML2001*.

5.5.3 Caracterização - cálculo dos resultados dos indicadores de categoria

Nesta fase são calculados os resultados dos impactos por categoria. Através de uma operação de multiplicação dos factores de carga ambientais obtidos durante a fase de classificação pelo seu respectivo factor de caracterização, são obtidas as contribuições de cada elemento para cada categoria. De seguida são somadas as contribuições de cada elemento para cada factor, dando origem às categorias de impacte ambiental.

Na tabela 9 é possível visualizar os resultados obtidos em cada categoria de impacte, através da utilização do *software* da comparação dos dois veículos.

Tabela 9 - Quantificação das categorias de impacte ambiental obtidos através do *software OpenLCA*.

Automóvel	Categorias de impacte de LCA									
	ADP	GWP	POPC	AP	EP	ODP	HTP	FAETP	MAETP	TETP
	GJ	t CO ₂	kg C ₂ H ₄	kg SO ₂	kg PO ₄	kg CFC-11	kg C ₆ H ₄ Cl ₂	kg C ₆ H ₄ Cl ₂	kg C ₆ H ₄ Cl ₂	kg C ₆ H ₄ Cl ₂
Automóvel D	675.1	60.1	7.89	126.0	20.4	9.61E-5	223.5	0.87	211.2	15.54
Automóvel HD	499.9	44.5	5.96	91.9	14.7	1.16E-5	171.3	0.9	219.24	15.77

Além das contribuições para cada categoria de impacte é possível quantificar a quantidade de substâncias nocivas emitidas para o meio ambiente e que contribuem para as diferentes categorias de impacte, como se pode observar nas tabelas 10 e 11, onde são apresentadas as diferentes emissões para o ar e para a água, respectivamente.

Tabela 10 - Elementos emitidos para o ar durante o ciclo de vida dos automóveis.

Automóvel	Diesel	Híbrido
CO ₂ [t]	58.2	42.9
CO [kg]	181	129
NMVOG [kg]	0.730	0.702
CH ₄ [kg]	73.8	38.9
NO _x [kg]	26.12	38.8
SO ₂ [kg]	22.62	18.21
NH ₃ [g]	250	243
NO ₂ [kg]	4.83	4.95

Em termos de emissões para a água, por vezes são emitidos metais pesados, sobretudo na fase de produção dos automóveis e devem ser quantificados, para verificar as alteração existente no ciclo de vida de ambos os automóveis [9].

Tabela 11 - Elementos emitidos para a água durante o ciclo de vida dos automóveis.

Automóvel	Diesel	Híbrido
NO ³⁻ [g]	294	296
PO ₄ ³⁻ [g]	314	330
SO ₄ ²⁻ [kg]	9.47	9.27
Hidrocarbonetos [g]	126.7	89.4

5.6 Interpretação dos resultados obtidos na caracterização

A interpretação dos resultados é a fase onde os resultados obtidos são analisados. Assim, após as fases de classificação e de caracterização, é necessária a fase de interpretação de resultados, de forma a verificar qual dos automóveis em estudo apresenta um melhor desempenho ambiental.

Se necessário, é possível proceder à normalização, sendo este um processo opcional, mas que permite clarificar algum dos resultados, de forma a aumentar a precisão do estudo. Como referido anteriormente quando se recorre ao método CML2001 é recomendado que seja feita a normalização.

Através da visualização da tabela 9, presente na caracterização (5.5.3), conseguimos observar que os valores das categorias de impacte ambiental apresentam diferenças entre o automóvel diesel e o automóvel híbrido. Estas diferenças devem-se às diferentes componentes que constituem os automóveis e também ao consumo dos mesmos durante o seu ciclo de vida, e consequentemente à necessidade de combustível produzido.

Por um lado temos o automóvel diesel, com um motor diesel de seis cilindros e 170kW de potência, por outro temos o automóvel híbrido, com um motor diesel de quatro cilindros e 150kW de potência e um motor eléctrico com 20kW, perfazendo então também a potência de 170kW. Assim, as diferenças assinaladas no ciclo de vida dos automóveis são mais evidentes durante a fase de produção com a diferença entre a necessidade de matéria-prima para criar cada um dos automóveis, durante a fase de uso com a diferença de consumo verificada entre ambos e consequentemente durante a fase de produção de combustível.

Podemos observar na figura 16 a comparação em termos percentuais da contribuição de cada um dos automóveis para as respectivas categorias de impacte ambiental do método CML2001.

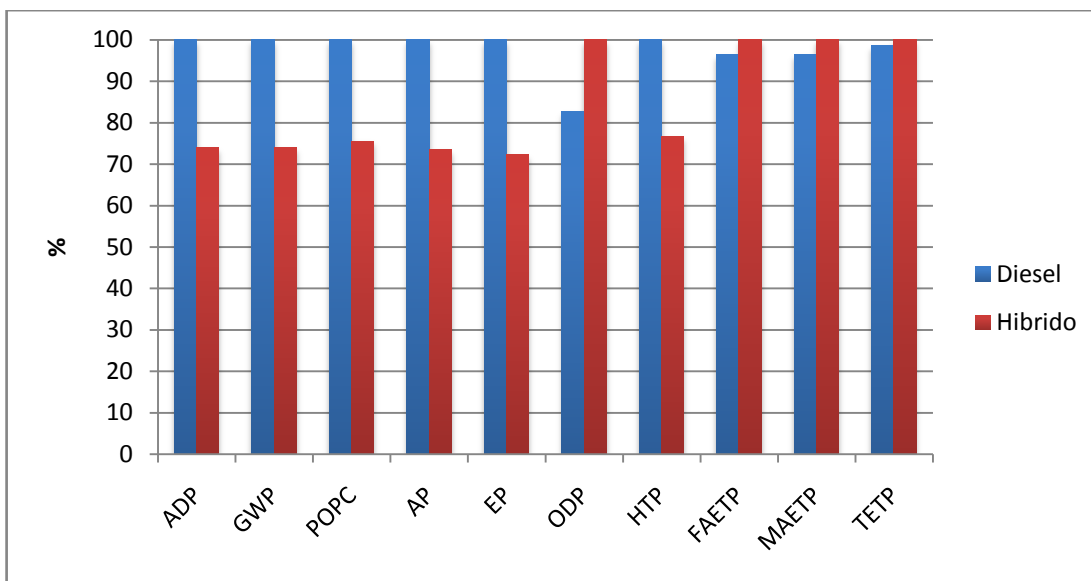


Figura 16 - Contribuição em termos percentuais de cada automóvel para cada categoria de impacte, na fase de caracterização.

5.6.1 Análise individual das categorias de impacte

Ao analisarmos cada categoria individualmente e com valores absolutos, conseguimos observar quais as diferenças mais relevantes e quais as possíveis situações que levam à existência das mesmas.

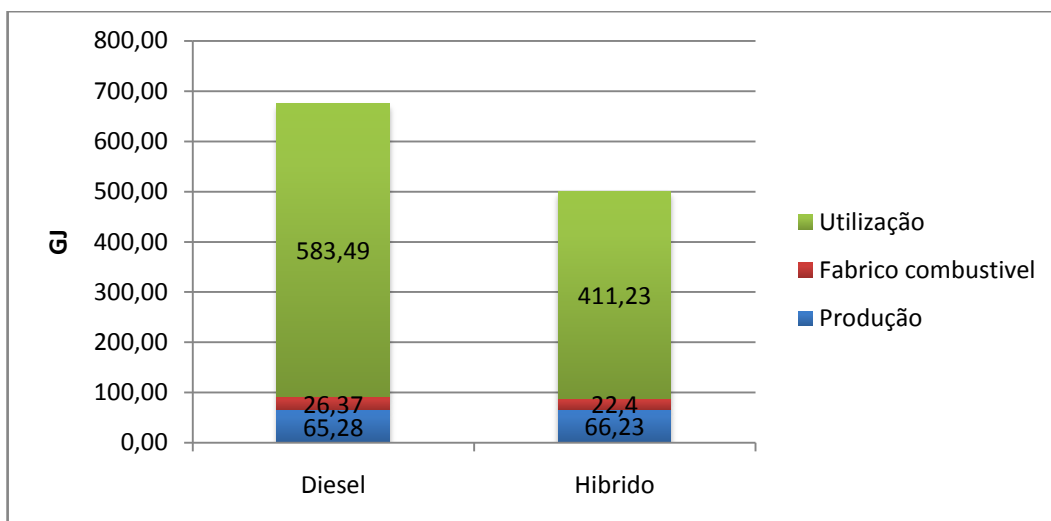


Figura 17- Comparação do potencial de esgotamento de recursos abióticos, em particular dos combustíveis fósseis, entre os dois veículos, expresso em GJ.

Ao analisarmos a figura 17 conseguimos observar que existem diferenças entre os dois automóveis em estudo, nas diversas fases estudadas. Esta diferença é mais notória na fase de utilização e deve-se à diferença de consumo verificada entre os dois automóveis.

Consequentemente o automóvel diesel apresenta uma maior contribuição para este indicador na fase de produção de combustível. Na fase de produção existe uma maior contribuição, ainda que ligeira, do automóvel híbrido em relação ao automóvel diesel devido às necessidades materiais superiores e também aos recursos energéticos por este utilizado. Observa-se assim uma menor contribuição global por parte do automóvel híbrido para este indicador.

Passamos agora a analisar a categoria de impacte GWP100, representada na figura 18.

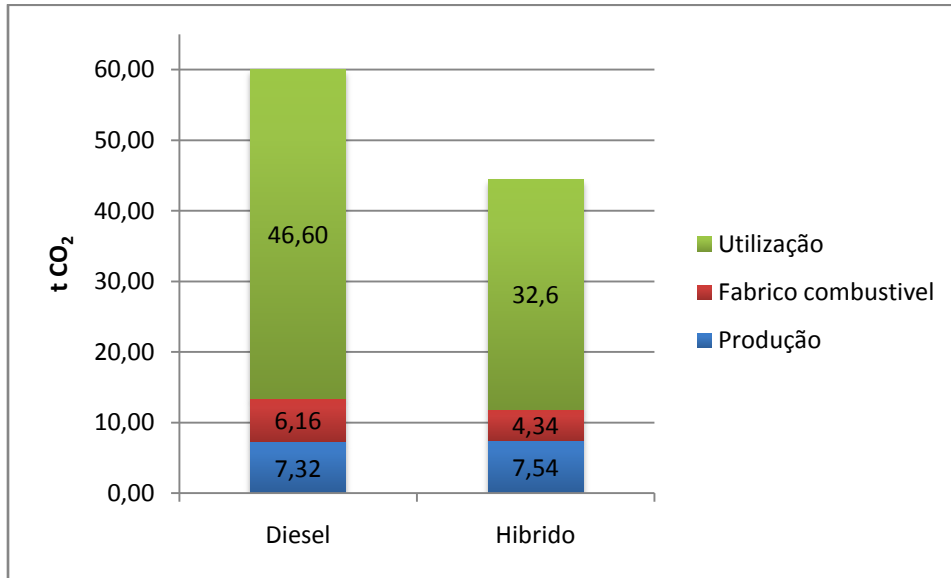


Figura 18 - Comparação do potencial de aquecimento global entre os dois veículos, expresso em toneladas de dióxido de carbono.

O impacte que mede o potencial de aquecimento global (GWP) é um dos impactes mais importantes da actualidade, pois este mede a quantidade de gases que são enviados para a atmosfera responsáveis pelo aumento da temperatura global do planeta. Este indicador, mais concretamente denominado GWP100, mede o efeito que estes gases provocam a longo prazo, ou seja a 100 anos.

Através da observação da figura 18 conseguimos verificar que o automóvel diesel tem uma maior contribuição para este indicador de impacte do que o veículo híbrido. Este facto é explicado através da diferença que existe entre as emissões dos principais gases contribuintes para este impacte o CO₂ e o CH₄ que apresentam uma maior abundância no ciclo de vida do automóvel diesel.

O potencial de formação de ozono troposférico (POCP) é outro impacte bastante preocupante pois corresponde ao poluente mais grave existente neste momento na Europa. A formação deste ozono aumenta a possibilidade de problemas para a saúde e é também apontado como a principal causa da formação do chamado *smog* de verão.

Como é possível observar pela figura 19, o automóvel diesel apresenta uma maior contribuição para este impacto comparado com o automóvel híbrido. Esta diferença está relacionada com os gases que contribuem para este indicador, que são o CH₄, o NO_x, os NNMVOC e o CO que possuem diferentes contribuições para cada automóvel.

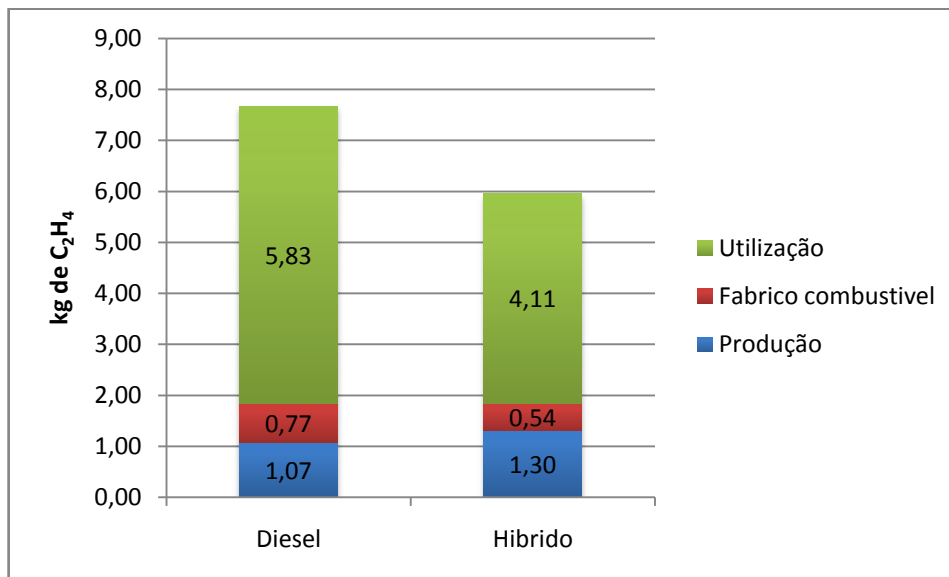


Figura 19 - Valores obtidos na comparação da categoria de impacto potencial de formação de ozônio troposférico (POPC) entre os dois veículos, expresso em quilogramas de etileno.

Outro indicador é o potencial de acidificação. O indicador AP traduz o processo onde as emissões enviadas para a atmosfera são convertidas em substâncias ácidas, sendo estas apontadas como as principais responsáveis pela diminuição do pH atmosférico e consequentemente a causa da formação das chamadas chuvas ácidas.

Como é possível verificar na figura 20, o automóvel diesel possui uma maior contribuição para este indicador quando comparado com a contribuição do automóvel híbrido. As principais substâncias que contribuem para este indicador são o dióxido de enxofre (SO₂) e a amónia (NH₃), sendo o SO₂ aquele que causa maior impacto. Primeiro porque este indicador se expressa em quilogramas de dióxido de enxofre e como tal este tem uma proporção de 1:1 de contribuição e ainda porque uma das emissões produzida durante a utilização do diesel como fonte energética é o dióxido de enxofre.

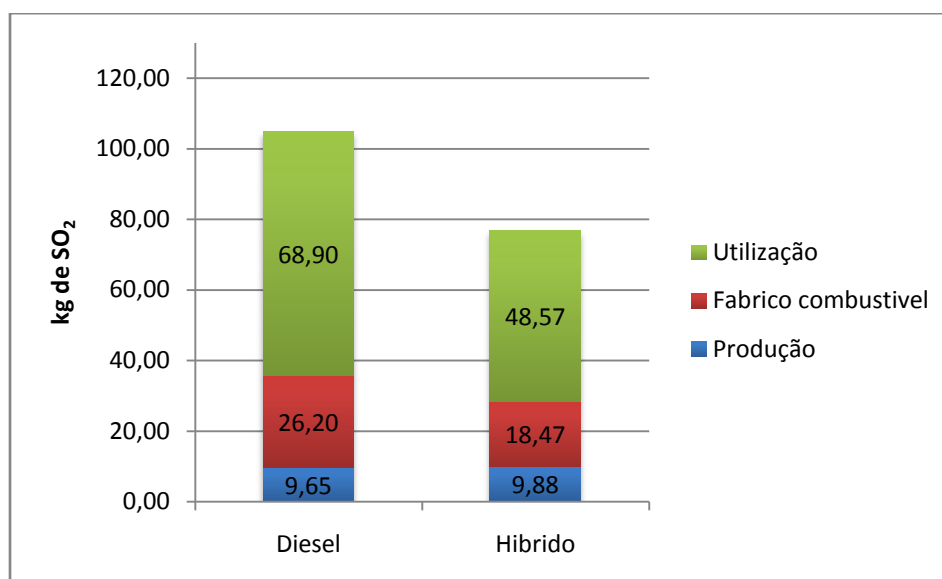


Figura 20 - Valores obtidos para o Potencial de acidificação (AP) em comparação entre os dois veículos, expresso em quilogramas de dióxido de enxofre.

O potencial de eutrofização (EP) é outro indicador de referência do método CML 2001. Este traduz o potencial de excessivo enriquecimento em nutrientes das massas de água, nomeadamente em fosfato, e com isso a consequente degradação dos sistemas aquáticos através do elevado aumento da vegetação aquática, nomeadamente de algas verdes e cianobactérias que podem ter efeitos nocivos. Além disso contribuem também para este indicador as emissões de amónia, nitratos, ácido nítrico, fosfato, fósforo, entre outros.

Através da visualização da figura 21 conseguimos observar que automóvel a diesel tem uma contribuição superior para o indicador EP quando comparado com o automóvel híbrido, verificando-se uma maior contribuição na fase de utilização de ambos os veículos e consequentemente na fase de produção de combustível.

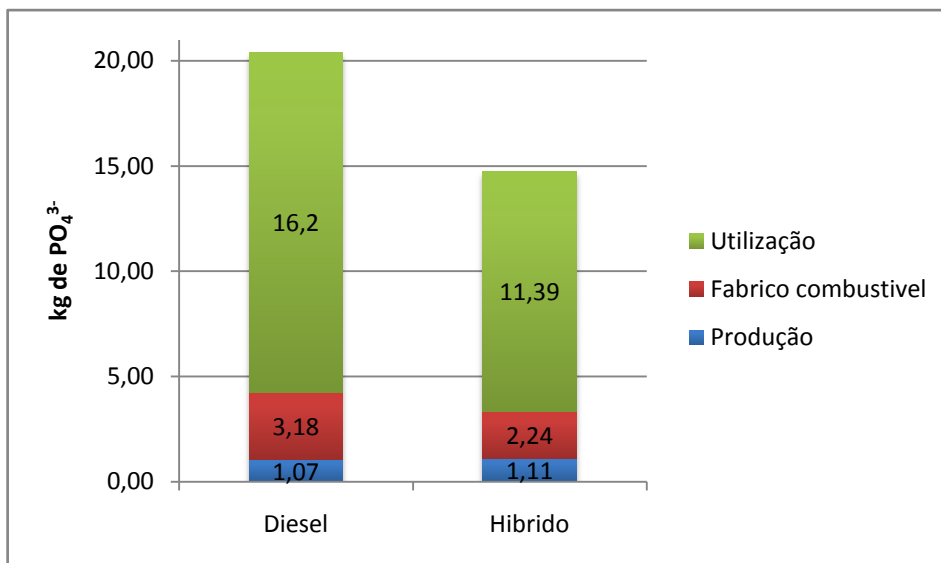


Figura 21 - Valores obtidos para o Potencial de eutrofização (EP) em comparação entre os dois veículos, expresso em quilogramas de dióxido de fosfato.

Outro indicador importante e avaliado através do método CML2001 é o ODP. Este indicador está relacionado com a destruição da camada do ozono e como sabemos esta permite a habitabilidade do planeta, diminuindo a radiação UV que apresenta efeitos prejudiciais à saúde. Dos dois automóveis em estudo observamos que existe uma maior contribuição por parte do veículo diesel do que do veículo híbrido, conforme pode ser verificado na figura 22. Outro dado a inferir é que apresentam apenas valores na fase de produção. Estes resultados apresentam valores muito baixos e daí que em muitos estudos realizados sejam desprezados.

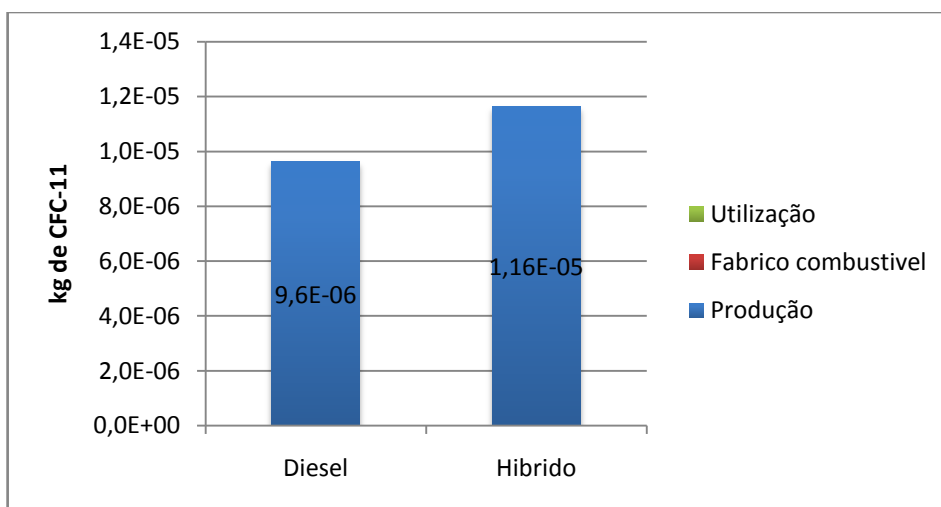


Figura 22 - Valores obtidos para o Potencial de destruição da camada de ozono (ODP) em comparação entre os dois veículos, expresso em quilogramas de CFC-11.

Analisamos agora um outro indicador de impacto ambiental, apresentado na figura 23, o potencial de toxicidade humana. É responsável por quantificar os efeitos que as substâncias tóxicas geradas durante o ciclo de vida de cada automóvel têm no ambiente humano. Verificamos que, tal como o observado para a maioria dos indicadores, o automóvel diesel tem uma maior contribuição para este indicador comparativamente ao automóvel híbrido.

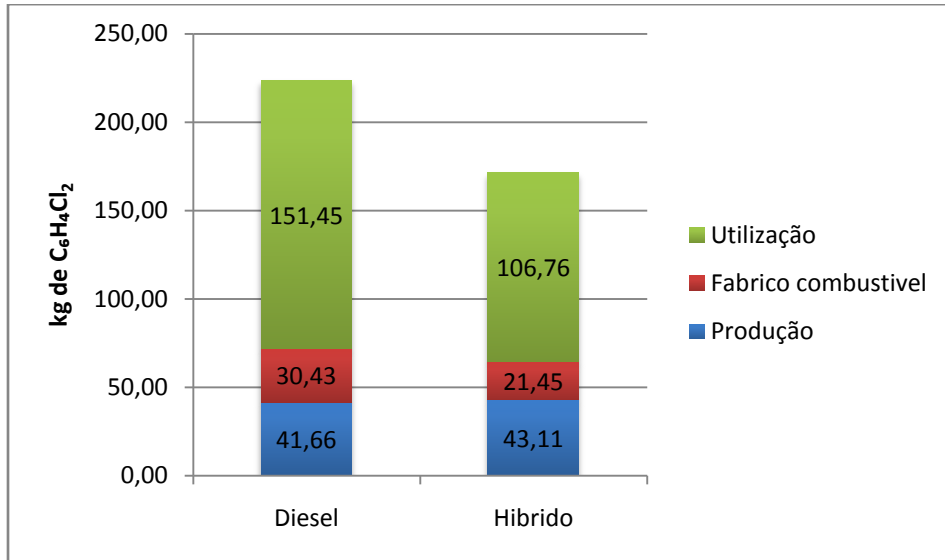


Figura 23 - Resultados obtidos para a categoria de impacto potencial de toxicidade humana, expresso em kg C₆H₄Cl₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.)

Por fim, observamos os eco-indicadores de toxicidade contemplados pela metodologia de ACV CML2001 e representados nas figuras 24, 25 e 26. Estes indicadores são responsáveis por quantificar a Eco-toxicidade marinha, terrestre, e de água doce. Neste caso o automóvel híbrido tem uma maior contribuição para estes indicadores do que o automóvel diesel.

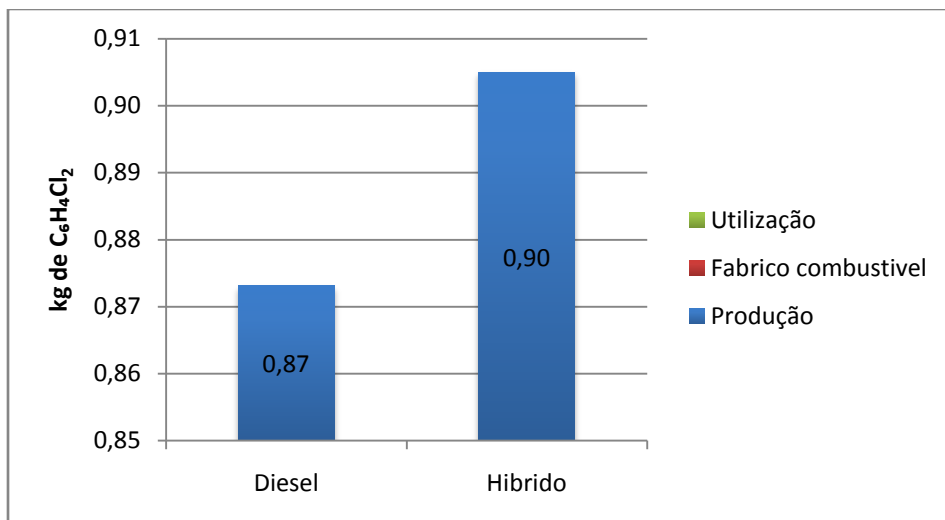


Figura 24 - Resultados obtidos para a categoria de impacto FAETP, expresso em kg C₆H₄Cl₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.).

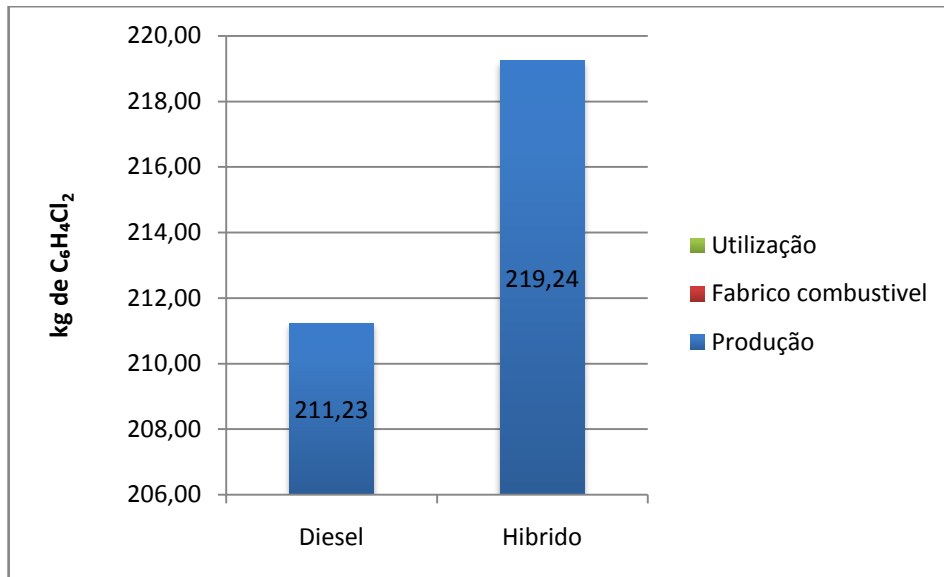


Figura 25 - Resultados obtidos para a categoria de impacto MAETP, expresso em kg C₆H₄Cl₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.).

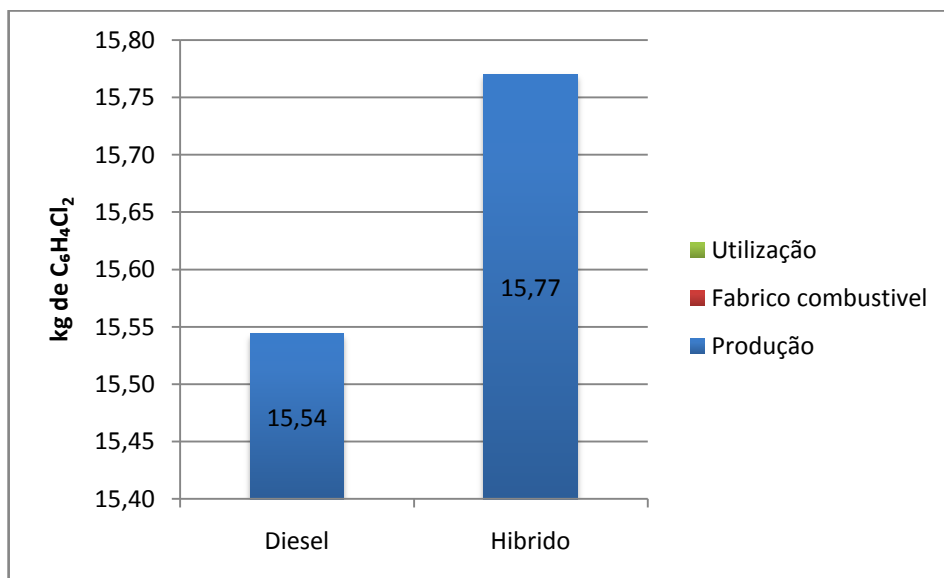


Figura 26 - Resultados obtidos para a categoria de impacto TETP, expresso em kg C₆H₄Cl₂ eq. (1,4-diclorobenzeno eq.).

Os eco-indicadores são muitas vezes desprezados por alguns autores visto que existe falta de evidência científica, até à data, que possa indicar resultados com veracidade suficiente para serem considerados significativos [7].

5.7 Normalização

A normalização é uma das etapas opcionais na realização de uma análise de ciclo de vida. Realiza-se através de uma operação matemática de divisão, em que o resultado de impacto de uma categoria é dividido pelo seu factor de normalização [39].

A metodologia CML 2001 recomenda o uso de dados normalizados de referência bem definidos geograficamente e temporalmente [34]. Os métodos de análise disponibilizados para utilização com o *software OpenLCA* possuem incluídos os factores de normalização, compreendendo diferentes factores de normalização como: EU25; EU25+3, 2000; TheNetherlands, 1997; West Europe, 1995; World, 1990; World, 1995; World, 2000 [60].

As figuras 27 e 28 apresentam as contribuições geradas por cada automóvel em cada fase que são investigadas na fase de caracterização pelo método CML2001. Estes valores são posteriormente normalizados através do factor de normalização EU25, de forma automática através do *software*.

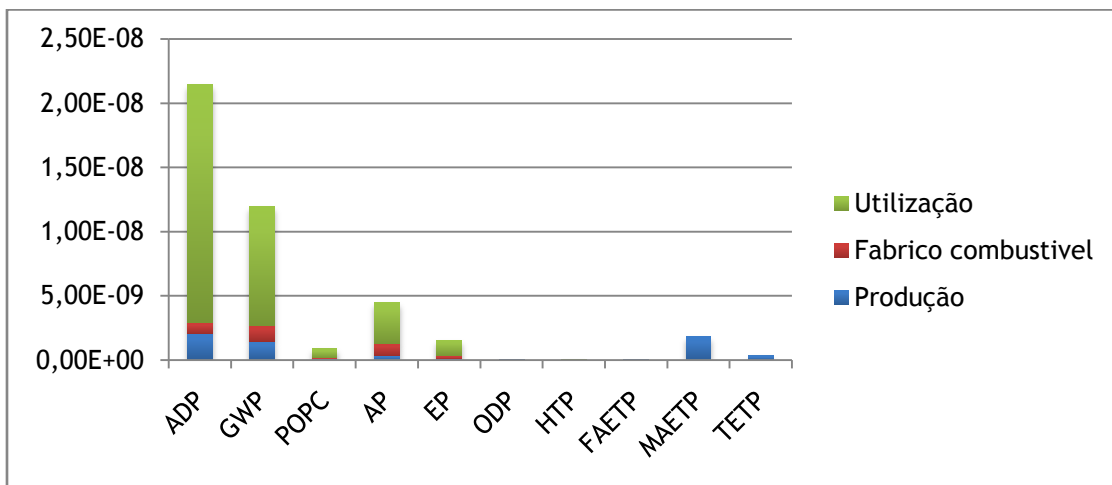


Figura 27 - Contribuição das diferentes etapas do ciclo de vida do automóvel diesel para as categorias de impacto avaliadas.

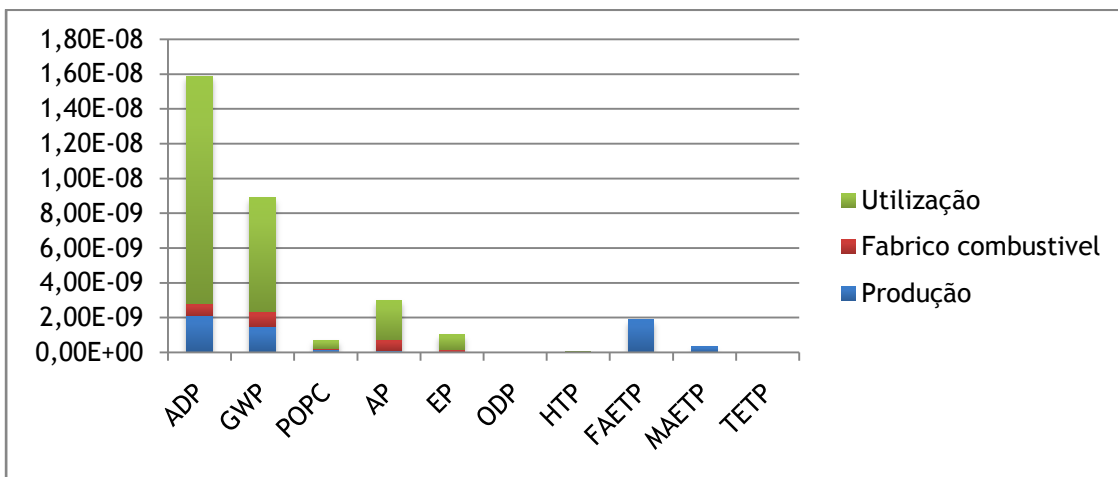


Figura 28 - Contribuição das diferentes etapas do ciclo de vida do automóvel híbrido para as categorias de impacte avaliadas.

Através da observação das acima representadas, conseguimos visualizar as categorias de impacte avaliadas com normalização. A normalização é geralmente realizada para assegurar a veracidade dos resultados obtidos durante a fase de caracterização. Assim, observamos que as categorias de impacte ADP, GWP, POPC, AP, EP e ODP, apresentam valores muito semelhantes aos encontrados na fase de caracterização, revelando a consistência que era procurada. Por outro lado, as categorias de impacte de Eco toxicidade e de potencial de toxicidade humana revelam valores algo distintos da fase de caracterização. Este facto vai de encontro com as conclusões do projecto LIRECAR, em que estas cinco primeiras categorias são consideradas como relevantes de dados preocupantes, deixando as eco-toxicidades e o potencial de toxicidade humana pelo facto de não existirem resultados científicos suficientes, que permitam utilizar os dados obtidos por estes factores [7,61].

6. Conclusões

6.1 Conclusões gerais

Neste último capítulo são retiradas as conclusões de todo o trabalho realizado. Este estudo pretendeu comparar o impacto ambiental gerado por dois automóveis com diferentes motorizações, um com motor diesel convencional e outro com um motor diesel e um motor eléctrico.

O aparecimento de automóveis com diferentes soluções de motorização deve ser encarado como uma peça fundamental de evolução. Através destes é possível reduzir, ou mesmo acabar, com a dependência dos combustíveis fósseis, que, como é conhecido, são uma fonte de recursos esgotável. Para além disso, a utilização dos combustíveis fósseis como combustíveis, origina uma das principais fontes de poluição ambiental que se traduz em efeitos negativos para a sociedade, quer a nível da saúde que pelo facto de destruir a camada do ozono que permite a habitabilidade no planeta.

Para cumprir o nosso objectivo de comparar o impacto ambiental de dois diferentes tipos de automóveis, foi definida uma unidade funcional de “um automóvel com um potência de 170kW” de forma a ser possível ter uma igual unidade de potência que possibilitasse a realização da comparação. Assim, a realização da análise comparativa foi elaborada seguindo uma metodologia de estudo, a análise de ciclo de vida (ACV), que através de um método de avaliação denominado CML2001, possibilita analisar qual o desempenho ambiental dos objectos em estudo em diversas categorias. Este método de estudo foi seleccionado devido ao facto de ser preferencial na Europa e estar entre os mais seleccionados para a realização de estudos de ACV [7,8].

Foram avaliadas as categorias de impacto da metodologia CML2001 *baseline*: Potencial de aquecimento global, Potencial de formação de ozono troposférico, Potencial de acidificação, Potencial de eutrofização, Potencial de destruição da camada de ozono, Potencial de Eco-toxicidade humana, Potencial de Eco-toxicidade de água doce, Potencial de Eco-toxicidade Marinha, Potencial de Eco-toxicidade Terrestre. Os resultados obtidos no presente trabalho incluem a fase de caracterização e a fase opcional de normalização, utilizado o factor de normalização EU25 através do software de ACV utilizado [60].

Assim, todos os resultados são apresentados em três fases, a produção, a fase de fabrico de combustível e a fase de utilização de cada automóvel, para cada uma das dez categorias de impacto analisadas pela metodologia de ACV seleccionada. Num projecto levado a cabo por grandes marcas de automóveis em 2003, chamado *LIRECAR*, que teve como objectivo criar um acordo de redução das emissões de gases poluentes, nomeadamente CO₂ através da

redução da massa dos automóveis, foram definidas como principais categorias de impacte para obtenção de dados relevantes as seguintes categorias: GWP, ADP, POPC, EP e AP [7,61]. No entanto, foi optado por quantificar e analisar todas as dez categorias de impacte deste método de estudo, tanto na caracterização como na normalização, e analisar a consistência obtida em todas as categorias de impacte.

É de referir que o automóvel híbrido utilizado neste estudo apresenta uma *novidade* tecnológica, a implementação de um sistema híbrido conjugado com uma motorização diesel. Pelo facto de ser uma tecnologia nova, tornou-se difícil encontrar na literatura existente, estudos que comparassem esta tecnologia com as restantes. São encontradas comumente comparações de avaliação do ciclo de vida de automóveis eléctricos com automóveis de fuel-cell, com os tradicionais de combustão interna, e mesmo com híbridos e plug-in híbridos mas com motorização a gasolina, maioritariamente durante a sua fase utilização, que conforme verificado no nosso estudo, apresenta as maiores contribuições para as diferentes categorias. As vantagens de tecnologias alternativas são já conhecidas, observando-se uma redução das emissões poluentes, assim como a dependência de combustíveis fósseis [3,63,64,65].

Analisando individualmente a contribuição de cada etapa do ciclo de vida do automóvel na fase de caracterização, temos a principal categoria responsável pelas alterações climáticas, o GWP 100 - Potencial de aquecimento global a 100 anos. Este indicador é responsável por quantificar as alterações climáticas a longo termo, maioritariamente provocadas pelo uso de combustíveis fósseis. Observou-se no automóvel híbrido uma redução significativa para a contribuição desta categoria de impacte relativamente ao automóvel diesel estudado [62]. Este facto justifica-se pela redução de consumo verificada durante a fase de utilização. Apesar de se verificar uma maior contribuição na fase de produção, por parte do automóvel híbrido, a fase de utilização é aquela em que se recorre a uma maior utilização de combustível, e a sua utilização é um dos principais responsáveis pela libertação de dióxido de carbono para a atmosfera. Num estudo pela Daimler AG, é possível verificar que os resultados obtidos vão de encontro com o verificado neste estudo, verificando-se o automóvel híbrido com um melhor desempenho nesta categoria de impacte [7].

Analisando a categoria de impacte ADP, responsável por quantificar a diminuição das reservas de recursos abióticos, verificou-se uma redução da contribuição para este indicador por parte do automóvel híbrido. De facto, isto acontece maioritariamente pela redução de combustível verificada entre o automóvel diesel e o automóvel híbrido durante a sua fase de utilização. É de notar que a redução de consumo durante a fase de utilização irá afectar directamente a fase de produção de combustível. Apesar de existir uma ligeira contribuição superior na fase de produção por parte do automóvel híbrido devido à necessidade de mais recursos materiais, este acaba por apresentar um melhor desempenho ambiental neste factor no seu ciclo de vida.

Relativamente à POPC, que avalia a quantidade de ozono troposférico criado durante o ciclo de vida do automóvel, observa-se que apesar do automóvel híbrido apresentar uma maior contribuição para esta categoria na fase de produção, relativamente ao automóvel diesel, ao longo do ciclo de vida esta diferença é contrariada com a diferença de consumo entre eles. Verifica-se uma particularidade de um maior nível de emissões de NO_x por parte do automóvel híbrido, justificável devido às diferenças materiais deste automóvel e este facto que vai de encontro com o revelado pela marca no catálogo do automóvel. (vide anexo 8.1) As emissões de NO_x quantificam geralmente emissões de óxido nítrico (NO) e Dióxido de Azoto (NO_2). O NO é uma das substâncias resultantes da combustão de comburentes fósseis para a atmosfera, e sob a acção de luz solar o NO transforma-se em NO_2 e dependendo das concentrações poderá ser uma fonte de problemas de saúde nomeadamente a nível respiratório.

A categoria que mede o potencial de acidificação, é responsável por quantificar os impactes que contribuem para a diminuição do pH atmosférico que origina as chuvas ácidas. Para este impacte os principais contribuintes apontados são o SO_2 , o NH_3 e o NO_2 . Estes compostos são resultantes da queima de combustíveis derivados do petróleo como por exemplo, o diesel, a gasolina, o óleo pesado, mas também de carvão vegetal comumente utilizados como fontes energéticas. Os resultados obtidos neste trabalho verificam que o automóvel híbrido apresenta um melhor desempenho ambiental neste indicador, quando comparado com o automóvel diesel. Verifica-se que a fase de utilização é responsável pela maior contribuição, que poderá ser justificável através da quantidade de energia proveniente dos combustíveis fósseis. No trabalho realizado pela Daimler AG, são apontados como principais contribuintes para este indicador, a fase de produção e a fase de fabrico de combustível, o que poderá estar relacionado com o facto de ter sido utilizado um processo de produção de combustível com dados obsoletos enviesando este indicador.

O potencial de eutrofização responsável pela quantificação dos poluentes que contribuem com o macro enriquecimento para as águas, vão de encontro com a maioria dos indicadores anteriores, onde o automóvel híbrido apresenta um melhor desempenho ambiental para este indicador relativamente ao automóvel diesel. Este achado vai de encontro com o estudo realizado pela Daimler AG onde o mesmo se verifica, apesar de em valores absolutos algo diferentes pelo facto de se utilizarem diferentes bases de dados para o estudo.

Quanto às contribuições obtidas através da categoria de impacte ODP responsável por quantificar a destruição da camada do ozono são em ambos os casos muito baixo, pelo que poderão ser considerados desprezáveis.

A categoria de impacte responsável pela quantificação da toxicidade humana representa os valores que as substâncias tóxicas emitem para o ambiente humano. Nesta categoria de impacte o automóvel híbrido apresentou um melhor desempenho ambiental relativamente ao automóvel diesel, essencialmente devido à redução de consumo que este apresenta, e,

consequentemente a redução de combustível que terá que ser produzido, pois a contribuição na fase de produção do automóvel híbrido é superior, porém compensada através da redução de consumo.

Por último os resultados dos indicadores de eco-toxicidade na fase de caracterização apresentam todos resultados com a mesma tendência, ou seja, apresentam o automóvel diesel com melhor desempenho ambiental. É importante referir que estes apenas apresentam indicadores durante a fase de produção e isso deve-se ao facto de o automóvel híbrido apresentar maiores necessidades a nível material relativamente ao automóvel diesel. Estas últimas quatro categorias de impacte são consideradas pouco aceitáveis, pois é pouco o *background* científico e como tal os seus dados não podem ser considerados significativos [7].

Reveste-se também de grande importância analisar a etapa de normalização que nos permitiu observar a consistência dos resultados obtidos na fase de caracterização. Já vários estudos, como o projecto LIRECAR, apresentaram as categorias GWP, AP, EP e POPC como sendo as principais de fonte de intervenção, pois após normalizados, para além do ADP, estes foram os indicadores de desempenho ambiental que mostraram maior consistência nos resultados. Assim, observou-se que em ambos os automóveis as categorias de impacte para as quais existem maiores contribuições foram a depleção abiótica de combustíveis fósseis, o potencial de aquecimento global e o potencial de acidificação. O automóvel diesel apresentou em todas as categorias de impacte uma maior contribuição para o impacte ambiental comparativamente ao automóvel híbrido.

Após o desenvolvimento deste trabalho é possível responder às duas perguntas colocadas no início deste trabalho:

- Apresentará o veículo híbrido-diesel durante o seu ciclo de vida um melhor desempenho ambiental?

Com a realização deste trabalho foi possível verificar que esta nova solução de motorização de automóveis constitui um importante avanço tecnológico na medida em que, no seu global, apresenta um melhor desempenho ambiental. Quando comparado com outras soluções alternativas existentes no mercado este apresenta um avanço de tecnologia, pois permite uma potência elevada com redução de consumos e consequentemente redução de emissões poluentes. Os nossos resultados vêm de encontro a um estudo realizado em 2009 na Carnegie Mellon University em que se observou que quando comparado com um automóvel a gasolina convencional e/ ou um Plug-in Híbrido, este apresentava um melhor desempenho ambiental [64]. Além disso, a energia eléctrica utilizada por esta tecnologia é inteiramente gerada pelo motor de combustão interna, não causando qualquer impacto nas redes de abastecimento de energia eléctrica como é o caso dos Plug-in híbridos ou dos automóveis eléctricos [66].

- Será esta motorização uma solução para o futuro?

Esta solução de motorização poderá representar uma boa solução a curto prazo visto que apresenta várias vantagens comparativamente aos automóveis convencionais. Temos que ter em atenção que por um lado apresenta um pior desempenho ambiental aquando da produção mas por outro este irá ser compensado com a menor necessidade de combustível durante a utilização do automóvel, reduzindo a dependência da fonte esgotável de energia que é o petróleo.

Em suma, após a realização deste estudo de ACV, podemos concluir que o automóvel híbrido apresenta um desempenho ambiental superior comparativamente ao outro automóvel em estudo, o automóvel diesel. É de referir que a fase que maior impacto surte na ACV é a fase de utilização, em ambos os veículos. A redução de consumo por parte do veículo híbrido devido à utilização de energia eléctrica por ele gerada para alimentar o motor eléctrico e utilizá-lo para auxílio do motor de combustão marca um avanço tecnológico de extrema importância.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

A realização desta ACV permitiu-nos observar qual dos dois automóveis em estudo apresentava um melhor desempenho ambiental de uma forma generalizada. Permitiu também a percepção das vantagens trazidas por esta nova solução de motorização.

Contudo, este estudo está passível de melhoramentos futuros. Sendo assim, sugerem-se como desenvolvimentos futuros de forma a melhorar a qualidade desta ACV:

- A inclusão de uma importante fase, a de desmantelamento (fim de vida). Esta fase deverá ser incluída num futuro trabalho que o melhoraria numa perspectiva de cradle-to-grave.
- O transporte das matérias-primas para a fábrica, o transporte das peças entre fábricas, assim como todos os transportes associados à produção e distribuição de combustível, deverão ser incluídos garantindo o aumento da precisão do trabalho.
- Outra recomendação para o futuro seria a utilização de outro software de avaliação do ciclo de vida como o Simapro ou o GaBi visto serem duas soluções de ACV bastante desenvolvidas, com bases de dados próprias e com imensos processos incluídos.

7. Bibliografia

- 1 - Han X, Naeher LP. A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environment International*. 2006; 32: 106 - 120
- 2 - Arena M, Azzone G, Conte A. A streamlined LCA framework to support early decision making in vehicle development, *Journal of Cleaner Production*. 2013; 41: 105-113
- 3 - Sørensen B. *Life-Cycle Analysis of Energy Systems, from methodology to applications*, UK: RSC publishing; 2011. ISBN: 978-1-84973-145-4
- 4 - Instituto Português da Qualidade. NP EN ISO 14040 - Gestão ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e enquadramento, Caparica: IPQ; 2008.
- 5 - Instituto Português da Qualidade. NP EN ISO 14044 - Gestão ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e linhas de orientação, Caparica: IPQ; 2010.
- 6 - AT autoridade tributária e aduaneira. Manual estatística de impostos sobre veículos, AT. 2011;
- 7 - Daimler AG. Life cycle - Environmental certificate for the E 300 BlueTEC hybrid. Global Communications Mercedes-Benz Cars, Stuttgart; 2012
- 8 - Takeda A, Levantamento de métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e análise comparativa dos métodos mais utilizados. USP; 2008.
- 9 - Goedkoop M, Oele M, Schryver A, Vieira A. *SimaPro Database Manual Methods library*. Version 2.2, Netherlands: PRé Consultants; 2008.
- 10 - Maclean HL, Lave LB. Life Cycle Assessment of Automobile/Fuel Options, *Environ. Sci. Technol*. 2003; 37: 5445-5452
- 11 - Younga L, Liou Y, Cheng M, Luc J, Yangd H, Tsaie YI, Wangf L, Cheng C, Lai J. Effects of biodiesel, engine load and diesel particulate filter on nonvolatile particle number size distributions in heavy-duty diesel engine exhaust, *Journal of Hazardous Materials*. 2012;199-200: 282-289
- 12 - Zhenga M, Reader GT, Hawley JG. Diesel engine exhaust gas recirculation--a review on advanced and novel concepts, *Energy Conversion and Management*. 2004; 45: 883-900
- 13 - Fonseca N, Casanova J, Valdes M. Influence of the stop/start system on CO₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic, *Transportation Research Part D*. 2011; 16 (2): 194-200

- 14 - Contestabile M, Offer GJ, Slade R, Jaegerc F, Thoennes M. Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. Which will be the winner?, Energy Environ. Sci., 2011; 4: 3754-3772
- 15 - Crisóstomo P. Carros a gasóleo somam mais de 70% das vendas. [Web site] Jornal Publico; 2013 [updated 2013; Accessed 2013 22 October] Available from: <http://www.publico.pt/economia/noticia/carros-a-gasoleo-somam-mais-de-70-das-vendas-1609405>
- 16 - García I, Miguel LJ. Is the Electric Vehicle an Attractive Option for Customers?, Energies, 2012; 5: 71-91
- 17 - Mollenhauer K, Tschoeke H. Handbook of Diesel Engines, Germany: Springer -Verlag Berlin Heidelberg; 2010. ISBN 978-3-540-89082-9
- 18 - Department of Energy U.S. DOE Fundamentals Handbook, Mechanical Science, Volume 1 of 2, Washington, D.C.; 1993
- 19 - Bueno CAT, Antunes AHP, Mendonza OSH. Modeling and optimization of a turbo charged diesel engine to obtains a higher amount of energy from the exhaust gases, ABCM, 2011.
- 20 - Jornal Oficial da União Europeia. REGULAMENTO (CE) Nº 715/2007 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO - relativo à homologação dos veículos a motor no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 5 e Euro 6) e ao acesso à informação relativa à reparação e manutenção de veículos, 2007; L 171: 1-17
- 21- Europa Sínteses da legislação da EU. Redução das emissões poluentes dos veículos ligeiros. 2013 [updated 2013; cited 15 march 2014] Available from: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_pt.htm
- 22 - Encyclopædia Britannica, Inc. 2014 [cited 16 March 2014]. Available from: <http://media.web.britannica.com/eb-media/72/93572-034-26C16785.jpg>
- 23 - Emadi, A., L. Young-Joo, and K. Rajashekara. Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles., Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008; 55(6): 2237-2245
- 24 - Helms H, Pehnt M, Lambrecht U, LiebichA. Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions, 18th International Symposium Transport and Air Pollution, 2010; 113-275
- 25 - Amjada S, Neelakrishnan S, Rudramoorth R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010; 14: 1104-1110

- 26 - Khaligh A, Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, Vehicular technology, IEEE Transactions on, 2010. 59(6): 2806-20814
- 27 - Lukic SM, JianCao, Bansal RC, Rodriguez F, Emadi A. Energy Storage Systems for Automotive Applications, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008; 55(6): 2258-2267
- 28 - Hannana MA, Azidina FA, Mohamed A. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014; 29: 135-150
- 29 - Joshi RP, Deshmukh AP. Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution, IEEE, 2006; 1-6
- 30- CVEL Automotive Electronic Systems. Regenerative braking; [Accessed 2014 08 August]. Available from: http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/regenerative_braking.html
- 31 - Motorpress Lisboa - Auto Hoje. Novo sistema híbrido da Mercedes maximiza consumos; 2014 [cited 2014 22 April] Available from: <http://mercedes.autohoje.com>
- 32 - Pe-international sustainability performance. A brief history of Life Cycle Assessment (LCA); [cited 2014 07 June] Available from: <http://www.pe-international.com/company/newsroom/news-detail/article/a-brief-history-of-life-cycle-assessment-lca/>
- 33 - Vigon BW, Tolle DA, Cornaby BW, Latham HC, Harrison CL, Boguski TL, Hunt RG, Sellers JD. LIFE-CYCLE ASSESSMENT: INVENTORY GUIDELINES AND PRINCIPLES, Franklin Associates ltd, 1993;
- 34 - Ferreira JVR. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS, IPV, 2004;
- 35 - Finkbeiner M, Inaba A, Tan RBH, Christiansen K, Klüppe H. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044, Int J LCA, 2004; 11(2): 80-85
- 36 - eTool. Why life cycle assessment. [Web page]. [Accessed 2014 09 May]. Available from: <http://etool.net.au/why-life-cycle-assessment/>
- 37 - Fórum of sustainability Draft. Informações ambientais sobre o CICLO DE VIDA dos produtos utilizados quotidianamente pelas famílias, 2010.
- 38 - Projeto de Avaliação do Ciclo de Vida do IBICT. *Uso nas Empresas – Avaliação do Ciclo de Vida.* [Web page] Brasil. [Accessed 2014 10 May]. Available from: <http://acv.ibict.br/uso>
- 39 - Universiteit Leiden. An operational guide to the ISO-standards- Part 3: Scientific background, 2001.

- 40- JRC-IES. ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2010
- 41 - Sleswijk AW, Oers LFCM, Guinée JB, Struijs J, Huijbregts MAJ. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 2008; 390: 227-240
- 42 - PRé Sustainability. Simapro software. [Web page] Netherlands. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.pre-sustainability.com/simapro>
- 43 - PE International. GaBi Software. [Web page] Germany. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.gabi-software.com/international/index/>
- 44 - Green Delta. Open LCA Software. [Web page] Germany. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.openlca.org/>
- 45 - Green Delta. e-Dea LCA Software. [Web page] Germany. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.edea-software.com/en>
- 46 - Ifu hamburg. Umberto LCA Software. [Web page] Germany. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.umberto.de/en/>
- 47 - Quantis sustainability counts. Quantis 2 LCA Software. [Web page] Switzerland. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.quantis-intl.com/software.php>
- 48 - PRé-Consultants. Eco it LCA Software. [Web page] Netherlands. [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://eco-it.software.informer.com/>
- 49 - Green Delta. Earthster 2 Turbo LCA Software. [Web page] Germany [Accessed 2014 03 February]. Available from: <http://www.earthster.org/content/earthster-solution>
- 50 - Althaus H, Bauer C, Doka G, Dones R, Hischier R, Hellweg S, Humbert S, Köllner T, Loerincik Y, Margni M, Nemecek T. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories; 2007 [cited: 2014 23 June] Available from: http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03_LCIA-Implementation.pdf
- 51 - Mota SP. Automóvel híbrido da Mercedes é o mais vendido em Portugal. [Web page] Lisboa: Económico; 2014 [updated 2014 22 April; cited 2014 26 June]. Available from: http://economico.sapo.pt/noticias/automovel-hibrido-da-mercedes-e-o-mais-vendido-em-portugal_191626.html
- 52 - Staffell I. The Energy and Fuel Data Sheet, University of Birmingham, UK; 2011 [Accessed: 2014 23 June] Available from: http://wogone.com/science/the_energy_and_fuel_data_sheet.pdf

- 53 - Instituto nacional de estatística. Indicadores Económico-ambientais - Conta das Emissões Atmosféricas, INE informação à comunicação social, 2012;
- 54 - Dias BB, Leite ML, Farago PV, Oliveira AV, Beruski GC. Sulfur effect by simulated acid rain on morphophysiological parameters of the bean plant, *Acta Sci., Agron.* (Online), 2012; 32(3)
- 55 - ISP - Parque automóvel seguro. Ano de construção do veículo; 2013 [cited 2014 17 July]. Available from: http://www.isp.pt/Estatisticas/seguros/estatisticas_anuais/parque_automovel/ano_construcao/ano_construcao.htm
- 56 - Garcia R, Freire F. Dynamic Fleet-based LCA of electric vehicle systems. Center for industrial ecology. Workshop: Discussion fórum on industrial ecology and life-cycle management, April 2014
- 57 - Zackrisson M, Avellán L, Orlenius J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicle - Critical issues, *Journal of Cleaner Production*, 2010; 18: 1519-1529
- 58 - Daimler AG. Mercedes-Benz Sindelfingen Plant. [Accessed 2013 23 January]. Available from: <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1037141-1-1333121-1-0-0-1363599-0-0-0-7145-0-0-0-0-0-0-0.html>
- 59 - Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, Schmidt WP, Suh S, Weidema BP, Pennington DW. Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, *Environment International*, 2004; 30: 701-720
- 60 - Acero AP, Rodríguez C, Ciroth A. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. Berlin: Green Delta; 2014 [Accessed 2014 28 July]. Available from: <http://www.openlca.org/documents/14826/2c5b8391-68d9-49a1-b460-a94f18e7d2df>
- 61 - LIRECAR. NEW MATERIALS AND ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR FUTURE LIGHTWEIGHT VEHICLES". European commission; 2003. Available from: http://ec.europa.eu/research/transport/pdf/turin1009_1640_en.pdf
- 62 - MacLean HL, Lave LB, Lankey R, Joshi S. A Life-Cycle Comparison of Alternative Automobile Fuels, *Air & Waste Management Association*. 2000; 50: 1769-1779
- 63- Campanari S, Manzolini G, Iglesia FG. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations, *Journal of Power Sources*. 2009; 186: 464-477
- 64 - Samaras C, Meisterling K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy, *Environ. Sci. Technol.* 2008; 42: 3170-3176

65 - Boureima F, Messagie M, Matheys J, Wynen V, NeleSergeant, Mierlo JV, Vos M, Caevel B. Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context, [serial on the Internet]. 200 [cited 2014 8 September] Available from: <http://www.evs24.org/wevajournal/>

66 - Sioshansia R, Fagianib R, Maranoc V. Cost and emissions impacts of plug-in hybrid vehicles on the Ohio power system, Energy Policy. 2010; 38: 6703-6712

8. Anexos

8.1 Catálogo de especificações dos automóveis

Characteristic	E 200 CDI Blue EFFICIENCY	E 220 CDI Blue EFFICIENCY	E 250 CDI Blue EFFICIENCY	E 300 CDI Blue EFFICIENCY	E 300 BlueTEC HYBRID	E 350 BlueTEC	E 350 CDI Blue EFFICIENCY
Engine type	Diesel engine	Diesel engine	Diesel engine	Diesel engine	Diesel engine	Diesel engine	Diesel engine
Number of cylinders	4	4	4	6	4	6	6
Displacement (effective) [cc]	2143	2143	2143	2987	2143	2987	2987
Output [kW]	100	125	150	170	150+20****	155	195
Transmission manual	x	x	x	x	x	x	x
Transmission automatic	Optional	Optional	Optional				
Emissions standard (fulfilled)	EU 5	EU 5	EU 5	EU 5	EU 5	EU 6	EU 5
Weight (w/o driver and luggage) [kg]	1645*/1660	1660*/1660	1660*/1660	1760	1770	1770	1770
Exhaust emissions [g/km]							
CO ₂ :	141-134*/141-134	139-130*/138-129	139-130*/138-129	159-153	112-109	188-180	159-153
NO _x :	0.154*/0.157	0.17*/0.146	0.017*/0.146	0.147	0.158	0.054	0.147
CO:	0.268*/0.068	0.21*/0.054	0.21*/0.054	0.303	0.248	0.178	0.303
THC: (petrol engine)	-	-	-	-	-	-	-
NMHC: (petrol engine)	-	-	-	-	-	-	-
THC+NO _x : (diesel engine)	0.172*/0.168	0.183*/0.156	0.183*/0.156	0.190	0.181	0.073	0.190
PM:(diesel and direct petrol injection)	0.0003*/0.0001	0.0003*/0.0002	0.0003*/0.0002	0.0016	0.0002	0.0007	0.0016
Fuel consumption NEDC combined [l/100 km]	5.4-5.1*/5.4-5.1	5.3-5.0*/5.3-4.9	5.3-5.0*/5.3-4.9	5.8-6.1	4.3-4.2**	7.2-6.8	6.1-5.8
Driving noise [dB(A)]	74*/70	74*/71	73*/71	71	71	72	71

8.2 Estudo Jornal Público e ACAP

