

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Dissertação de Mestrado em Tecnologia e Gestão do Ambiente



Avaliação de sistemas de recolha e transporte de Resíduos Sólidos Urbanos:

Eficiência energética e emissões poluentes

Nélia Isabel Pereira Oliveira

Júri

Presidente: Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Orientadores: Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire

Engenheiro João Miguel Vaz

Vogal: Professor Doutor José Joaquim da Costa

MARÇO 2009

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Fausto Freire e ao Engenheiro João Vaz, orientadores da tese, pela constante disponibilidade, auxílio, dedicação e orientação, pela insistência nos pormenores, que se revelaram cruciais ao longo de toda a realização deste trabalho.

Aos meus Pais, pela dedicação e esforço que revelaram ao longo de todo o meu percurso académico. Sem vós, com toda a certeza, não teria chegado até aqui e ao usufruto desta experiência fundamental para o meu crescimento tanto profissional como pessoal. A vós vos devo o que sou e onde cheguei hoje. Muito Obrigada!

Ao meu namorado, pelo companheirismo, pelo incentivo, por ter estado sempre presente nesta fase tão importante da minha vida, por me ter apoiado quando mais precisei. Não há palavras para descrever o meu agradecimento.

Aos meus amigos de sempre... Cristina Monteiro, Luísa Monteiro, Carina Oliveira, Rui Reis, Ana Patrícia Saraiva, Ana Marques. Um grande pedido de desculpas pela minha ausência nas últimas semanas e um enorme Obrigada por todo o apoio prestado e pela contínua preocupação.

À Fátima Barbosa, Inês Quadros, Élio Ferreira... os meus AMIGOS de curso e companheiros de estudo. Obrigada por tudo o que me ensinaram e por todos os momentos que partilhámos nos últimos anos. Ficarão para sempre guardados na minha memória.

Aos colegas de Mestrado por todos os momentos de trabalho, companheirismo, partilha de saberes, amizade e diversão.

A todos os outros, não mencionados, que de uma forma ou de outra tornaram possível esta experiência.

A todos um grande e profundo Obrigada!

RESUMO

Os RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) são uma consequência inevitável da vida moderna, tendo vindo a crescer em quantidade, bem como a modificar-se em composição e características, acompanhando a evolução humana. Após a deposição em contentor, os RSU são recolhidos pelas entidades responsáveis, as quais os encaminham para os diversos destinos finais. A recolha é efectuada recorrendo a um serviço baseado em veículos que, no geral, possuem motores diesel e emitem gases poluentes. O transporte urbano representa uma percentagem muito importante do sector dos transportes na sua globalidade, influenciando quer nos parâmetros de qualidade do ar (CO, HC, NO_x, PM) e na poluição local, quer nas alterações climáticas (emissões de CO₂).

O trabalho desenvolvido teve como principal objectivo calcular e avaliar as emissões de CO₂ associadas à recolha e transporte. Os dados iniciais utilizados (distância percorrida, quantidade de gasóleo gasta e quantidade de RSU recolhida) são provenientes de quatro autarquias de média dimensão situadas entre o Douro e o Tejo. As emissões de CO₂ foram estimadas considerando uma perspectiva de ciclo de vida. Um outro objectivo consistiu na identificação e avaliação de oportunidades de melhoria, no sentido de elevar a eficácia energética e ambiental da recolha. Para isso, consideram-se três propostas de melhoria distintas. A primeira consistirá na comparação entre combustíveis (gasóleo e biodiesel), ocorrendo alteração do tipo de combustível. A segunda proposta basear-se-á na comparação de combustíveis (gasóleo e gás natural, GN), mas com alteração da tecnologia motora dos veículos (motor ciclo Diesel e motor ciclo *Otto*). Por fim, a última proposta consistirá na realização do estudo tendo em consideração a optimização dos circuitos, elaborada pela empresa ECOGESTUS Lda., estimando as emissões poluentes. Deste modo, pretende-se verificar, com base nos resultados obtidos, a eficácia dessas medidas em termos económicos e ambientais (Gases com Efeito de Estufa, GEE), quantificando o impacto da recolha de RSU, em termos de poluição do ar e consumos energéticos associados.

Concluiu-se que, das propostas de melhoria avaliadas todas apresentam benefícios ambientais, mas a optimização dos circuitos demonstrou os maiores benefícios ambientais (emissões evitadas na ordem dos 43%) e benefícios económicos bastante elevados.

As emissões de GEE poderão ser bons indicadores de desempenho das autarquias: quanto mais variados forem os parâmetros que condicionam a eficiência do sistema de recolha

(orografia e ocupação do território, idade dos veículos, organização da recolha) maior é o seu peso em termos ambientais, ou seja, maior será a quantidade de emissões de CO₂ libertada.

Dos combustíveis comparados (gasóleo e biodiesel), o gasóleo é o combustível que provoca mais emissões de CO₂ na recolha e transporte de RSU. Verificou-se que a sua substituição por biodiesel contribui significativamente para a diminuição das emissões de GEE e que essa diminuição é mais significativa consoante o aumento da percentagem de biodiesel na mistura. A partir da análise económica concluiu-se que a compra de um veículo novo a GN não é viável economicamente. No entanto, a nível ambiental pode-se evitar até cerca de 16% de emissões de CO₂ por ano.

Palavras – Chave: Emissões poluentes, Gasóleo, Combustíveis alternativos, RSU, Recolha e transporte.

ABSTRACT

MSW (Municipal Solid Waste) are considered an inevitable consequence of recent life; they have been growing in quantity, as they have also been modified in composition and characteristics, accompanying the human evolution. After deposition in containers, MSW are collected by the responsible entities, which lead them to different final destinations. The collection is made by a service based on vehicles usually with diesel engines that expel pollutant emissions to the air. Urban transport represents a very important percentage of the transportations sector in its whole, influencing not only air's quality parameters (CO, HC, NO_x, PM) and local pollution, but also climate changes (CO₂ emissions).

The research done has as a main goal to calculate and evaluate the CO₂ emissions in the collection and transportation of MSW (until its first destination - earthwork). The initial data used (distance travelled, diesel quantity spent and amount of MSW collected) are from four medium-sized municipalities located between Douro and Tejo. CO₂ emissions were estimated using the prospect of life cycle. One other purpose consists of the identification and evaluation of opportunities of improvement, in order to improve energy and environmental performance of the collection of MSW in the four municipalities studied. So, there are three different proposals for improvement. One will be about the comparison between fuels (diesel and biodiesel), with change occurring in the fuel type. Other completely different proposal will be the comparison of fuels (diesel and natural gas, NG), but for these ones it is necessary to change the vehicle (Diesel cycle engine and *Otto* cycle engine). In the end, the last proposal will be to do the study having in mind the optimization of the circuits, made by the company ECOGESTUS Lda., and estimating the pollutant emissions. This way, it is intended to verify, based on the obtained results, the efficacy of these measures in economical and environmental terms (Greenhouse Gas, GHG), quantifying the impact of MSW collection in terms of air pollution and energetic consumption associated to it.

It was concluded that all of the proposals of improvement evaluated show environmental benefits, but the optimization of the circuits showed the largest environmental (43% avoided emissions) and economic benefits.

The GHG emissions could be good indicators of the performance of the municipalities: the more varied are the parameters that condition the efficiency of the system are (orography and territory occupancy, vehicle's age, residual type, collecting organization),

the bigger is its weight in environmental terms, that is, the amount of CO₂ emissions released is bigger.

From the compared fuels (diesel and biodiesel), diesel is the one that causes more CO₂ emissions in the collection and transportation of MSW. It was verified that its replacement with biodiesel largely contributes to the decrease of GHG emissions and that reduction is more significant according to the increase in the percentage of biodiesel in the blend. From the economical analysis it was concluded that the purchase of a new NG vehicle isn't economically viable. However, in environmental terms, this can avoid up to 16% of CO₂ emissions a year.

Keywords: Pollutant emissions, Diesel, Alternative fuels, MSW, Collection and transport.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

<i>ÍNDICE DE TABELAS</i>	iii
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	v
<i>ÍNDICE DE GRÁFICOS</i>	vi
<i>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</i>	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos	2
1.2. Plano Geral da Dissertação	3
2. CASOS DE ESTUDO: RECOLHA DE RSU EM QUATRO AUTARQUIAS	4
2.1. Recolha de RSU	5
2.1.1. Caracterização dos veículos	6
2.1.2. Eficiência do sistema	8
2.2. Caracterização dos casos de estudo	12
2.3. Consequências na saúde	22
2.4. Propostas para melhoria da recolha de RSU	23
2.4.1. Alteração do tipo de combustível	23
2.4.2. Alteração da tecnologia motora dos veículos	23
2.4.3. Optimização dos circuitos de recolha	24
3. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MELHORIA	25
3.1. Alteração do tipo de combustível	25
3.1.1. Gasóleo	27
3.1.2. Biodiesel a 30% (B30)	32
3.1.3. Biodiesel a 100% (B100)	35

3.1.4.	Comparação entre combustíveis (Gasóleo, B30 e B100).....	38
3.2.	Alteração da tecnologia	41
3.2.1.	Análise Económica do Investimento.....	41
3.2.2.	Análise ambiental.....	42
3.3.	Optimização dos circuitos de recolha.....	44
4.	CONCLUSÕES	46
4.1.	Limitações do estudo e Trabalhos futuros.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características dos veículos.....	6
Tabela 2 – Caracterização dos veículos.	10
Tabela 3 – Modelo geral adoptado de Indicadores de Desempenho para o Sistema.	13
Tabela 4 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. A.....	14
Tabela 5 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. B.....	15
Tabela 6 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. C.....	16
Tabela 7 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. D.....	17
Tabela 8 – Principais poluentes atmosféricos.	22
Tabela 9 – Emissões de GEE e necessidade energética desde o petróleo bruto até ao abastecimento de gasóleo.	27
Tabela 10 – Emissões totais de CO ₂ tendo em atenção a ACV do gasóleo.	28
Tabela 11 – Emissões de CO ₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia A.	28
Tabela 12 – Emissões de CO ₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia B.....	29
Tabela 13 – Emissões de CO ₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia C.....	29
Tabela 14 – Emissões de CO ₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia D.	30
Tabela 15 – Emissões de GEE e necessidade energética para o biodiesel.....	32
Tabela 16 – Resumo das emissões de CO ₂ para o combustível B30.	33
Tabela 17 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia A.	34
Tabela 18 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia B.	34
Tabela 19 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia C.	35
Tabela 20 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia D.	35

Tabela 21 – Resumo das emissões de CO ₂ para o combustível B100.	36
Tabela 22 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia A.	36
Tabela 23 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia B.	37
Tabela 24 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia C.	37
Tabela 25 – Emissões totais de CO ₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia D.	37
Tabela 26 – Emissões evitadas de CO ₂ (kg CO _{2-eq}) relativamente ao combustível gasóleo... 39	
Tabela 27 – Lucro estimado na comparação gasóleo vs biodiesel.	40
Tabela 28 – Consumo médio, preço dos combustíveis e custo por quilómetro dos dois veículos novos.	41
Tabela 29 – Período de retorno comparando o veículo novo a gasóleo com o veículo novo a GN.	42
Tabela 30 – Emissões totais de CO ₂ tendo em atenção a ACV do GN.	42
Tabela 31 – Emissões de CO ₂ tendo em conta a utilização do veículo a GN.	43
Tabela 32 – Emissões de CO ₂ evitadas por autarquia, utilizando um veículo a GN.	43
Tabela 33 – Emissões de CO ₂ tendo em consideração a optimização dos circuitos.	44
Tabela 34 – Emissões de CO ₂ evitadas por autarquia com optimização dos circuitos.	44
Tabela 35 – Lucro estimado com a optimização dos circuitos.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Veículo de recolha de RSU indiferenciados.....	5
Figura 2 – Recolha por pontos.	5
Figura 3 – Processo de combustão ideal e real num motor de combustão interna.....	26

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação entre a idade dos veículos e a sua distância percorrida.....	7
Gráfico 2 – Eficiência na recolha de RSU por veículo.	9
Gráfico 3 – Eficiência na recolha de RSU por autarquia.	9
Gráfico 4 – Comparação entre a idade dos veículos e a eficiência do sistema.	11
Gráfico 5 – Capitação diária nas autarquias em estudo.....	19
Gráfico 6 – Capacidade de deposição de RSU disponível.	19
Gráfico 7 – Indicadores de Consumo das quatro autarquias.	20
Gráfico 8 – Indicadores Operacionais das quatro autarquias.	21
Gráfico 9 – Total de emissões de CO ₂ nas diferentes autarquias.....	30
Gráfico 10 – Comparação entre a idade dos veículos e o total de emissões de CO ₂ emitidas	31
Gráfico 11 – Comparação entre a eficiência da recolha e as emissões de CO ₂ por quantidade de RSU recolhida.	32
Gráfico 12 – Emissões de CO ₂ por cenários considerados.	38
Gráfico 13 – Emissões de CO ₂ associadas aos combustíveis em estudo.	39
Gráfico 14 – Comparação das emissões de CO ₂ , sem otimização e com otimização.....	45

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

µm	– Micrómetro
ACV	– Avaliação de Ciclo de Vida
C	– Carbono
CO	– Monóxido de carbono
CO₂	– Dióxido de carbono
CO₂-eq	– CO ₂ equivalente: expressão do GWP em termos de CO ₂ para os componentes CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O, com base nos factores de ponderação do IPPC
g	– Grama
GEE	– Gases com Efeito de Estufa
GN	– Gás natural
GWP	– <i>Global Warming Potential</i>
h	– Hora
hab.	– Habitante
HC	– Hidrocarbonetos
H₂O	– Água
ID's	– Indicadores de Desempenho
IPCC	– Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas
kg	– Quilograma
km	– Quilómetro
l	– Litro
MJ	– Megajoule
N	– Azoto
NO_x	– Óxidos de azoto
PBT	– <i>Payback Time</i> (Tempo de Retorno): período de tempo necessário para a recuperação de um investimento
PCI	– Poder calorífico inferior
PM₁₀	– Partículas em suspensão com diâmetro inferior a 10 µm
RME	– <i>Rapeseed Methyl Éster</i> (Éster metílico de colza)
RSU	– Resíduos Sólidos Urbanos
S	– Enxofre
ton	– Tonelada

1. INTRODUÇÃO

Todas as actividades humanas implicam a produção de resíduos, os quais assumem diversas categorias conforme a sua composição, sendo que quase todos independentemente da proveniência implicam tratamento. Em meio urbano, a categoria de resíduos produzida é a de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), compostos por desperdícios das diversas actividades que se desenvolvem em aglomerados como a habitação, o comércio e os serviços. Estes resíduos têm uma composição multimaterial, desde matéria orgânica, passando pelo papel, vidro e também pelos vários tipos de plástico. Assim, sempre que se escrever RSU refere-se a resíduos indiferenciados.

A primeira fase pela qual passam os RSU é a deposição, seguida da sua recolha pelas entidades responsáveis, as quais os encaminham para os diversos destinos finais disponíveis. A deposição e a recolha de RSU são as fases mais sentidas pelos cidadãos, uma vez que os resíduos costumam ser acumulados em contentores na via pública junto das habitações, de onde são recolhidos por veículos ruidosos em horário diurno ou nocturno. A recolha é efectuada recorrendo a um serviço baseado em veículos que transportam os RSU até ao destino final (Estação de Transferência, Aterro, Incinerador, Estação de Tratamento Mecânico Biológico).

Mais de 75% da população da União Europeia vive em zonas urbanas. O transporte urbano representa, portanto, uma percentagem muito importante do sector dos transportes na sua globalidade, influenciando quer nos parâmetros de qualidade do ar (monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de azoto, partículas, precursores do ozono) e, portanto, na poluição local, quer nas alterações climáticas (emissões de dióxido de carbono, CO₂) (PCESE, 2006).

Durante o último século, os combustíveis derivados do petróleo foram a maior fonte de energia mundial nos transportes. No entanto, devido a questões ambientais e económicas, têm sido procurados outros tipos de energia alternativa dando particular atenção a fontes de energia renováveis. Fruto do significativo aumento do preço do barril de petróleo e das crescentes preocupações de natureza ambiental, os biocombustíveis – combustíveis líquidos ou gasosos produzidos a partir de produtos e resíduos provenientes da agricultura, assim como da fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos – vêm sendo promovidos como substitutos dos combustíveis com origem no petróleo, para o sector dos transportes. Os biocombustíveis de utilização mais generalizada são o bioetanol e o biodiesel. O biodiesel, em particular, é normalmente produzido a partir de óleos vegetais, óleos animais e óleos de

frituras reciclados. A ideia de recorrer a óleos vegetais como combustível para o sector dos transportes remonta já ao século XIX, quando Rudolf Diesel desenvolveu o primeiro motor de ignição por compressão para esse efeito. Em virtude das propriedades semelhantes às do gasóleo, o biodiesel pode ser utilizado em mistura com o gasóleo convencional ou queimado directamente como biodiesel puro sem modificações significativas ao nível do motor. Em particular, o óleo de colza, fruto do seu baixo teor em ácidos gordos saturados, permite produzir um biocombustível de elevada qualidade – RME (*Rapeseed Methyl Éster*) –, com as propriedades adequadas aos climas europeus (Puppán, 2002).

1.1. Objectivos

O aumento da pressão dos preços dos combustíveis, associado às exigências de qualidade do ar e diminuição de emissões de CO₂, coloca novos desafios às entidades responsáveis pela gestão de RSU. O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como principal objectivo calcular e avaliar as emissões de CO₂ associadas à recolha e transporte de RSU. Os dados iniciais utilizados (distância percorrida, quantidade de gasóleo gasta e quantidade de RSU recolhida) são provenientes de quatro autarquias de média dimensão situadas entre o Douro e Tejo.

Um outro objectivo consiste na identificação e avaliação de oportunidades de melhoria, no sentido de melhorar a performance energética e ambiental da recolha de RSU. Para isso, consideram-se três propostas de melhoria distintas. A primeira proposta consistirá na comparação entre combustíveis (gasóleo e biodiesel), ocorrendo alteração do tipo de combustível. A segunda proposta basear-se-á na comparação de combustíveis (gasóleo e gás natural), mas com alteração da tecnologia motora dos veículos (motor ciclo Diesel e motor ciclo *Otto*). Por fim, a última proposta consistirá na realização do estudo tendo em consideração a optimização dos circuitos, elaborada pela empresa ECOGESTUS Lda., estimando as emissões poluentes. Deste modo, pretende-se verificar, com base nos resultados obtidos, a eficácia dessas medidas em termos económicos e ambientais, quantificando o impacto da recolha de RSU, em termos de poluição do ar e dos consumos energéticos associados.

1.2. Plano Geral da Dissertação

A presente dissertação encontra-se sistematizada em 4 capítulos, resumidos de seguida para melhor orientação do leitor. O capítulo 1, “Introdução”, apresenta uma breve introdução ao tema e descreve os objectivos propostos do trabalho. O capítulo 2, “Casos de Estudo: recolha de RSU em quatro autarquias”, está dividido em três secções que abordam, de forma mais específica, a recolha nas quatro autarquias, a caracterização dos casos de estudo e as propostas de melhoria da recolha de RSU. As propostas de melhoria têm por base a alteração do tipo de combustível, a alteração da tecnologia motora dos veículos e a optimização dos circuitos de recolha. O capítulo 3, “Avaliação do Potencial de Melhoria”, descreve a forma como foram determinadas as emissões de CO₂, nas três propostas de melhoria consideradas na secção anterior. São também apresentados os resultados provenientes da avaliação dessas propostas de melhoria, em termos energéticos e ambientais. Este capítulo encontra-se dividido em três secções. Em cada secção é exposta uma proposta de melhoria. Assim, é feita a comparação entre o gasóleo convencional e o biodiesel com diferentes misturas (B30 e B100), em veículos cuja alteração ocorre unicamente no tipo de combustível. Depois é elaborada uma análise económica, tratando de uma situação completamente diferente, onde são comparados dois veículos com motores diferentes utilizando combustíveis diferentes (gasóleo e gás natural). Por fim, são calculadas as emissões tendo em consideração a optimização dos circuitos nas autarquias. O capítulo 4, “Conclusões”, elabora uma síntese do trabalho realizado, apresentando conclusões de índole geral, delineadas a partir da análise dos resultados obtidos e algumas propostas de trabalho futuro. Por último, são apresentadas as “Referências Bibliográficas”, que indicam a literatura consultada que serviu de suporte à elaboração desta dissertação.

2. CASOS DE ESTUDO: RECOLHA DE RSU EM QUATRO AUTARQUIAS

Em Portugal, a recolha de RSU enquadra-se no estipulado pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, onde é referido, no seu artigo 5.º, que a gestão do resíduo constitui parte integrante do seu ciclo de vida, sendo da responsabilidade do respectivo produtor, sendo excepção os resíduos urbanos cuja produção diária não exceda 1100 litros por produtor, caso em que a respectiva gestão é assegurada pelos municípios.

A recolha de RSU é uma das fases da gestão de resíduos, garantida por um Sistema de Gestão de RSU, ou seja, uma estrutura composta por recursos humanos, meios logísticos, equipamentos e infra-estruturas, estabelecida para levar a cabo as operações inerentes à mesma. Os veículos de recolha e transporte de RSU são geralmente movidos a gasóleo e emitem uma quantidade significativa de poluentes, nomeadamente CO₂, NO_x e PM₁₀ (Bentes, 2006). A recolha e o transporte implicam um trabalho de risco elevado, uma vez que os trabalhadores estão em contacto com substâncias susceptíveis de contaminação biológica, perigosas e, também, com as emissões poluentes provenientes do veículo de transporte.

A consulta de literatura mostrou que muitos trabalhos têm sido feitos sobre cálculo das emissões poluentes nos transportes em geral. No entanto, estudos relativamente à recolha e transporte de RSU são ainda relativamente escassos.

Este capítulo encontra-se dividido em três secções abordando a recolha de RSU, a caracterização dos casos de estudo e as consequências da poluição na saúde humana.

2.1. Recolha de RSU

No corrente caso de estudo, a recolha praticada nas quatro autarquias é a recolha indiferenciada por pontos, uma vez que as autoridades municipais definem o tipo de resíduos a recolher (domésticos e equiparados) e os locais da recolha. A **recolha indiferenciada** é considerada pela remoção dos RSU todos misturados. É executada segundo horários e circuitos pré-estabelecidos, dependendo das características do meio rural ou urbano, do tipo de resíduos e das condições climáticas (Martinho e Gonçalves, 2000) (**Figura 1**).



Figura 1 – Veículo de recolha de RSU indiferenciados.

(Fonte: Autor)

A **recolha por pontos** ou contentores de proximidade é caracterizada pela remoção efectuada em pontos pré-estabelecidos pela autarquia, cabendo aos munícipes a colocação dos RSU nos contentores (**Figura 2**) (Levy e Cabeças, 2006).



Figura 2 – Recolha por pontos.

(Fonte: Autor)

2.1.1. Caracterização dos veículos

Para proceder à caracterização dos veículos, teve-se em atenção as principais características dos mesmos, como por exemplo a marca, o ano de fabrico, a tara, etc. Como se pode verificar através da **Tabela 1**, os veículos apresentam algumas diferenças entre si.

Tabela 1 – Principais características dos veículos.

Aut.	Veículo	Marca	Ano	Tara (kg)	Capacidade Máx. (kg)	Distância (km)	Norma Europeia (*)
A	1	Volvo	2000	6380	3500	6138	Euro 3
	2	Mercedes Benz	1995	10900	5500	14215	Euro 1
	3	Mercedes Benz	1999	11060	6000	12642	Euro 2
	4	Mercedes Benz	1999	11300	6500	8231	Euro 2
	5	Toyota	1999	5420	1250	8952	Euro 2
B	1	Mercedes Benz	1990	12160	19000	14309	-
	2	Man	1999	12900	26000	30164	Euro 2
	3	Man	1999	12560	26000	15218	Euro 2
	4	Scania	1999	12000	19000	16091	Euro 2
C	1	Mercedes Benz	1997	9780	9200	24512	Euro 2
	2	Mercedes Benz	1993	9400	7000	29239	Euro 1
	3	Mercedes Benz	2001	10370	7000	32958	Euro 3
	4	Mercedes Benz	1988	9180	6800	23917	-
	5	Mercedes Benz	2004	10370	6500	38647	Euro 3
D	1	Mitsubishi	2003	5460	3250	11903	Euro 3
	2	Mercedes Benz	1999	11680	10500	18972	Euro 2
	3	Volvo	1992	10740	8000	18135	-

(*) Fonte: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>.

A autarquia A é a que apresenta veículos com menor intervalo de idades e a autarquia C apresenta a maior diferença entre os anos dos veículos. No entanto, a média de idades entre as autarquias é aproximadamente igual, ou seja, de 11 a 12 anos. A autarquia B é a que apresenta os veículos com maior tara e capacidade. É de salientar que através do ano de fabrico dos veículos é possível ver a qual Norma Europeia corresponde e, assim, ver qual o limite máximo de emissões permitido por essas normas. Os veículos têm uma semelhança entre si, que consiste no tipo de utilização como recolha de RSU.

Fazendo uma análise comparativa entre a idade dos veículos em cada autarquia e a distância percorrida pelos mesmos, o resultado é o apresentado no **Gráfico 1**.

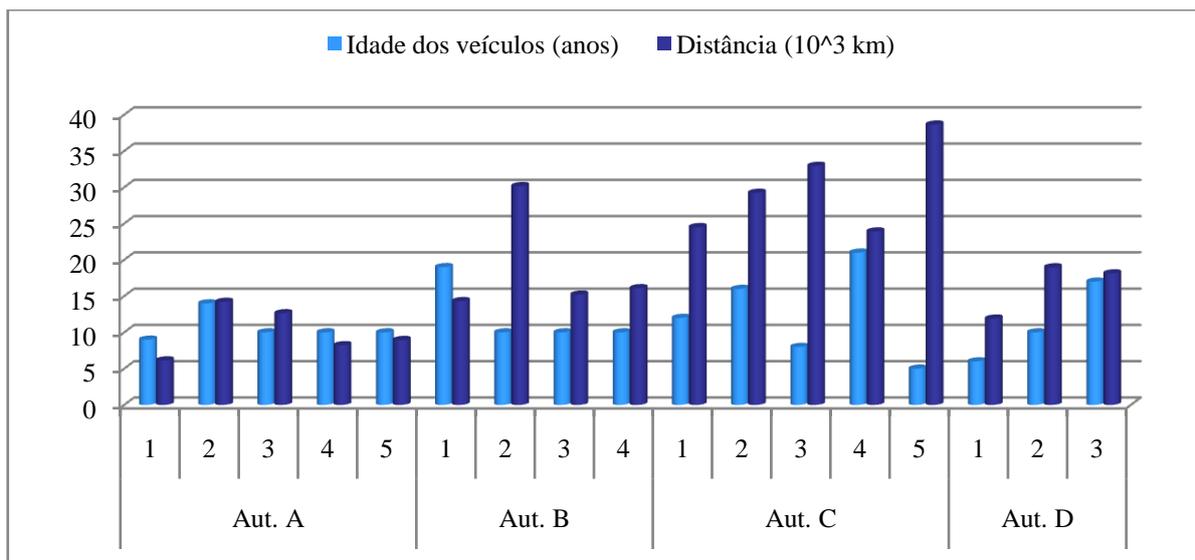


Gráfico 1 – Comparação entre a idade dos veículos e a sua distância percorrida.

De uma forma geral, os veículos com menor idade são os utilizados para percorrer as maiores distâncias, como é bastante visível nas autarquias B e C. Também, se se considerar veículo novo até aos 10 anos inclusive, na totalidade da distância percorrida por cada autarquia, os veículos mais velhos percorrem menos quilómetros, ou seja, na autarquia A 28% de todo o percurso é realizado por veículos com idade superior a 10 anos. As autarquias B e D apresentam, respectivamente, o valor de 19% e 37% de utilização dos veículos mais velhos. Na autarquia C, verifica-se o maior valor de utilização dos veículos mais antigos, percorrendo estes cerca de metade da distância total (52%). Sendo a idade e a distância percorrida, juntamente com outros, factores que influenciam os consumos dos veículos, será de prever que os veículos mais antigos e que percorram maiores distâncias apresentem um valor mais elevado de emissões poluentes.

Ao realizarem a recolha, os veículos das autarquias para cumprirem o seu circuito, gastam uma quantidade de gasóleo. Esses valores são apresentados na **Tabela 2**, onde a distância corresponde aos quilómetros que cada veículo percorre e o gasóleo equivale à quantidade de litros gastos nesses quilómetros. A quantidade de RSU considerada, em toneladas de resíduos, corresponde ao recolhido durante um ano para um determinado veículo.

2.1.2. Eficiência do sistema

Os indicadores mais relevantes para caracterizar a eficiência da recolha de RSU são os seguintes:

- quantidade de gasóleo gasto por tonelada de RSU recolhida (l/ton),
- quantidade de gasóleo consumido por quilómetro percorrido (l/km),
- distância percorrida por tonelada de RSU recolhida (km/ton).

Como é possível visualizar através da **Tabela 2**, os valores mais elevados encontram-se nas autarquias C e B, respectivamente para os dois primeiros parâmetros referidos (l/ton e l/km). O outro indicador utilizado para verificar a eficiência do sistema de recolha de RSU é a razão entre o número de quilómetros percorridos e as toneladas de RSU recolhidas (km/ton), **Gráfico 2**. Desta forma, quanto maior a relação km/ton, menor é a eficiência na recolha. Mas existem parâmetros que condicionam fortemente a eficiência:

- orografia;
- tipo de ocupação urbana, zonas rurais versus urbanas citadinas;
- idade do veículo de recolha;
- organização da recolha (se o carro vai totalmente cheio ou vazio para a descarga, o grau de enchimento dos contentores; número de pontos de paragem; hora do dia e tráfego).

As diferenças entre veículos da mesma autarquia dependem da rota que fazem, isto é, dos circuitos urbanos e rurais, dependendo da distância entre contentores.

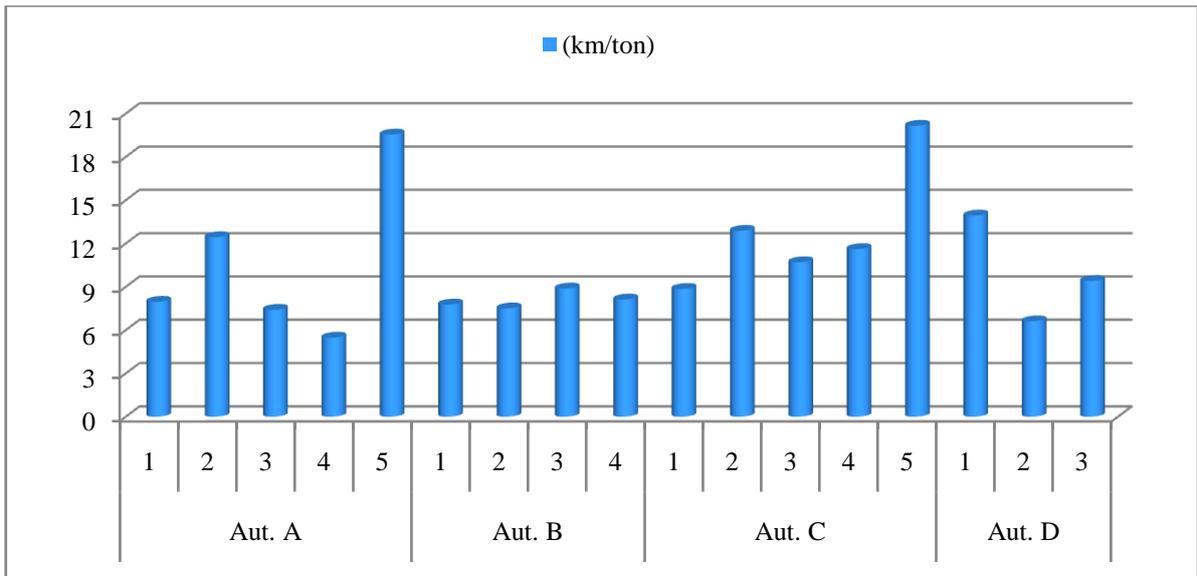


Gráfico 2 – Eficiência na recolha de RSU por veículo.

Assim, verifica-se que a C apresenta o valor mais elevado na relação distância percorrida por tonelada de RSU recolhida (**Tabela 2** e **Gráfico 3**), ou seja, das quatro autarquias em estudo é aquela que tem, em média, menor eficiência no sistema de recolha de RSU, precisando de percorrer uma maior distância para recolher uma tonelada de RSU. Isto ocorre, pois a C é caracterizada por uma área muito rural, onde os pontos de recolha são muito espaçados entre si, apresentando provavelmente baixo grau de enchimento (a densidade populacional é muito baixa, 44 hab/km²). Também se verifica que o número de veículos ao serviço em cada autarquia é diferente e é um parâmetro que não condiciona a eficiência do sistema.

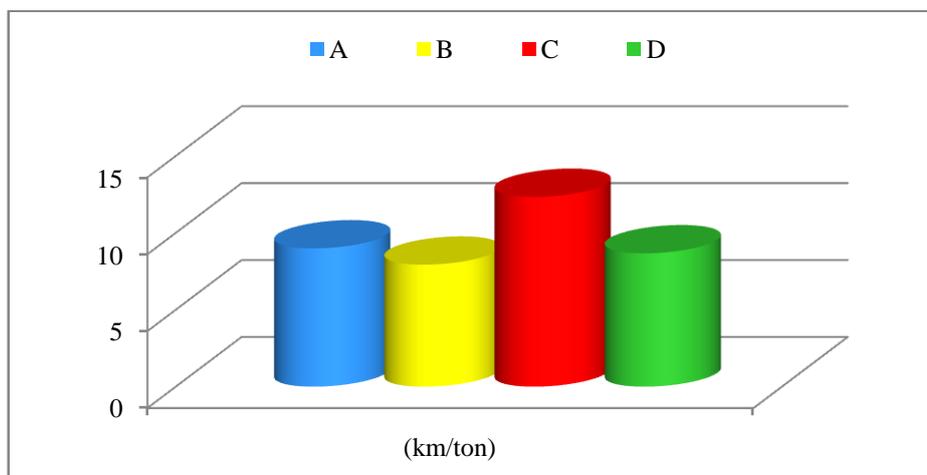


Gráfico 3 – Eficiência na recolha de RSU por autarquia.

Tabela 2 – Caracterização dos veículos.

Aut.	Veículo	Distância (km)	Gasóleo (l)	Quantidade RSU (ton)	(l/ton)	(l/km)	(km/ton)	Porcentagem (%)
A	1	6138	2074	770,90	2,69	0,34	7,96	145
	2	14215	4510	1142,98	3,95	0,32	12,44	227
	3	12642	6862	1706,02	4,02	0,54	7,41	135
	4	8231	3778	1502,34	2,51	0,46	5,48	100
	5	8952	2095	457,96	4,57	0,23	19,55	357
	Total	50178	19319	5580,20	3,46	0,39	8,99	-
B	1	14309	9334	1841,40	5,07	0,65	7,77	104
	2	30164	17351	4019,16	4,32	0,58	7,51	100
	3	15218	8072	1713,28	4,71	0,53	8,88	118
	4	16091	9468	1981,88	4,78	0,59	8,12	108
	Total	75782	44226	9555,72	4,63	0,58	7,93	-
C	1	24512	10295	2768,57	3,72	0,42	8,85	100
	2	29239	11111	2270,02	4,89	0,38	12,88	145
	3	32958	14172	3079,34	4,60	0,43	10,70	121
	4	23917	11002	2059,88	5,34	0,46	11,61	131
	5	38647	14686	1917,52	7,66	0,38	20,15	228
	Total	149273	61265	12095,33	5,07	0,41	12,34	-
D	1	11903	34967	853,98	4,09	0,29	13,94	211
	2	18972	8114	2869,98	2,83	0,43	6,61	100
	3	18135	6369	1927,41	3,30	0,35	9,41	142
	Total	49010	17979	5651,37	3,18	0,37	8,67	-

A percentagem permite ver a diferença existente no parâmetro km/ton entre os veículos de cada autarquia, tendo por base 100% o veículo que menor distância percorre para recolher uma tonelada de RSU, ou seja, o veículo que apresenta maior eficiência no sistema de recolha em cada autarquia.

Através do **Gráfico 4**, é possível realizar uma comparação entre a idade dos veículos e a eficiência do sistema de recolha de RSU. Desta forma, observa-se que não é possível verificar qualquer relação entre os dois parâmetros comparados. No entanto, os maiores valores do parâmetro km/ton (onde se verifica menor eficiência do sistema) encontram-se no veículo 5 da autarquia A, no veículo 5 da autarquia C e no veículo 1 da D, os quais correspondem aos veículos mais novos. Isto verifica-se, pois os veículos mais novos são utilizados para percorrer as maiores distâncias, pois são abrangidos por novas metas em termos de poluição (normas EURO), emitindo menos poluição quando comparado com outro

veículo mais velho a fazer o mesmo circuito. Assim poder-se-á concluir que os veículos mais recentes não têm necessariamente o melhor desempenho.

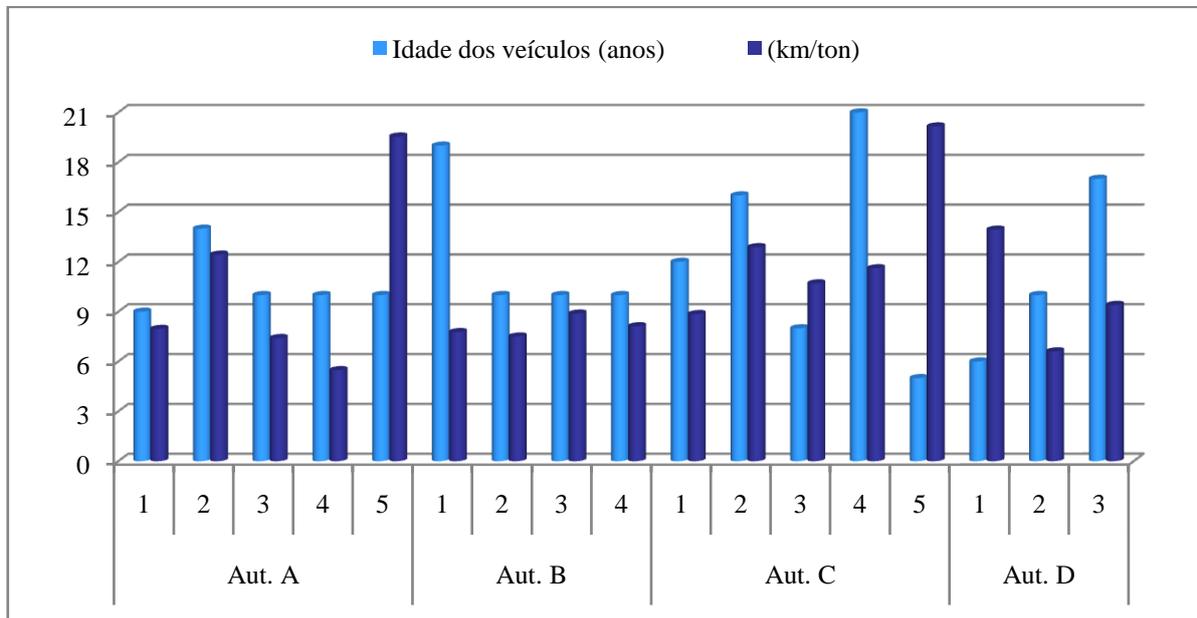


Gráfico 4 – Comparação entre a idade dos veículos e a eficiência do sistema.

2.2. Caracterização dos casos de estudo

Neste ponto, e feito o enquadramento geral do tema a tratar, importa analisar com detalhe o sistema de recolha e transporte de RSU, tendo-se escolhido para o efeito quatro autarquias de média dimensão do centro do país, com uma ocupação urbana diferente. Para proceder à caracterização das autarquias foram usados Indicadores de Desempenho (ID's), que são parâmetros seleccionados e considerados isoladamente ou combinados entre si, sendo de especial pertinência para reflectir determinadas condições dos sistemas em análise (normalmente são utilizados com pré-tratamento, isto é, são efectuados tratamentos aos dados originais, tais como médias aritméticas simples, percentis, medianas, entre outros) (DGA, 2000).

De acordo com Karagiannidis *et al.*, 2004, um bom desempenho também inclui aspectos ambientais uma vez que as melhores práticas (económicas, técnicas, operacionais, etc.) conduzem a uma gestão ambientalmente mais correcta, ao satisfazer várias metas legislativas referentes à reciclagem, compostagem, reutilização e recuperação. A opção pelo recurso a ID's simples é essencial uma vez que a informação fornecida por um indicador simples não oferece, em geral, dúvidas de interpretação aos diferentes utilizadores exteriores ao sistema, ao contrário do que aconteceria se fossem utilizados Índices de Desempenho a partir da agregação de vários ID's simples, com base em expressões matemáticas.

No entanto, conforme diz Alegre *et al.*, 2004, um indicador de desempenho analisado individualmente tem pouco interesse prático, podendo até conduzir a conclusões erradas. Face ao exposto, é importante que a avaliação do desempenho se faça com o apoio de um Sistema de Indicadores de desempenho.

O Sistema de indicadores de desempenho adoptado é o apresentado na **Tabela 3**, onde esteve presente a preocupação de definir e agrupar um conjunto de ID's simples correspondentes à combinação de variáveis elementares (variáveis de cálculo¹). Este Sistema integra um total de 21 ID's, envolvendo um conjunto de variáveis de cálculo determinadas a partir da informação de base, recolhida e tratada estatisticamente. Estas variáveis de cálculo estão contidas no conceito associado a cada um dos indicadores propostos, resultando os indicadores, geralmente, do quociente entre duas variáveis de cálculo (Teixeira *et al.*, 2008).

¹ Correspondem a grandezas que podem ser medidas com precisão ou avaliadas qualitativamente/quantitativamente, e que se consideram relevantes para a avaliação do desempenho dos sistemas (DGA, 2000).

Tabela 3 – Modelo geral adoptado de Indicadores de Desempenho para o Sistema.

Sistema de Deposição, Recolha, Transferência e Transporte de Resíduos Indiferenciados			
Indicadores Gerais			
	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	
Perfil da Autarquia	Relevo	(-)	
	População Residente	(hab.)	
	Área	(km ²)	
	Densidade Populacional	(hab./km ²)	
	Cobertura de Serviço	(%)	
	Produção de RSU indiferenciados	(ton/ano)	
Perfil do Operador	Tipo de actividade	(-)	
	Tipo de propriedade	(-)	
	Dimensão do quadro de pessoal	(Nº)	
Indicadores de Desempenho do Operador			
<i>Categoria</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	
Infra-estruturais	Capacidade de deposição de RSU disponível	(l/hab.)	
	Equipamentos de deposição	Contentores de 110 l	(%)
		Contentores de 120 l	(%)
		Contentores de 240 l	(%)
		Outras volumetrias	(%)
	Capacidade instalada de transferência de RSU	(ton/dia)	
	Dimensão da Frota	(Nº)	
	Consumos		(l/h)
		(l/100km)	
Operacionais	Quantidade de RSU recolhida por hora	(ton/h)	
	Quantidade de RSU recolhida por distância percorrida	(ton/km)	

Fonte: Teixeira *et al.*, (2008).

Nas **Tabela 4**, **Tabela 5**, **Tabela 6** e **Tabela 7** são apresentados os resultados provenientes dos ID's para as quatro autarquias em estudo.

Tabela 4 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. A.

Autarquia A				
Indicadores Gerais				
	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Perfil da Autarquia	Relevo	(-)	Acidentado	
	População Residente	(hab.)	18273	
	Área	(km ²)	139	
	Densidade Populacional	(hab./km ²)	131,46	
	Cobertura de Serviço	(%)	100	
	Produção de RSU indiferenciados	(ton/ano)	5580	
Perfil do Operador	Tipo de actividade	(-)	Recolha de RSU	
	Tipo de propriedade	(-)	Pública	
	Dimensão do quadro de pessoal	(Nº)	12	
Indicadores de Desempenho do Operador				
<i>Categoria</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Infra-estruturais	Capacidade de deposição de RSU disponível	(l/hab.)	27,02	
	Equipamentos de deposição	Contentores de 110 l	(%)	31,60
		Contentores de 120 l	(%)	13,33
		Contentores de 240 l	(%)	26,89
		Outras volumetrias	(%)	28,18
	Capacidade instalada de transferência de RSU	(ton/dia)	<i>n.d.</i>	
	Dimensão da Frota	(Nº)	5	
	Consumos		(l/h)	2,65
		(l/100km)	38,50	
Operacionais		(l/ton)	3,46	
	Quantidade de RSU recolhida por hora	(ton/h)	0,76	
	Quantidade de RSU recolhida por distância percorrida	(ton/km)	0,11	

n.d. – não disponível

Tabela 5 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. B.

Autarquia B				
Indicadores Gerais				
	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Perfil da Autarquia	Relevo	(-)	Pouco Acidentado	
	População Residente	(hab.)	35000	
	Área	(km ²)	110	
	Densidade Populacional	(hab./km ²)	318,18	
	Cobertura de Serviço	(%)	100	
	Produção de RSU indiferenciados	(ton/ano)	9556	
Perfil do Operador	Tipo de actividade	(-)	Recolha de RSU	
	Tipo de propriedade	(-)	Pública	
	Dimensão do quadro de pessoal	(Nº)	12	
Indicadores de Desempenho do Operador				
<i>Categoria</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Infra-estruturais	Capacidade de deposição de RSU disponível	(l/hab.)	30,08	
	Equipamentos de deposição	Contentores de 110 l	(%)	0
		Contentores de 120 l	(%)	0
		Contentores de 240 l	(%)	0
		Outras volumetrias (800 l)	(%)	100
		Capacidade instalada de transferência de RSU	(ton/dia)	<i>n.d.</i>
		Dimensão da Frota	(Nº)	4
		Consumos	(l/h)	6,08
(l/100km)			58,36	
		(l/ton)	4,63	
Operacionais	Quantidade de RSU recolhida por hora	(ton/h)	1,31	
	Quantidade de RSU recolhida por distância percorrida	(ton/km)	0,13	

n.d. – não disponível

Tabela 6 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. C.

Autarquia C				
Indicadores Gerais				
	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Perfil da Autarquia	Relevo	(-)	Plano	
	População Residente	(hab.)	23000	
	Área	(km ²)	521	
	Densidade Populacional	(hab./km ²)	44,14	
	Cobertura de Serviço	(%)	100	
	Produção de RSU indiferenciados	(ton/ano)	12095	
Perfil do Operador	Tipo de actividade	(-)	Recolha de RSU	
	Tipo de propriedade	(-)	Pública	
	Dimensão do quadro de pessoal	(Nº)	15	
Indicadores de Desempenho do Operador				
<i>Categoria</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Infra-estruturais	Capacidade de deposição de RSU disponível	(l/hab.)	52,53	
	Equipamentos de deposição	Contentores de 110 l	(%)	0
		Contentores de 120 l	(%)	0
		Contentores de 240 l	(%)	0
		Outras volumetrias (1100 l)	(%)	100
	Capacidade instalada de transferência de RSU	(ton/dia)	<i>n.d.</i>	
	Dimensão da Frota	(Nº)	5	
	Consumos		(l/h)	6,73
		(l/100km)	41,04	
Operacionais		(l/ton)	5,07	
	Quantidade de RSU recolhida por hora	(ton/h)	1,33	
	Quantidade de RSU recolhida por distância percorrida	(ton/km)	0,08	

n.d. – não disponível

Tabela 7 – Resultado dos Indicadores de Desempenho na Aut. D.

Autarquia D				
Indicadores Gerais				
	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Perfil da Autarquia	Relevo	(-)	Pouco Acidentado	
	População Residente	(hab.)	15340	
	Área	(km ²)	141	
	Densidade Populacional	(hab./km ²)	108,79	
	Cobertura de Serviço	(%)	100	
	Produção de RSU indiferenciados	(ton/ano)	5651	
Perfil do Operador	Tipo de actividade	(-)	Recolha de RSU	
	Tipo de propriedade	(-)	Pública	
	Dimensão do quadro de pessoal	(Nº)	9	
Indicadores de Desempenho do Operador				
<i>Categoria</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>	
Infra-estruturais	Capacidade de deposição de RSU disponível	(l/hab.)	45,78	
	Equipamentos de deposição	Contentores de 110 l	(%)	35,16
		Contentores de 120 l	(%)	0
		Contentores de 240 l	(%)	0
		Outras volumetrias (800 l)	(%)	64,84
	Capacidade instalada de transferência de RSU	(ton/dia)	<i>n.d.</i>	
	Dimensão da Frota	(Nº)	3	
	Consumos		(l/h)	3,93
		(l/100km)	36,69	
Operacionais	Quantidade de RSU recolhida por hora	(ton/h)	1,24	
	Quantidade de RSU recolhida por distância percorrida	(ton/km)	0,12	

n.d. – não disponível

Os aspectos a destacar incluem a cobertura do serviço e as principais diferenças entre as autarquias. Estas são visíveis desde o seu relevo, a densidade populacional até à quantidade de RSU produzida. A frota indica o número de veículos ao serviço da autarquia, no qual cada um terá de realizar o circuito pré-estabelecido. Cada veículo tem uma equipa de três funcionários (um motorista e dois cantoneiros). A entidade responsável pela recolha de RSU é a própria autarquia.

A **autarquia A** é caracterizada por uma ocupação maioritariamente urbana, existindo zonas de baixa densidade habitacional ao longo da serra, apresentando um carácter mais rural.

O seu relevo é bastante acidentado e varia em altitude desde a cota mínima de 200 metros até ao ponto mais alto a uma altitude de 1204 metros.

As freguesias que compõem a **autarquia B** podem ser consideradas urbanas ou semi-urbanas. Esta autarquia apresenta o maior valor de densidade populacional e, apesar do seu relevo ser pouco acidentado (com diferença de altitude entre os 100 e os 500 metros), é a autarquia que apresenta o maior consumo médio (58,36 l/100km) dos veículos de recolha e transporte de RSU.

A **autarquia C** é a que apresenta menor densidade populacional e maior área, tendo assim os veículos que percorrer mais quilómetros para realizar os seus circuitos e servir toda a população. O relevo é bastante plano atingindo uma altitude média de 30 metros.

Relativamente à **autarquia D**, esta apresenta uma componente serrana (cujas altitude máxima é cerca de 550 metros), onde predomina a agricultura de subsistência, e uma outra mais plana, em que a actividade agrícola é bastante mais rentável. É de salientar que os veículos da autarquia D realizam aproximadamente metade das horas de trabalho (4576 h) que os veículos da autarquia C (9100 h).

Ainda é possível verificar que os valores da produção de RSU são bastante diferentes. O tipo de resíduo a recolher, é o mesmo em todas as autarquias, RSU, apesar da composição/densidade variar ligeiramente, uma vez que três das quatro autarquias estão na mesma zona geográfica e usam o mesmo sistema de recolha. A capitação média de RSU (*per capita*) é apresentada no **Gráfico 5**.

Os valores das autarquias C e D são elevados, atendendo a que o objectivo para redução na produção de RSU (não atingido) da União Europeia era, no ano 2000, de 0,82 kg/(hab.dia). Contudo, os valores registados são inferiores à média nacional (1,24 kg/(hab.dia)) (**Fonte:** PERSU II, 2007). A autarquia B é a que apresenta menor produção de RSU por habitante durante um dia, enquanto cada habitante da C produz cerca de 38,5% mais RSU que na B.

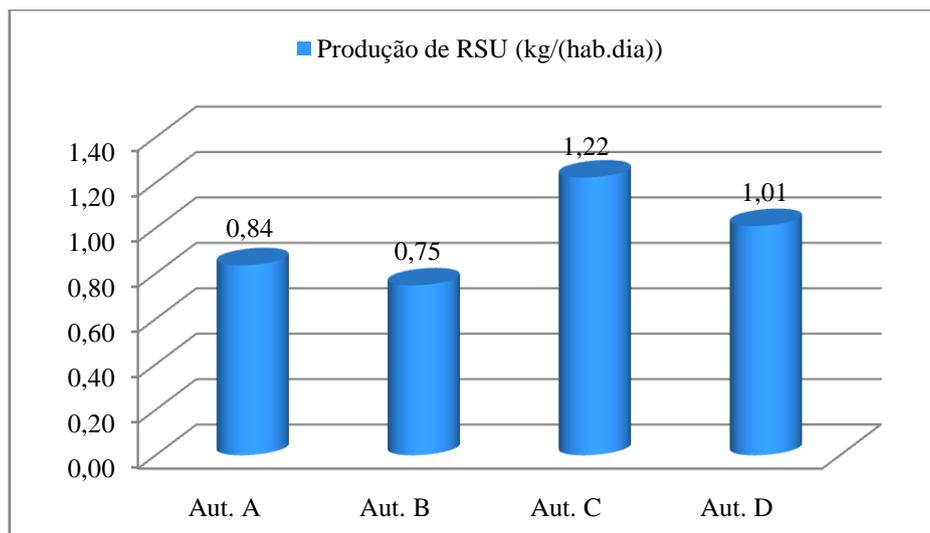


Gráfico 5 – Capitação diária nas autarquias em estudo.

Os tipos de recipientes utilizados para a deposição são propriedade da respectiva autarquia e destinam-se exclusivamente a RSU devidamente ensacados. O número de contentores posto à disposição dos munícipes permite algumas ilações estatísticas (**Gráfico 6**).

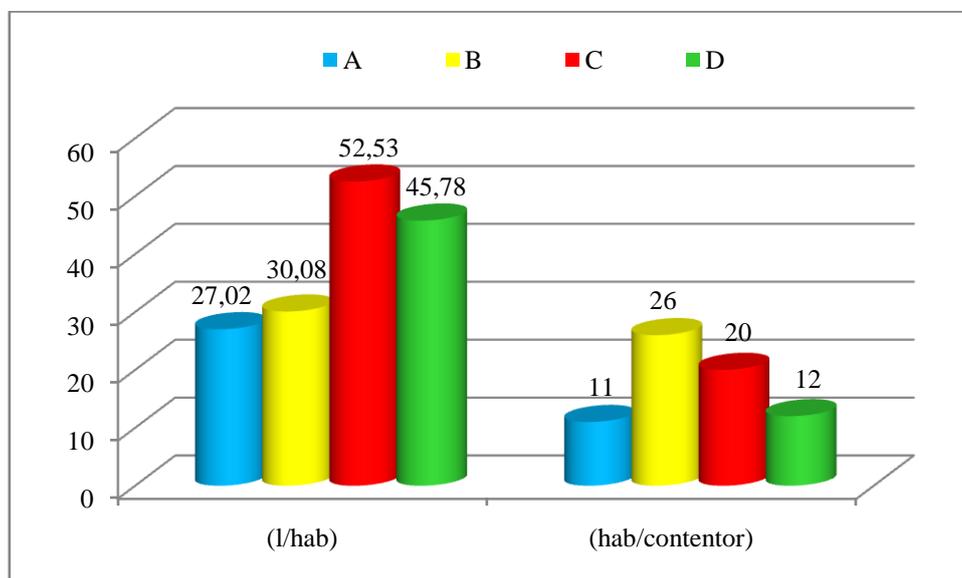


Gráfico 6 – Capacidade de deposição de RSU disponível.

O primeiro parâmetro analisado no **Gráfico 6** é a volumetria disponível (l/hab), que consiste no volume que cada habitante tem à sua disposição para colocar os RSU,

independentemente da frequência de recolha. A volumetria disponível aumenta com a menor densidade populacional.

O segundo parâmetro indica o número médio de habitantes que pode utilizar um contentor (hab/contentor). Como é possível verificar as autarquias C e D são as que apresentam maior volumetria disponível. Da comparação entre o **Gráfico 6** e o **Gráfico 5**, verifica-se que quanto maior o volume disponível maior é a produção de RSU. Existe uma provável relação entre o volume à disposição dos habitantes de uma determinada região e a respectiva predisposição para uma maior deposição de RSU indiferenciados.

No **Gráfico 7** são apresentados os indicadores de consumo nas autarquias. Verifica-se que no primeiro indicador, litros consumidos por hora de recolha necessária, a autarquia C consome cerca de 60% mais que a autarquia A.

No indicador litros por tonelada não existe grande diferença entre autarquias, no entanto, a autarquia C é a que consome mais, porque percorre grandes distâncias (é a autarquia com maior área e mais baixa densidade populacional) e não porque tem maior consumo l/100km. Pode-se deduzir se o consumo é mais elevado então as emissões de CO₂ poderão ser maiores nessa autarquia.

Relativamente ao indicador litros de combustível consumidos por 100 km percorridos na actividade de recolha de RSU, a autarquia B é claramente a que consome mais combustível por quilómetro percorrido.

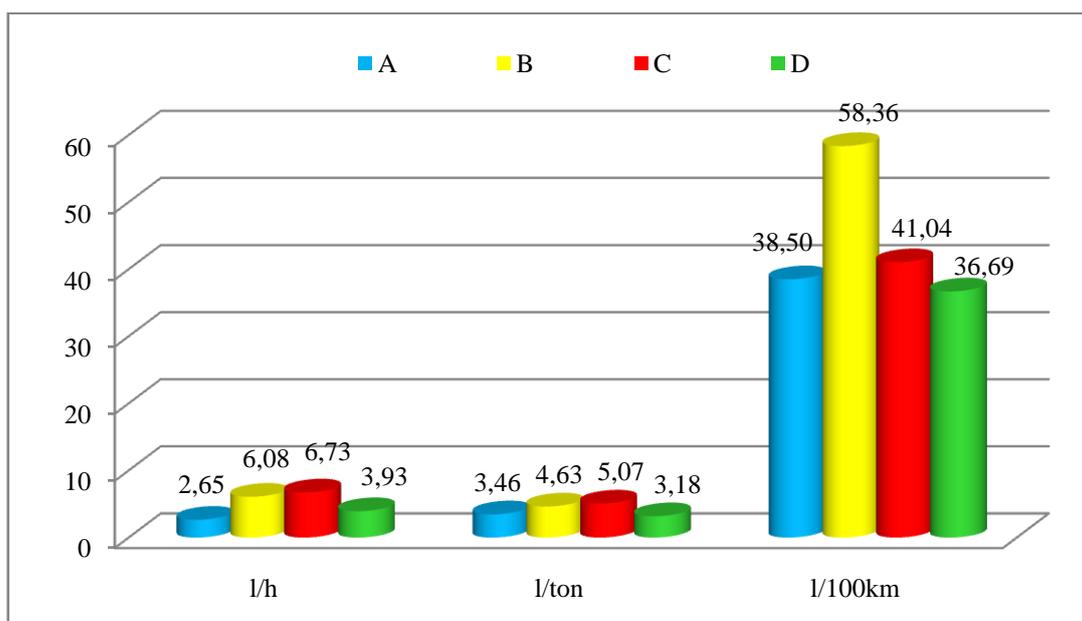


Gráfico 7 – Indicadores de Consumo das quatro autarquias.

O **Gráfico 8** apresenta os dois indicadores operacionais estudados por autarquia. Relativamente ao primeiro indicador é possível verificar que as autarquias B, C e D têm aproximadamente a mesma capacidade de recolha, em termos de peso recolhido por unidade de tempo. A autarquia A apresenta o menor valor, recolhendo cerca de metade dos RSU que a C. A autarquia A é, portanto, a que efectua trabalho menos eficiente, com produtividade mais baixa, uma vez que precisa de mais horas para recolher uma tonelada de RSU.

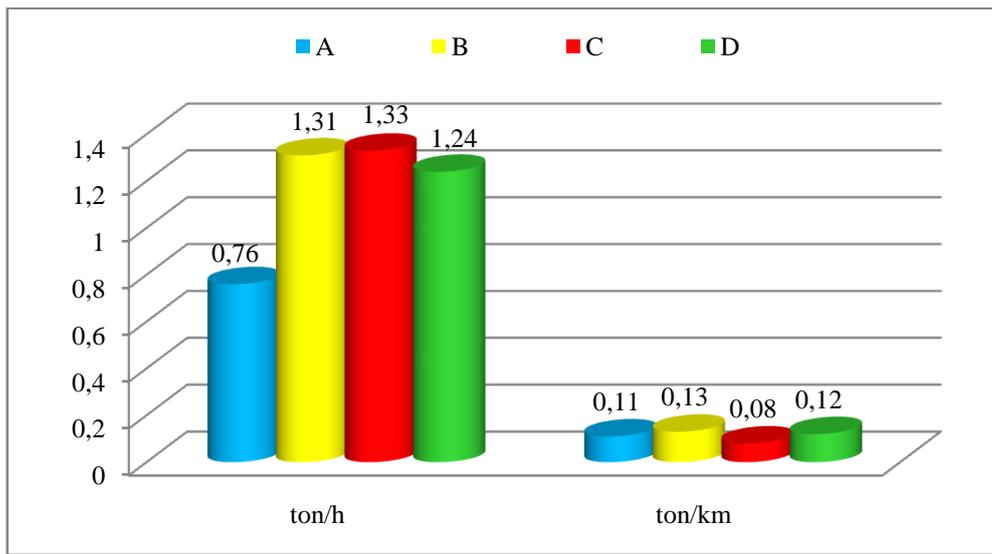


Gráfico 8 – Indicadores Operacionais das quatro autarquias.

O indicador tonelada de RSU por km percorrido significa a quantidade de RSU recolhida numa distância de um quilómetro percorrido. Assume-se que quanto maior a distância percorrida, mais emissões poluentes o veículo emitirá. Por outro lado, quanto maior a quantidade de RSU recolhida por quilómetro percorrido, mais RSU existe pois a população poderá estar mais concentrada espacialmente e o grau de enchimento dos contentores deverá ser mais elevado. Assim, os veículos percorrem menores distâncias, apresentam um grau de enchimento maior e aumenta a eficiência de recolha de RSU. Quanto maior a eficiência menor é a poluição. Portanto, a autarquia B destaca-se por ser a que apresenta maior eficiência, enquanto a C destaca-se por ser a que tem o valor mais baixo.

2.3. Consequências na saúde

Os poluentes emitidos pelos veículos podem provocar graves problemas na saúde humana e no ambiente. É de salientar que o CO₂ é um poluente que provoca efeitos a nível global, juntamente com os outros gases com efeito de estufa (GEE), o metano (CH₄) e o óxido de nitroso (N₂O), afectando a saúde humana de forma indirecta. Os outros poluentes, nomeadamente NO_x e PM, apresentam um impacte ambiental a uma escala local, afectando directamente as pessoas. Na **Tabela 8** são apresentados os poluentes mais perigosos, as suas principais fontes e as consequências que advêm da sua inalação.

Tabela 8 – Principais poluentes atmosféricos.

Poluente	Fontes	Processos	Efeito na Saúde
CO ₂	Naturais	Fogos florestais Decomposição de plantas/animais Respiração	Dores de cabeça Problemas na vista Cansaço
	Antropogénicas	Queima de biomassa Combustão	Asfixia
CO	Naturais	Vulcões Fogos florestais Trovoadas	Reduz a capacidade de transporte de oxigénio no sangue
	Antropogénicas	Combustão incompleta	Respiração acelerada Irritabilidade
NO _x	Naturais	Metabolismo microbiano dos solos Fogos florestais Descargas eléctricas na atmosfera	Afecta o sistema respiratório Asma, bronquite
	Antropogénicas	Queima de combustíveis a altas T	Problemas cardíacos
PM ₁₀	Naturais	Vulcões Fogos florestais Acção erosiva do solo	Aparecimento e agravamento das doenças cardíacas e respiratórias:
	Antropogénicas	Queima de combustíveis Processos industriais	Asma, bronquite Efisema pulmonar
HC	Antropogénicas	Queima de combustíveis	Cancro

Fonte: Chang, 1994; Lameiras, 2006; Gomes, 2001.

2.4. Propostas para melhoria da recolha de RSU

Nesta secção são apresentadas as propostas ou cenários de melhoria avaliadas na dissertação, no sentido de melhorar a performance energética e ambiental da recolha de RSU nas quatro autarquias analisadas.

2.4.1. Alteração do tipo de combustível

Os veículos em estudo possuem motor com ciclo Diesel e consomem actualmente gasóleo. Desta forma, a primeira proposta analisada consiste em verificar a melhoria, em termos energéticos e ambientais, quando se substitui o combustível actual por um alternativo. O combustível alternativo ao gasóleo que é objecto de estudo nesta dissertação é o biodiesel, B30 (mistura de 30% de RME com 70% de gasóleo) e B100 (biodiesel puro, sem gasóleo). Note-se que a utilização de biodiesel não implica qualquer alteração no veículo.

O biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis. É obtido a partir de óleos vegetais, gorduras animais ou óleos alimentares usados através de um processo de esterificação ou transesterificação (EERE, 2006; MI & IFQC, 2006). O biodiesel pode substituir total ou parcialmente o combustível derivado de petróleo nos motores que operam com ciclo Diesel (camiões, tractores, autocarros, automóveis, etc.) ou motores que operam em regimes estacionários (geradores de electricidade, calor, etc.). Pode ser usado puro ou em mistura com o gasóleo tradicional em diversas proporções (Bx). Uma mistura de 2% de biodiesel e 98% de gasóleo tem a designação de B2 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100 (EERE, 2006; MI & IFQC, 2006). O biodiesel estudado nesta dissertação é o proveniente de óleo de colza. Em particular, o óleo de colza, fruto do seu baixo teor em ácidos gordos saturados, permite produzir um biocombustível de elevada qualidade, RME (*Rapeseed Methyl Éster*), com as propriedades adequadas aos climas europeus (Puppán, 2002).

2.4.2. Alteração da tecnologia motora dos veículos

A segunda proposta consiste numa situação completamente diferente da anterior. Nesta é avaliada a melhoria em termos energéticos e ambientais, quando se substitui o

combustível actual por um alternativo, o qual implica alterações da tecnologia motora no veículo. O combustível analisado nesta proposta é o gás natural (GN). Desta forma é realizada uma análise económica, uma vez que para a concretização desta proposta são necessários gastos financeiros. Assim, são comparados dois veículos novos que utilizam combustíveis diferentes: um a gasóleo e outro a gás natural.

O GN é composto por hidrocarbonetos saturados, predominando o metano e, em menores quantidades, etano, propano e butano, e é produzido, a maior parte, a partir de poços de gás ou em conjunto com a produção de petróleo bruto. Uma pequena quantidade é obtida a partir de fontes complementares, tais como gás sintético, gás de aterro, outros recursos de biogás, carvão e derivados de gás. O GN tem um elevado número de octanas (120-130) e excelentes propriedades para motores de combustão interna por ignição de faísca. Não é tóxico, corrosivo nem cancerígeno (NGA, 2008; Marques, 2007). Mais leve do que o ar, o gás natural dissipa-se facilmente na atmosfera, em caso de fugas. Em termos de custo e comparando com outros combustíveis tradicionais, gasolina e gasóleo, o gás natural pode apresentar um preço entre 15 a 40% inferior. Devido à queima limpa, característica deste combustível, as exigências de manutenção são menores. Os intervalos de manutenção são mais espaçados, contribuindo para um aumento do tempo de vida, sendo assim os custos de manutenção inferiores (Rocha, 2001).

2.4.3. Optimização dos circuitos de recolha

Na última proposta analisa é avaliada a melhoria, em termos energéticos e ambientais, realizando a optimização dos circuitos nas quatro autarquias. Desta forma, foi possível reduzir os dias de frequência em alguns pontos. Os novos circuitos resultam numa poupança efectiva de recursos, tanto em termos de mão-de-obra, como redução dos quilómetros percorridos para a recolha da mesma quantidade de resíduos.

3. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MELHORIA

Ao longo deste capítulo, apresenta-se a forma como foram determinadas as emissões de CO₂, nas três propostas de melhoria consideradas na secção anterior. São também apresentados os resultados provenientes da avaliação dessas propostas de melhoria, em termos energéticos e ambientais. Todos os cálculos apresentados foram realizados, tendo em atenção um período de tempo de um ano. Através dos resultados é possível avaliar qual a autarquia que mais beneficia do ponto de vista energético e ambiental. A metodologia usada consistiu em pesquisa bibliográfica, de forma a realizar uma descrição de trabalhos científicos ligados ao tema. Para apresentar e analisar os resultados utilizaram-se tabelas e gráficos, com vista a uma maior simplicidade de interpretação.

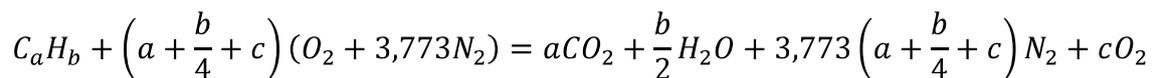
3.1. Alteração do tipo de combustível

Nesta secção são estimadas as emissões de CO₂ em todos os combustíveis que constituem a primeira proposta, nomeadamente gasóleo, B30 e B100.

Para estimar as emissões de CO₂ por veículo, foi seguido um estudo realizado por López *et al.*, 2008, na Universidade Politécnica de Madrid, no qual compararam as emissões de gases com efeito de estufa, em dois tipos de motor e com três tipos de combustível diferentes. Os combustíveis analisados foram o gasóleo, o biodiesel a 30% (B30) e o gás natural (GN) e os motores testados foram o motor de ignição por faísca (ciclo *Otto*) e dois motores de ignição por compressão (ciclo Diesel), onde o primeiro é alimentado com GN e os dois últimos com gasóleo e B30. Os testes foram realizados em veículos de recolha de RSU ao longo de vias urbanas reais na cidade de Madrid (López *et al.*, 2008). A metodologia usada é baseada na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que avalia os potenciais impactes ambientais associados a um produto, tendo em conta o ciclo de vida desse produto e todas as etapas da sua produção, desde a extracção das matérias-primas até à sua disposição final (Beer *et al.*, 2000). Quando é aplicada ao combustível/veículo, muitas vezes é chamada de análise “*well to wheels*”. Esta é baseada no conhecimento global das energias envolvidas em todo o processo. A metodologia é dividida em duas partes: Parte 1 – “*well to tank*” que considera todos os processos associados à produção do combustível desde a extracção da matéria-prima até ao armazenamento do combustível no tanque do veículo; Parte 2 – “*tank to wheels*” considera a

utilização do combustível no veículo; o ciclo de vida “*well to wheels*” considera a combinação das duas partes referidas anteriormente (López *et al.*, 2008).

As emissões referentes à Parte 2 – “*tank to wheels*” são determinadas tendo em atenção a equação da reacção química de um hidrocarboneto geral. Uma vez que a composição dos reagentes e dos produtos dependem da conservação da massa de cada elemento químico dos reagentes, apenas a composição elementar relativa do hidrocarboneto e as proporções relativas do hidrocarboneto e do ar são necessárias (Heywood, 1988). O ar contém azoto, mas quando os produtos estão sujeitos a baixas temperaturas o azoto não é significativamente afectado pela reacção. Considerando uma combustão completa (onde o oxigénio presente no ar converte todo o hidrogénio presente no combustível em água e todo o carbono em dióxido de carbono) de um hidrocarboneto combustível geral (de composição molecular média C_aH_b) com o ar (**Figura 3 – a**), a equação da combustão completa é a seguinte (Heywood, 1988):



Como se pode verificar, a combustão teórica de um hidrocarboneto origina emissões de CO_2 , água e azoto.

Na realidade, o processo de combustão não é perfeito e, desta forma, os veículos emitem outros tipos de substâncias com características poluentes, nomeadamente, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de azoto (NO_x), partículas em suspensão (PM), entre outros (**Figura 3 – b**) (Challen e Baranescu, 2003; EPA, 2004).

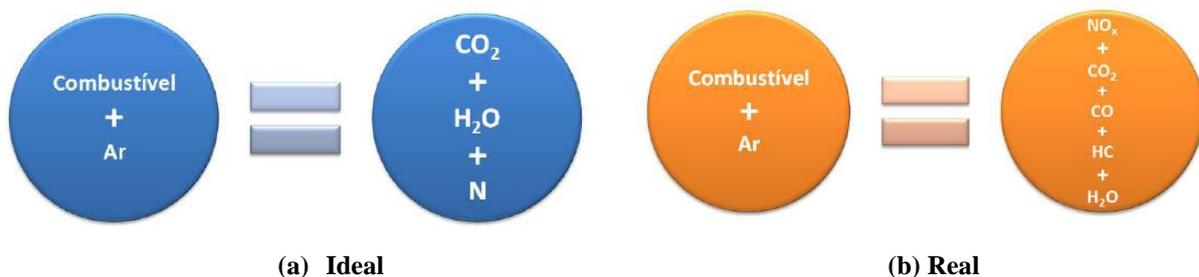


Figura 3 – Processo de combustão ideal e real num motor de combustão interna.

3.1.1. Gasóleo

Para o caso específico do gasóleo, as emissões provenientes do “*well to tank*” são as apresentadas na **Tabela 9**, em termos de CO_{2-eq}.

Tabela 9 – Emissões de GEE e necessidade energética desde o petróleo bruto até ao abastecimento de gasóleo.

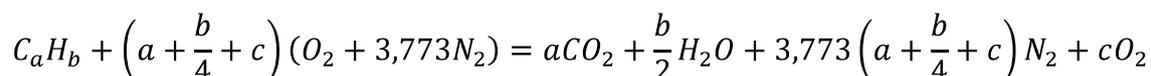
	Energia de entrada ^{a, b} (MJ/MJ _{gasóleo})	Perdas de Energia ^b (MJ/MJ _{gasóleo})	GEE ^b (g CO _{2-eq} /MJ _{gasóleo})
Extracção do petróleo	1,027	0,027	3,6
Transporte do petróleo	1,039	0,012	0,9
Refinação	1,099	0,060	4,7
Distribuição	1,119	0,020	1,1
Total	1,119	0,119	10,2

^a Cumulativa, inclui a energia entregue ao veículo.

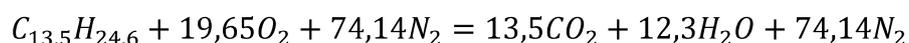
^b Por MJ entregue ao veículo.

Fonte: López *et al.*, 2008.

Para estimar as emissões referentes à Parte 2 – “*tank to wheels*” teve-se em atenção a equação da reacção química de um hidrocarboneto geral. Considerando uma combustão completa de um hidrocarboneto combustível geral (de composição molecular média C_aH_b) com o ar, a equação é a seguinte (Heywood, 1988):



Como se pode verificar, a combustão de um hidrocarboneto origina emissões de CO₂, água e azoto. O hidrocarboneto estudado em primeiro lugar nos veículos de recolha e transporte de RSU é o gasóleo. Este é composto por aproximadamente 75% de hidrocarbonetos saturados (principalmente parafina) e 25% de hidrocarbonetos aromáticos (incluindo naftaleno e alquilbenzeno), e a fórmula química utilizada é C_{13,5}H_{24,6} (López *et al.*, 2008), sendo os limites C₁₀H₂₀ a C₁₅H₂₈ (ATSDR, 1995). Desta forma, substituindo o hidrocarboneto geral por C_{13,5}H_{24,6}, a expressão fica:



Como se pode verificar, consumindo uma mol de gasóleo são emitidas 13,5 moles de CO₂. Tendo em atenção que o PCI_{gasóleo} é 42,36 MJ/kg (López *et al.*, 2008), realizando todos

os cálculos necessários, determina-se que um veículo que consuma gásóleo emitirá 0,0751 kg CO_{2-eq}/MJ (aproximadamente 75 g CO₂/MJ), durante a combustão.

Desta forma, as emissões finais (“*well to wheels*”) para o gásóleo, **Tabela 10**, são estimadas a partir do somatório das emissões de “*well to tank*” com as emissões de “*tank to wheels*”.

Tabela 10 – Emissões totais de CO₂ tendo em atenção a ACV do gásóleo.

	<i>Well to tank</i> Emissões (kg CO _{2-eq} /MJ)	<i>Tank to wheels</i> Emissões (kg CO _{2-eq} /MJ)	<i>Well to wheels</i> Emissões (kg CO _{2-eq} /MJ)
Gasóleo	0,0102	0,0751	0,0853

Uma vez que o valor encontrado para as emissões de CO₂, “*well to wheels*” (0,0853 kg CO_{2-eq}/MJ), depende do consumo do veículo (em MJ/km) e, posteriormente, da distância percorrida, será de esperar que os veículos que consomem mais e tenham maior distância percorrida, sejam aqueles que mais emissões libertem por ano. Os consumos dos veículos foram estimados a partir dos dados iniciais (em l/km), multiplicados pelo respectivo PCI (em MJ/l) de cada combustível e, assim, foi possível calcular as emissões de cada veículo por distância percorrida.

Como se pode verificar, na autarquia A (**Tabela 11**) o veículo 3 é o que consome mais gásóleo e, conseqüentemente, aquele que mais polui em termos de emissões de CO₂ por ano. No entanto, o veículo 5 é o que emite mais por cada tonelada de RSU recolhida. Desta forma, verifica-se que o veículo 5 emite quase o dobro das emissões de CO₂ por tonelada que o veículo 4. A diferença das emissões de CO₂ por tonelada de RSU pode chegar aos 80%, entre os veículos que menos e mais CO₂ libertam (como é o caso entre o veículo 4 e 5).

Tabela 11 – Emissões de CO₂ estimadas a partir de veículos a gásóleo, na autarquia A.

Aut. A	Consumo	Distância	Quantidade RSU recolhida	Emissões CO ₂ /km	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(km)	(ton)	(kg CO ₂ /km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	11,95	6138	770,90	1,020	6261	8,122
2	11,22	14215	1142,98	0,958	13616	11,913
3	19,20	12642	1706,02	1,639	20715	12,142
4	16,23	8231	1502,34	1,386	11405	7,591
5	8,28	8952	457,96	0,706	6324	13,808
Total	13,62	50178	5580,20	1,162	58318	10,451

Na autarquia B (**Tabela 12**), o veículo 2 é o que mais CO₂ liberta, com um total de cerca de 52,4 ton de CO₂ por ano, mas em termos de toneladas recolhidas é o que menos polui, pois recolhe a maior quantidade de RSU. Assim sendo, como se pode verificar, o veículo 1 é o que emite mais CO₂ por tonelada de RSU recolhida. A maior diferença nas emissões de CO₂ por tonelada de RSU recolhida é de 17%, não sendo muito significativa.

Tabela 12 – Emissões de CO₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia B.

Aut. B	Consumo	Distância	Quantidade RSU recolhida	Emissões CO ₂ /km	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(km)	(ton)	(kg CO ₂ /km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	23,07	14309	1841,40	1,969	28176	15,302
2	20,34	30164	4019,16	1,736	52377	13,032
3	18,76	15218	1713,28	1,601	24366	14,222
4	20,81	16091	1981,88	1,776	28582	14,421
Total	20,64	75782	9555,72	1,762	133509	13,972

Relativamente à autarquia C, o veículo que mais CO₂ emite é o 5 uma vez que percorre maior a distância e, como é o que recolhe menor quantidade de RSU, a relação emissões de CO₂ por tonelada de RSU é a que apresenta maior valor (**Tabela 13**). Relembro que este veículo é o mais novo da autarquia e é utilizado para fazer os circuitos de maior distância. Por esta razão, este veículo emite cerca do dobro das emissões por tonelada que o veículo 1.

Tabela 13 – Emissões de CO₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia C.

Aut. C	Consumo	Distância	Quantidade RSU recolhida	Emissões CO ₂ /km	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(km)	(ton)	(kg CO ₂ /km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	14,86	24512	2768,57	1,268	31078	11,225
2	13,44	29239	2270,02	1,147	33541	14,776
3	15,21	32958	3079,34	1,298	42782	13,893
4	16,27	23917	2059,88	1,389	33212	16,123
5	13,44	38647	1917,52	1,147	44333	23,120
Total	14,50	149273	12095,33	1,238	184754	15,275

A autarquia D (**Tabela 14**) é a que tem menos veículos de recolha e transporte de RSU. Dos seus três veículos, o veículo 2 é o que maior quantidade de CO₂ liberta, porque é o

que apresenta maior consumo e percorre maior distância. Uma vez que, também recolhe uma grande quantidade de RSU, este apresenta o valor mais baixo de emissões por tonelada recolhida. O veículo 1 é o apresenta maior valor de emissões por tonelada de RSU recolhida, libertando cerca de 45% mais que o veículo 2.

Tabela 14 – Emissões de CO₂ estimadas a partir de veículos a gasóleo, na autarquia D.

Aut. D	Consumo	Distância	Quantidade RSU recolhida	Emissões CO ₂ /km	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(km)	(ton)	(kg CO ₂ /km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	10,39	11903	853,98	0,887	10557	12,362
2	15,13	18972	2869,98	1,291	24495	8,535
3	12,42	18135	1927,41	1,060	19227	9,975
Total	12,98	49010	5651,37	1,108	54283	9,605

3.1.1.1. Comparação entre autarquias

Como é possível verificar através do **Gráfico 9**, a comparação entre as quatro autarquias leva a referir que os veículos da autarquia C são, em média, os que emitem mais CO₂ uma vez que, apesar de não ser a que apresenta maior consumo, é a autarquia que mais gasóleo gasta, pois tem maior área percorrendo assim mais quilómetros na recolha de RSU. Nas autarquias A e D apresentam-se os menores valores.

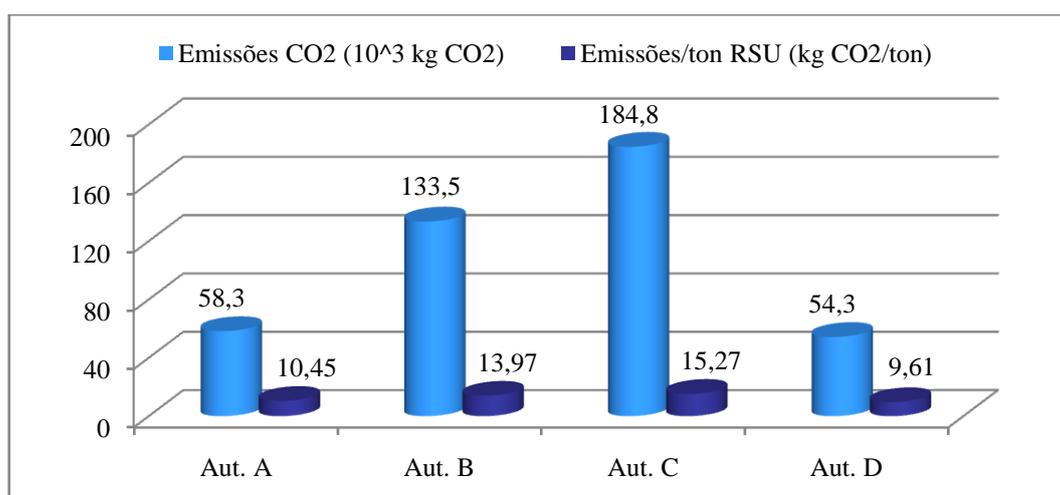


Gráfico 9 – Total de emissões de CO₂ nas diferentes autarquias.

3.1.1.2. Comparação entre a idade dos veículos e o total de emissões de CO₂

Como se pode verificar através do **Gráfico 10** para veículos com a mesma idade existem diferenças nas emissões de CO₂ estimadas. Deve-se essencialmente a todos os parâmetros que condicionam a eficiência da recolha. Note-se que os valores mais elevados de emissões verificam-se em veículos novos, pois como tem menores consumos, são utilizados para fazer os maiores circuitos.

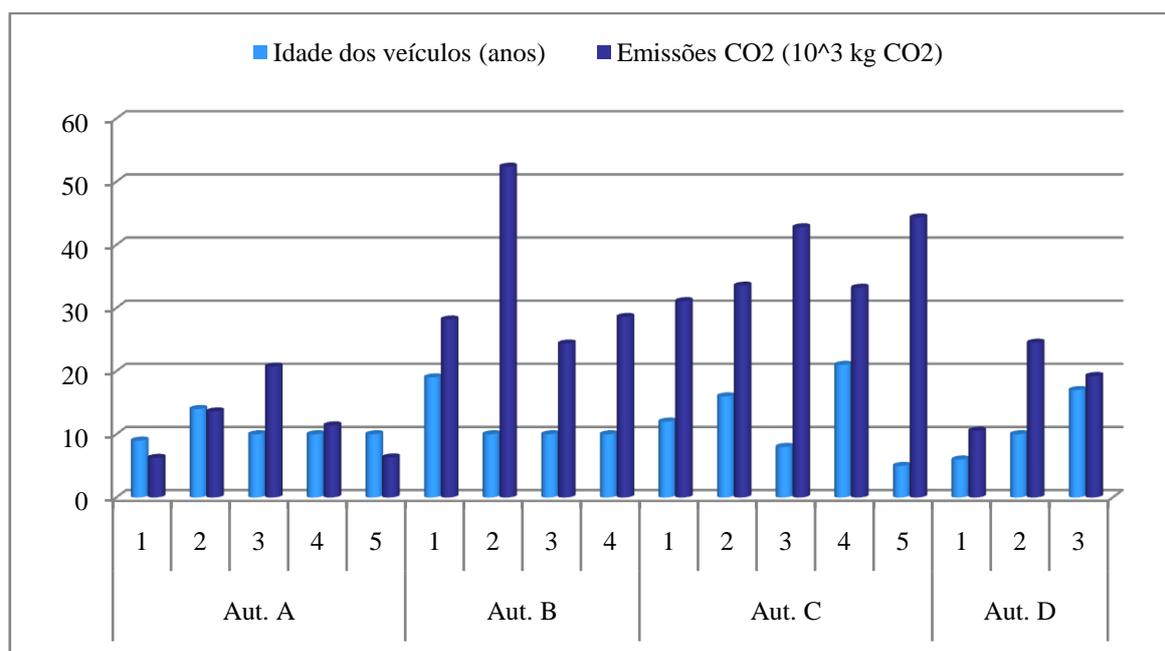


Gráfico 10 – Comparação entre a idade dos veículos e o total de emissões de CO₂ emitidas

3.1.1.3. Comparação entre a eficiência do sistema de recolha e as emissões emitidas por tonelada de RSU recolhida

Existe uma relação entre a eficiência da recolha e as emissões de CO₂ por tonelada de RSU recolhida. Da análise do **Gráfico 11** pode-se verificar que os veículos que têm pior eficiência (ou seja, aqueles que tem valores mais elevados de km/ton) são os que emitem mais CO₂/ton e, por outro lado, os que apresentam melhor eficiência na recolha também são os que emitem menos CO₂/ton. No entanto, na autarquia B também se verifica a mesma relação entre a eficiência e as emissões de CO₂, mas apresenta valores muito elevados de CO₂/ton, derivado dos veículos apresentarem os maiores consumos.

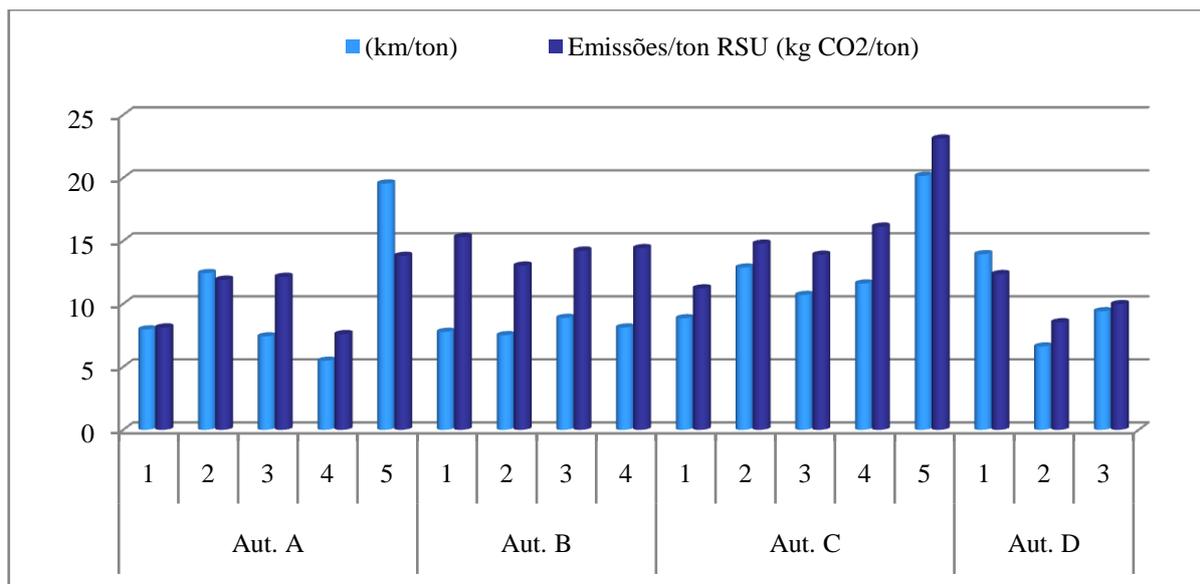


Gráfico 11 – Comparação entre a eficiência da recolha e as emissões de CO₂ por quantidade de RSU recolhida.

3.1.2. Biodiesel a 30% (B30)

Para estimar as emissões de CO₂ por veículo, foi seguido o estudo realizado por López *et al.*, 2008, o mesmo estudo seguido na secção 3.1.1. Na presente dissertação o biodiesel foi estudado em B30 (30% RME e 70% gasóleo) e em B100 (100% RME).

Relativamente ao caso específico do B30, as emissões provenientes do “*well to tank*” são as apresentadas na **Tabela 15**, em termos de CO_{2-eq}.

Tabela 15 – Emissões de GEE e necessidade energética para o biodiesel.

	Glicerina usada como combustível no processo		
	Energia de entrada (MJ/MJ _{RME})	Perdas de Energia (MJ/MJ _{RME})	GEE (g CO _{2-eq} /MJ _{RME})
Cultivo da colza	1,26	0,26	60
Secagem da colza	1,27	0,01	0,7
Transporte	1,29	0,02	0,6
Esterificação e produção do óleo	2,11	0,82	-80
Distribuição	2,12	0,01	0,4
Total	2,12	1,12	-18,3
B30^b	1,40	0,44	1,65

^b Calculado para uma mistura de 30% B100 e 70% gasóleo.

Fonte: López *et al.*, 2008.

As emissões referentes à Parte 2 – “*tank to wheels*” foram estimadas a partir da equação da reação química de um hidrocarboneto geral (Heywood, 1988), adaptada para o uso de biodiesel:

$$C_aH_bO_c + \left(a + \frac{b}{4} + c\right)(O_2 + 3,773N_2) \\ = aCO_2 + \frac{b}{2}H_2O + 3,773\left(a + \frac{b}{4} + c\right)N_2 + (c + 1)O_2$$

O B30 utilizado tem como fórmula química $C_{18,7}H_{34,9}O_2$ (López *et al.*, 2008) e substituindo na expressão anterior, esta fica:

$$C_{18,7}H_{34,9}O_2 + 29,425O_2 + 111,02N_2 = 18,7CO_2 + 17,45H_2O + 111,02N_2 + 3O_2$$

Como é possível visualizar, uma mol de B30 utilizada na combustão emite 18,7 moles de CO_2 . Tendo em atenção que o PCI_{B30} é 40,99 MJ/kg (López *et al.*, 2008), realizando todos os cálculos necessários, determina-se que um veículo que utilize B30 como combustível emitirá 0,0689 kg CO_2 /MJ (aproximadamente 69 g CO_2 /MJ).

Para determinar as emissões totais (“*well to wheels*”) do B30 têm de se somar as emissões correspondentes das duas partes anteriores. Assim sendo, o resultado final será de 0,0706 kg CO_2 /MJ (**Tabela 16**).

Uma vez que o valor das emissões em kg CO_2 /km percorrido depende do consumo do veículo, no estudo realizado por López *et al.*, 2008 verificaram que ao utilizar o veículo com B30 este tinha um consumo, em termos energéticos (MJ/km), 13,4% superior ao do gasóleo (devido à diferença de PCI). Como não é possível verificar esta situação nos veículos em estudo nesta dissertação, foram considerados dois cenários: #1 – onde é admitido que o consumo dos veículos usando B30 é igual ao consumo usando gasóleo e #2 – é admitido que o consumo dos veículos usando B30 é 10% superior ao consumo utilizando gasóleo.

Tabela 16 – Resumo das emissões de CO_2 para o combustível B30.

	<i>Well to tank</i> Emissões (kg CO_{2-eq} /MJ)	<i>Tank to wheels</i> Emissões (kg CO_{2-eq} /MJ)	<i>Well to wheels</i> Emissões (kg CO_{2-eq} /MJ)
B30	0,00165	0,0689	0,0706

A apresentação de resultados começa pela utilização de B30 com os dois cenários estudados juntamente. Nas **Tabela 17**, **Tabela 18**, **Tabela 19** e **Tabela 20** apresentam-se os consumos dos veículos ($PCI_{B30} = 34,84$ MJ/l), as emissões totais de CO₂, bem como as emissões emitidas por tonelada de RSU recolhida associadas a cada um dos cenários considerados, nas autarquias em estudo. A única diferença que existe entre os valores do cenário #1 e os valores do cenário #2 é se os veículos consumirem efectivamente mais 10% de combustível, todos os outros parâmetros estudados são afectados de mais 10%.

Tabela 17 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia A.

		Cenário #1			Cenário #2		
Aut. A	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	
1	11,77	5099	6,614	12,95	5608	7,275	
2	11,05	11088	9,701	12,16	12197	10,671	
3	18,91	16869	9,888	20,80	18556	10,877	
4	15,99	9287	6,182	17,59	10216	6,800	
5	8,15	5150	11,244	8,97	5664	12,369	
Total	13,41	47490	8,510	14,75	52239	9,362	

Tabela 18 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia B.

		Cenário #1			Cenário #2		
Aut. B	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	
1	22,73	22945	12,461	25,00	25239	13,707	
2	20,04	42652	10,612	22,04	46917	11,673	
3	18,48	19842	11,581	20,33	21827	12,740	
4	20,50	23275	11,744	22,55	25602	12,918	
Total	20,33	108721	11,378	22,37	119593	12,515	

Tabela 19 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia C.

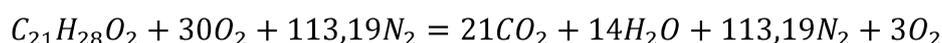
Aut. C	Cenário #1			Cenário #2		
	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	14,63	25308	9,141	16,10	27839	10,055
2	13,24	27313	12,032	14,56	30045	13,235
3	14,98	34839	11,314	16,48	38322	12,445
4	16,03	27046	13,130	17,63	29750	14,443
5	13,24	36102	18,827	14,56	39712	20,710
Total	14,28	150451	12,439	15,71	165496	13,683

Tabela 20 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B30, autarquia D.

Aut. D	Cenário #1			Cenário #2		
	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	10,24	8597	10,067	11,26	9457	11,073
2	14,90	19947	6,950	16,39	21942	7,645
3	12,24	15657	8,123	13,46	17222	8,936
Total	12,78	44204	7,822	14,06	48625	8,604

3.1.3. Biodiesel a 100% (B100)

Para o B100, com fórmula química C₂₁H₂₈O₂ (Peterson e Hustrulid, 1998; Soltic *et al.*, 2009) foi feito exactamente o mesmo raciocínio, ficando a equação da reacção com a seguinte forma:



Através da expressão vê-se que uma mol de B100 utilizada na combustão emite 21 moles de CO₂, e sendo o valor do PCI_{B100} igual a 37,5 MJ/kg (Malça e Freire, 2004), determina-se que as emissões de CO₂ para o “*tank to wheels*” correspondentes ao B100 são de 0,0790 kg CO₂/MJ. Juntando estas com as da Parte 1 (**Tabela 15**), determinam-se as emissões totais de 0,0607 kg CO₂/MJ (**Tabela 21**). Este valor depende de muitos factores específicos

do ciclo de vida (tecnologias, logística, forma de contabilizar os co-produtos...). Deste modo outros estudos referem valores distintos, por exemplo Malça e Freire, 2008, no estudo de caracterização da incerteza associada às emissões totais de ciclo de vida, apresentam valores entre 30 a 50 g CO_{2-eq}/MJ.

Tabela 21 – Resumo das emissões de CO₂ para o combustível B100.

	<i>Well to tank</i> Emissões (kg CO ₂ /MJ)	<i>Tank to wheels</i> Emissões (kg CO ₂ /MJ)	<i>Well to wheels</i> Emissões (kg CO ₂ /MJ)
B100	-0,0183	0,0790	0,0607

Note-se que o valor das emissões em kg CO₂/km percorrido depende do consumo do veículo e, também aqui no caso do B100, terá de se considerar os dois cenários referidos em B30. Nas **Tabela 22**, **Tabela 23**, **Tabela 24** e **Tabela 25** apresentam-se os consumos dos veículos (PCI_{B100} = 32,63 MJ/l), as emissões totais de CO₂, bem como as emissões emitidas por tonelada de RSU recolhida associadas a cada um dos cenários considerados, nas autarquias em estudo. A única diferença que existe entre os valores do cenário #1 e os valores do cenário #2 é se os veículos consumirem efectivamente mais 10% de combustível, todos os outros parâmetros estudados são afectados por mais 10%.

Tabela 22 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia A.

Aut. A	Cenário #1			Cenário #2		
	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	11,03	4106	5,326	12,13	4519	5,862
2	10,35	8930	7,813	11,39	9827	8,598
3	17,71	13586	7,963	19,48	14950	8,763
4	14,98	7480	4,979	16,47	8231	5,479
5	7,64	4147	9,056	8,40	4564	9,966
Total	12,56	38247	6,854	13,82	42089	7,543

Tabela 23 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia B.

Aut. B	Cenário #1			Cenário #2		
	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	21,28	18479	10,035	23,41	20336	11,044
2	18,77	34350	8,547	20,65	37801	9,405
3	17,31	15980	9,327	19,04	17586	10,264
4	19,20	18745	9,458	21,12	20628	10,408
Total	19,04	87560	9,163	20,95	96356	10,084

Tabela 24 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia C.

Aut. C	Cenário #1			Cenário #2		
	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	13,70	20382	7,362	15,08	22430	8,102
2	12,40	21997	9,690	13,64	24207	10,664
3	14,03	28058	9,112	15,43	30876	10,027
4	15,01	21781	10,574	16,51	23970	11,636
5	12,40	29075	15,163	13,64	31996	16,686
Total	13,38	121168	10,018	14,72	133341	11,024

Tabela 25 – Emissões totais de CO₂ associadas aos cenários considerados para o B100, autarquia D.

Aut. D	Cenário #1			Cenário #2		
	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU	Consumo	Emissões CO ₂	Emissões/ton RSU
Veículo	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)	(MJ/km)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂ /ton)
1	9,59	6924	8,107	10,55	7619	8,922
2	13,96	16065	5,598	15,35	17679	6,160
3	11,46	12609	6,542	12,61	13876	7,199
Total	11,97	35600	6,299	13,17	39177	6,932

3.1.3.1. Comparação entre os dois combustíveis alternativos (B30 e B100)

No **Gráfico 12**, é apresentado um resumo dos valores das emissões de CO₂ para o B30 e B100, tendo em atenção os dois cenários considerados. Da sua análise pode-se verificar que a autarquia D é a que menos emissões de CO₂ liberta, enquanto a autarquia C é a que maior quantidade de CO₂ emite por ano, independentemente do tipo de combustível que o veículo possa consumir. Também se verifica que quanto maior a percentagem de biodiesel na mistura, menores são as emissões totais de CO₂ libertadas.

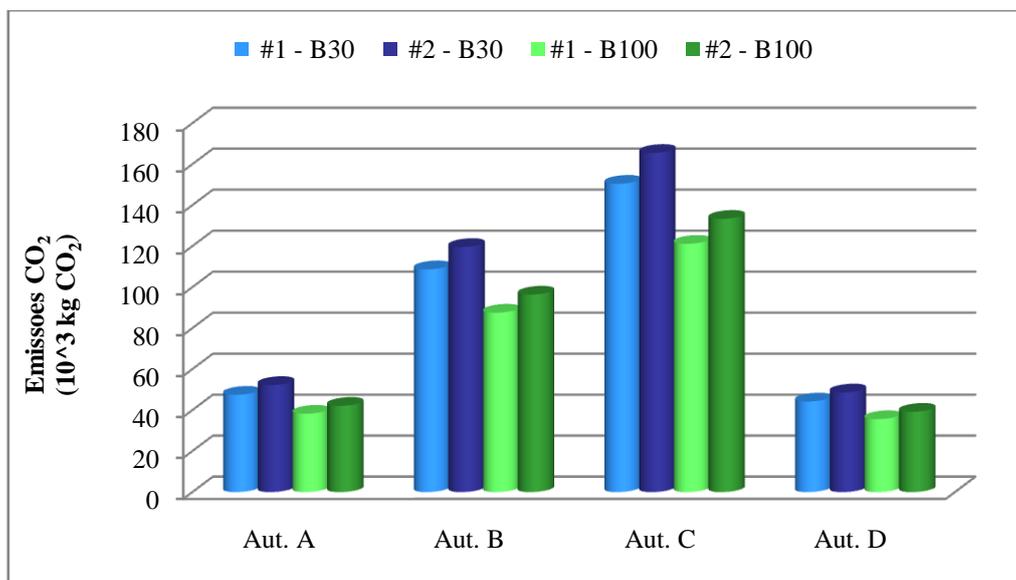


Gráfico 12 – Emissões de CO₂ por cenários considerados.

3.1.4. Comparação entre combustíveis (Gasóleo, B30 e B100)

Uma vez que o estudo seguido para estimar as emissões de CO₂ em veículos foi o mesmo independentemente do tipo de combustível, neste capítulo pretende-se analisar as possíveis diferenças entre os vários combustíveis. Como se pode verificar através do **Gráfico 13**, o gasóleo é o combustível que provoca mais emissões de CO₂ na recolha e transporte de RSU. A diferença entre cenários é de 10% em termos de consumo, mas independentemente do tipo de biodiesel usado, a diferença nas emissões de CO₂ são significativas. As emissões evitadas são aproximadamente 14,7 g CO_{2-eq}/MJ na substituição do gasóleo por B30, e 24,6 g CO_{2-eq}/MJ na substituição do gasóleo por B100. A diferença existente entre as emissões de CO₂ no uso de gasóleo e no uso de #2 – B30 é cerca de 19%, o que pode significar que, por

exemplo, caso a autarquia B utilizasse #2 – B30 nos veículos, esta teria uma poluição cerca de 14000 kg de CO₂ menos que a actual (**Tabela 26**).

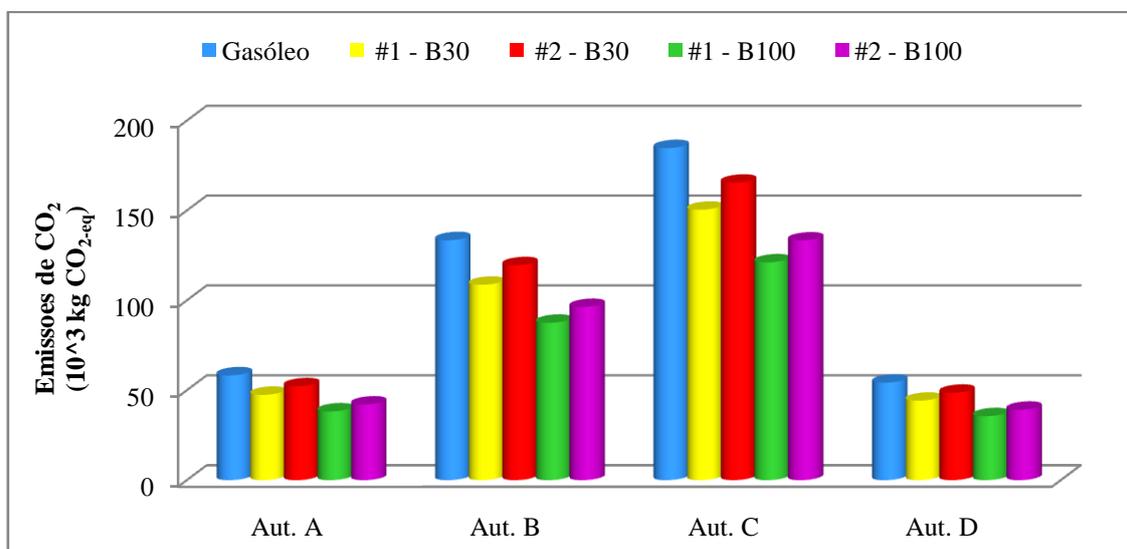


Gráfico 13 – Emissões de CO₂ associadas aos combustíveis em estudo.

Na **Tabela 26** apresentam-se os valores das emissões de CO₂ (por autarquia durante um ano) evitadas pela substituição do combustível fóssil convencional por biodiesel em diferentes misturas. A maior diferença verificada é entre as emissões estimadas pelo uso de gasóleo e as emissões estimadas pelo uso #1 – 100 (considerando que o veículo tem o mesmo consumo independentemente do combustível usado), sendo aproximadamente de 34%. Esta diferença significa uma diminuição nas emissões de CO₂ em cerca de 63500 kg, na Aut C.

Tabela 26 – Emissões evitadas de CO₂ (kg CO₂-eq) relativamente ao combustível gasóleo.

Combustível	Percentagem de poupança	Aut. A	Aut. B	Aut. C	Aut. D
Gasóleo	0%	0	0	0	0
#1 - B30	19%	10828	24788	34303	10078
#2 - B30	10%	6079	13916	19258	5657
#1 - B100	34%	20071	45949	63586	18682
#2 - B100	28%	16229	37153	51413	15105

A utilização de biodiesel como combustível alternativo ao gasóleo apresenta benefícios ambientais e, também poderá ter benefícios económicos. Na **Tabela 27** apresenta-se a possível poupança por ano, em termos económicos, se os veículos que actualmente

utilizam gasóleo passassem a utilizar biodiesel B30. Como é possível verificar, todas as autarquias beneficiariam com a utilização de B30, sendo mais notável a poupança na autarquia C. Também se verifica que um acréscimo de 10% no consumo dos veículos, faz baixar drasticamente o lucro final.

Tabela 27 – Lucro estimado na comparação gasóleo vs biodiesel.

Aut.	Custo/ano Gasóleo	Custo/ano #1 - B30	Custo/ano #2 - B30	Lucro Gasóleo vs #1 - B30	Lucro Gasóleo vs #2 - B30
A	18.913 €	16.325 €	17.957 €	2.589 €	956 €
B	43.297 €	37.371 €	41.108 €	5.926 €	2.189 €
C	59.978 €	51.769 €	56.946 €	8.210 €	3.033 €
D	17.601 €	15.192 €	16.711 €	2.409 €	890 €

Nota: Preço gasóleo=0,979 €/l. **Fonte:** PC.

Preço B30=0,845 €/l. **Fonte:** PC.

3.2. Alteração da tecnologia

Neste subcapítulo a segunda proposta é uma situação diferente, que consiste, por exemplo, no possível interesse das autarquias quererem renovar a frota, ou simplesmente quererem adquirir um veículo novo. Assim, são comparados dois veículos novos que utilizam combustíveis diferentes: gasóleo e gás natural. Este subcapítulo tem por objectivo avaliar comparativamente os dois veículos e identificar o veículo mais interessante do ponto de vista económico, quantificando o respectivo benefício. A escolha do veículo novo terá por base o período de retorno calculado.

3.2.1. Análise Económica do Investimento

O Período de Retorno (ou “*Payback Time*” – PBT – na terminologia Anglo-Saxónica) é o período de tempo necessário para a recuperação de um investimento. É um método simplista, pois não entra em conta com o custo do capital (valor temporal do dinheiro) e ainda apresenta o inconveniente de não ter em conta as receitas anuais (“*cash-flows*”) gerados depois de recuperados os capitais investidos (Freire, 2000). Na **Tabela 28** são apresentados os dados iniciais necessários para o cálculo do PBT de cada veículo novo em estudo.

Tabela 28 – Consumo médio, preço dos combustíveis e custo por quilómetro dos dois veículos novos.

Combustível	Consumo médio (l/km)	Preço Combustível (€/l)	Gasto por km (€/km)
Gasóleo	0,38 ¹	0,979 ²	0,372

Combustível	Consumo médio (m ³ /km)	Preço Combustível (€/m ³)	Gasto por km (€/km)
GN	0,42 ¹	0,55 ³	0,231

Fonte: ¹ Mercedes-Benz.

² Preço dos Combustíveis.

³ APVGN; Carneiro *et al.*, 2009.

Os dados fornecidos pela Mercedes-Benz são relativos a dois veículos comparáveis, com ano de fabrico e modelo iguais, tara e capacidade máxima idênticas. Os veículos que poderão ser substituídos pelo veículo novo são: na autarquia A o veículo 3, pois é o que tem maior consumo; na autarquia B o veículo 2, porque apesar de todos os veículos terem consumos elevados, o 2 é o que percorre maior distância e emite mais CO₂; na autarquia C o

veículo 3, porque emite mais CO₂; por fim, na autarquia D o veículo 2, pois tem maior consumo e percorre as maiores distâncias da autarquia.

Na **Tabela 29** é apresentado o período de retorno em cada autarquia, caso o veículo novo substituísse cada veículo referido anteriormente, e é uma continuação da tabela anterior. A coluna poupança por ano é relativa à economia verificada se for um veículo a GN a executar o “trabalho” de um a gasóleo.

Tabela 29 – Período de retorno comparando o veículo novo a gasóleo com o veículo novo a GN.

Aut.	Combustível	Distância (km/ano)	Gasto por ano (€/ano)	Poupança por ano (€/ano)	Preço do veículo (€)	Período de retorno (ano)
A veíc. 3	Gasóleo	12642	4703	1783	156000 ¹	87,5
	GN	12642	2920			
B veíc. 2	Gasóleo	30164	11222	4254	156000 ¹	36,7
	GN	30164	6968			
C veíc. 3	Gasóleo	32958	12261	4648	156000 ¹	33,6
	GN	32958	7613			
D veíc. 2	Gasóleo	18972	7058	2675	156000 ¹	58,3
	GN	18972	4383			

Fonte: ¹ Mercedes-Benz.

Da **Tabela 29** pode-se concluir que a compra de um veículo novo a GN não é viável economicamente em qualquer das situações consideradas, uma vez que apresentam um retorno do investimento muito longo.

3.2.2. Análise ambiental

Para a análise ambiental, tendo em atenção o veículo novo a GN, foi seguido o estudo efectuado por López *et al.*, 2008. O GN utilizado no estudo tem a composição 85% de CH₄ e 15% de C₂H₆ (etano) e PCI_{GN} de 44,80 MJ/kg, e os resultados, tendo em atenção o ciclo de vida, são os apresentados na **Tabela 30**.

Tabela 30 – Emissões totais de CO₂ tendo em atenção a ACV do GN.

	<i>Well to tank</i> Emissões (kg CO ₂ -eq/MJ)	<i>Tank to wheels</i> Emissões (kg CO ₂ -eq/MJ)	<i>Well to wheels</i> Emissões (kg CO ₂ -eq/MJ)
GN	0,0097	0,0620	0,0717

O valor das emissões totais multiplicado pelo consumo do veículo (0,42 m³/km), permite obter o valor final de **1,012 kg CO₂/km**. Na **Tabela 31** são apresentados os valores totais das emissões de CO₂, considerando que o veículo a GN substituirá o respectivo veículo em cada autarquia, como referido na **Tabela 29**. A azul corresponde o veículo que é substituído em cada autarquia e a quantidade de emissões de CO₂ que o veículo a GN emite.

Tabela 31 – Emissões de CO₂ tendo em conta a utilização do veículo a GN.

Aut. A	Emissões CO ₂	Aut. B	Emissões CO ₂	Aut. C	Emissões CO ₂	Aut. D	Emissões CO ₂
Veículo	(kg CO ₂)						
1	6261	1	28176	1	31078	1	10557
2	13616	2	30526	2	33541	2	19200
3	12794	3	24366	3	33353	3	19227
4	11405	4	28582	4	33212	-	-
5	6324	-	-	5	44333	-	-
Total	50400	Total	111650	Total	175517	Total	48984

As diferenças, quando comparadas as emissões totais com veículos a gasóleo, existem e são visíveis na **Tabela 32**. A primeira coluna “Emissões CO₂ (kg CO₂)” refere-se às emissões estimadas pelos veículos todos a gasóleo (**Gráfico 9**). A percentagem de poupança é diferente em cada autarquia, pois a substituição ocorre apenas num veículo. Como é possível verificar através da **Tabela 32**, a utilização de apenas um veículo a GN pode evitar até cerca de 16% de emissões de CO₂ por ano. A situação mais significativa verifica-se na autarquia B, podendo-se evitar aproximadamente 22 toneladas de CO₂ por ano.

Tabela 32 – Emissões de CO₂ evitadas por autarquia, utilizando um veículo a GN.

Aut.	Emissões CO ₂ (kg CO ₂)	Emissões CO ₂ (kg CO ₂)	Percentagem de poupança	Emissões evitadas por ano (kg CO ₂)
A	58318	50400	14%	7918
B	133509	111650	16%	21859
C	184754	175517	5%	9237
D	54282	48984	10%	5298

3.3. Optimização dos circuitos de recolha

Neste subcapítulo   avaliada a melhoria, em termos energéticos e ambientais, realizando a optimiza o dos circuitos nas quatro autarquias.

Em 2007, procedeu-se   optimiza o dos circuitos de recolha de RSU na autarquia A, reduzindo os dias de frequência em alguns pontos. As principais conclusões verificadas foram: redu o em 1/3 da distância percorrida e decréscimo de 15% no consumo dos veículos. A quantidade de RSU recolhida foi aproximadamente igual. Os novos circuitos resultaram numa poupança efectiva de recursos, tanto em termos de mão-de-obra, como redu o dos quil metros percorridos para a recolha da mesma quantidade de resíduos (Relatórios ECOGESTUS Lda.). Desta forma, e sendo aplicadas as mesmas conclusões às restantes autarquias, os resultados finais são apresentados na **Tabela 33**.

Tabela 33 – Emissões de CO₂ tendo em considera o a optimiza o dos circuitos.

Aut.	Consumo (MJ/km)	Distância (km)	Quantidade RSU recolhida (ton)	Emissões CO ₂ /km (kg CO ₂ /km)	Emissões CO ₂ (kg CO ₂)	Emissões/ton RSU (kg CO ₂ /ton)
A	11,57	33452	5580,20	0,988	33047	5,922
B	17,55	50521	9555,72	1,497	75655	7,917
C	12,33	99515	12095,33	1,052	104694	8,656
D	11,03	32673	5651,37	0,941	30760	5,443

Na **Tabela 34** e no **Gráfico 14** são apresentadas as emissões poupadas por ano, efectuando a optimiza o dos circuitos.   possível verificar que, tendo em aten o a optimiza o dos circuitos, esta a uma redu o de emissões de CO₂ na ordem dos 43%. Onde ocorre a maior poupança  , visivelmente, na autarquia C. Relativamente às emissões por tonelada de RSU recolhida, também ocorre uma diminui o de 43% comparativamente   situa o inicial, ocorrendo uma menor diferença nos valores entre autarquias.

Tabela 34 – Emissões de CO₂ evitadas por autarquia com optimiza o dos circuitos.

Aut.	Emissões (kg CO ₂) Sem optimiza�o	Emissões (kg CO ₂) Com optimiza�o	Emissões evitadas por ano (kg CO ₂)
A	58318	33047	25271
B	133509	75655	57854
C	184754	104694	80060
D	54283	30760	23523

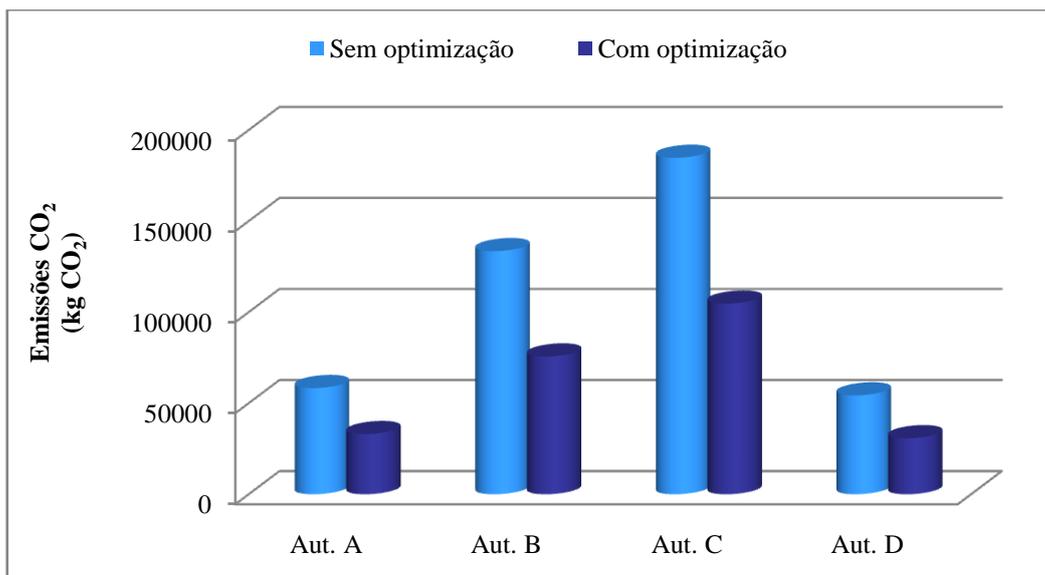


Gráfico 14 – Comparação das emissões de CO₂, sem otimização e com otimização.

Em termos económicos, a otimização da recolha considerada permite obter ganhos económicos avultados por ano, como é possível visualizar na **Tabela 35**.

Tabela 35 – Lucro estimado com a otimização dos circuitos.

Aut.	Custo sem otimização	Custo com otimização	Ganho económico
A	18.913 €	10.717 €	8.196 €
B	43.297 €	24.535 €	18.762 €
C	59.978 €	33.953 €	26.026 €
D	17.601 €	9.976 €	7.626 €

Nota: Preço gasóleo=0,979 €/l. **Fonte:** PC.

4. CONCLUSÕES

Com base na análise de resultados efectuada no capítulo anterior, nesta secção apresentam-se os aspectos considerados mais importantes, as conclusões do trabalho e são analisadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Os dados iniciais das autarquias utilizados para o presente estudo apresentam algumas semelhanças (o tipo de recolha e os veículos são maioritariamente da Euro 2 e 3) e foram demonstrados através de ID's. Existem veículos que apresentam melhor desempenho que outros e isso verificou-se ao longo das várias comparações entre autarquias, nos consumos e na eficiência do sistema de recolha e transporte de RSU.

Os valores registados de capitação média de RSU são inferiores à média nacional, e foi possível verificar que quanto maior o volume que cada habitante tem à sua disposição maior é a produção de RSU.

A eficiência do sistema foi determinada através da relação km/ton, tendo a autarquia C apresentado o maior valor, correspondendo assim, a uma menor eficiência no sistema de recolha. Apesar de vários factores condicionarem a eficiência, como a orografia e ocupação do território, a idade dos veículos, o tipo de resíduo a recolher, nesta investigação a organização da recolha é um dos parâmetros que mais parece contribuir para o elevado valor apresentado na autarquia C. As restantes autarquias apresentam valores aproximadamente iguais, uma vez que estão na mesma zona geográfica. As diferenças demonstradas entre veículos da mesma autarquia dependem da rota que fazem, isto é, circuitos urbanos e rurais, dependendo da distância entre contentores. Também se verificou que o número de veículos ao serviço de cada autarquia não influencia a eficiência do sistema de recolha.

Através dos indicadores foi possível concluir que os veículos mais recentes não têm necessariamente melhor desempenho quando se consideram os indicadores l/ton e km/ton, contribuindo assim para os elevados valores de emissões de CO₂.

Existe relação entre a eficiência da recolha e as emissões de CO₂ por tonelada e RSU recolhida, concluindo que os veículos que têm pior eficiência (que ocorre nos veículos novos) são os que emitem mais CO₂/ton.

As emissões de GEE poderão ser bons indicadores de desempenho das autarquias: quanto mais variados forem os parâmetros que condicionam a eficiência do sistema de recolha (orografia e ocupação do território, idade dos veículos, organização da recolha) maior é o seu peso em termos ambientais, ou seja, maior será a quantidade de emissões de CO₂ libertada.

Na primeira proposta (alteração do tipo de combustível), foram comparados dois combustíveis: o gasóleo e biodiesel de óleo de colza em diferentes misturas com o gasóleo. Ao realizar os cálculos para determinar as emissões tendo em atenção a ACV, verificou-se que a fase que mais contribui para as emissões de gases poluentes, em qualquer tipo de combustível, é a fase “*tank to wheels*”. Independentemente do tipo de combustível que se utilize nos veículos, verifica-se que, das autarquias estudadas, a autarquia D é a que menos emissões de CO₂ liberta, enquanto a autarquia C é a que maior quantidade de CO₂ emite por ano. Uma vez que se estudaram as emissões de CO₂ em veículos que podem utilizar gasóleo e biodiesel, foi possível retirar algumas conclusões, nomeadamente que o gasóleo é o combustível que provoca mais emissões de CO₂ na recolha e transporte de RSU (0,0853 kg CO_{2-eq}/MJ). Demonstrou-se que a substituição do gasóleo convencional por biodiesel contribuiria significativamente para a diminuição das emissões de GEE e que essa diminuição é mais significativa consoante o aumento da percentagem de biodiesel na mistura. A diferença existente entre as emissões de CO₂ na utilização de gasóleo e de B30 é cerca de 19%, o que pode significar que, por exemplo, caso a autarquia B utilizasse B30 nos veículos teria uma poluição cerca de 24788 kg de CO₂ menor que a actual. A maior diferença verificada é entre as emissões provocadas pelo uso de gasóleo e as emissões provocadas pelo uso de B100, sendo aproximadamente de 34%. Esta diferença poderá significar uma diminuição nas emissões de CO₂ cerca de 63,6 toneladas por ano, na autarquia C. Em termos económicos, verificou-se que todas as autarquias beneficiariam com a utilização de B30, sendo mais notável a poupança na autarquia C (8000 € se os veículos mantiverem os consumos e 3000 € se os veículos consumirem mais 10%).

A análise económica (inserida na alteração da tecnologia motora dos veículos) permitiu comparar dois veículos que possuíam diferenças tanto no combustível como no motor, e foram comparados um veículo novo a gasóleo e um veículo novo a gás natural. Esta comparação não apresenta benefícios a nível económico, mas a nível ambiental tem um impacto positivo. Da análise e tendo em conta os elevados custos de um veículo novo, foi possível concluir que a compra de um veículo novo a GN não é viável economicamente em qualquer das situações, uma vez que apresenta um período de retorno do investimento muito longo (superior a 33,6 anos). No entanto, a nível ambiental pode-se evitar até cerca de 16% de emissões de CO₂ por ano. A situação mais significativa verifica-se na autarquia B, podendo-se evitar aproximadamente 22 toneladas de CO₂ por ano.

Para finalizar, na última proposta é realizada uma optimização dos circuitos e verifica-se que esta apresenta benefícios a nível ambiental e económico, pois ocorre diminuição da

distância percorrida e dos consumos. Em termos ambientais, permite uma poupança de emissões de CO₂ de 43%, correspondendo a cerca de 80 toneladas por ano na autarquia C, que em termos económicos equivale a cerca de 26000 €.

4.1. Limitações do estudo e Trabalhos futuros

No decorrer desta investigação apresentada nesta dissertação foram identificadas algumas oportunidades para trabalhos futuros de investigação. Apresentam-se de seguida algumas dessas propostas:

- Realizar a aplicação em maior número de autarquias do País, de forma a verificar se há tendência de com a optimização da recolha diminuir as emissões de CO₂;
- Realizar a aplicação em autarquias cujos veículos sejam mais novos (relativamente recentes), verificando se há ou não menores emissões de CO₂;
- Efectuar, numa perspectiva internacional, a comparação com outras autarquias estrangeiras, analisando as principais semelhanças e diferenças;
- Realizar estudos mais aprofundados com veículos de recolha e transporte de RSU movidos a gás natural. Este é importante para o estudo da viabilidade de implementação deste tipo de combustível como alternativa ao gasóleo em Portugal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J. M. e Parena, R. (2004). “*Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água*”, Lisboa, LNEC-IRAR, 284 pp. (Referido por Teixeira *et al.*, 2008)
- APVGN – Associação Portuguesa do Veículo a Gás Natural. Disponível em <http://www.apvgn.pt> (consultado em Janeiro 2009).
- ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1995), “*Toxicological profile for fuel oils*”. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Beer, T., Grant, T., Brown, R., Edwards, J., Nelson, P., Watson, H. and Williams, D. (2000), “*Life-cycle Emission Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles*”. CSIRO Atmospheric Research Report C/0411/1.1/F2 to the Australian Greenhouse Office.
- Bentes, C. A. (2006), “*Recolha de RSU por sistema infraestrutural em depressão*”, Tese de mestrado em Construção. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Carneiro, F., Cardoso, J. M. e Sousa, M. (2009), “*Transportes Urbanos de Braga: Gasóleo vs. Gás Natural*”. Apresentação para a disciplina de Energia e Ambiente, Mestrado em Gestão Ambiental, Universidade do Minho. Janeiro.
- Challen, B. e Baranescu, R. (2003), “*Diesel Engine Reference Book, second edition*”. Elsevier Science & Technology. 682 pp.
- Chang, R. (1994), “*Química 5ª Edição*”. Lisboa – Instituto Superior Técnico, McGraw-Hill.
- Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro. Publicado em Diário da República, 1ª série, N.º 171.
- DGA – Direcção Geral do Ambiente (2000), “*Proposta para um Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável*”. Portugal. (Referido por Teixeira *et al.*, 2008)
- EERE – Energy Efficiency and Renewable Energy (2006), “*Biodiesel Handling and Use Guidelines, third edition*”, U.S. Department of Energy.

- EPA – Environmental Protection Agency (2002), “*A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions*”, Draft Technical Report, 420-P-02-001. Air and Radiation, October, 126 pp.
- EPA – Environmental Protection Agency (2004), “*Inventory of U. S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2002*” Annex 2. 430-R-04-003, Washington.
- Freire, F. (2000), “*Avaliação de Projectos de Investimento com Gás Natural – Módulo 5*”. Textos de apoio do Curso de Pós-Graduação em Redes e Instalações de Gás Natural. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Gomes, J. (2001), “*Poluição Atmosférica – Um manual universitário*”. Porto: Publindústria.
- Heywood, J. B. (1988), “*Internal Combustion Engines Fundamentals*”. McGraw-Hill International Editions, New York.
- Karagiannidis, A., Xirogiannopoulou, A., Perkoulidis, G. and Moussiopoulos, N. (2004), “*Assessing the Collection of Urban of Urban Solid Wastes: a Step Towards Municipality Benchmarking*”. Water, Air, and Soil Pollution, Greece, pp. 397-409. (Referido por Teixeira *et al.*, 2008)
- Lameiras, H. (2006), “*Relatório da qualidade do ar na Região Centro 2006*”, CCDRC, Direcção de Serviços de Ambiente, Divisão de Licenciamento e Promoção Ambiental.
- Levy, J. Q. e Cabeças, A. J. (2006), “*Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos*”. Lisboa: AEPSA.
- López, J. M^a., Gómez, Á., Aparicio, F. and Sánchez, Fco. J. (2008), “*Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid*”. Applied Energy, 6 pp.
- Malça, J. e Freire, F. (2004), “*Biodiesel: energia alternativa (renovável?). Emissões de GEE e avaliação de eficiência energética – Metodologia e Aplicações*”. 4^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, 17 e 18 de Novembro. ISEP, Porto.
- Malça, J. and Freire, F. (2008), “*Uncertainty analysis applied to the life cycle of biodiesel*”. Bioenergy: Challenges and Opportunities, International Conference and Exhibition on Bioenergy, April 6th – 9th, Univ. Minho, 8 pp.

- Marques, S. (2007), “*Energias Fósseis versus Energias Renováveis: proposta de intervenção de Educação Ambiental no 1º Ciclo do Ensino Básico*”. Mestrado em Estudos da Criança Promoção da Saúde e do Meio Ambiente. Universidade do Minho, Braga, Junho, 241 pp.
- Martinho, M. G. M. e Gonçalves, M. G. P. (2000), “*Gestão de Resíduos*”. Lisboa: Universidade Aberta.
- Mercedes-Benz Portugal. Disponível em <http://www.mercedes-benz.pt> (consultado em Janeiro 2009).
- MI & IFQC – Methanol Institute and International Fuel Quality Center (2006), “*A Biodiesel Primer: Market & Public Policy Developments, Quality, Standards & Handling*”.
- NE – Normas Europeias de emissões poluentes, 2008. Disponível em <http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php> (consultado em Novembro 2008).
- NGA – National Governors Association (2008), “*Securing a Clean Energy Future – Greener Fuels, Greener Vehicles: A State Resource Guide*”. 36 pp.
- PC – Preço dos Combustíveis. Disponível em <http://www.precoscombustiveis.dgge.pt/> (consultado em Janeiro 2009).
- PCESE – Parecer do Comité Económico e Social Europeu sobre a Proposta de Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à promoção de veículos de transporte rodoviário não poluentes COM (2005) 634 final – 2005/0283 (COD). Jornal Oficial nº C 195 de 18/08/2006 p. 0026 – 0028. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2006:195:0026:01:PT:HTML> (consultado em Novembro 2008).
- PERSU II (2007), “*Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos: 2007-2016*”. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. 196 pp.
- Peterson, C. L. and Hustrulid, T. (1998), “*Carbon cycle for rapeseed oil biodiesel fuels*”. University of Idaho, Moscow. Biomass and Bioenergy Vol. 14, nº 2, pp. 91-101.
- Puppán, D. (2002), “*Environmental evaluation of biofuels*”. Periodica Polytechnica Ser. Soc. Man. Sci.; 10: nº 1, pp. 95-116. (Referido por Malça e Freire, 2004)

- Rocha, N. M. C. (2001), “*Utilização do Gás Natural em Veículos Pesados de Passageiros*”. Departamento Técnico do Produto, MAN Veículos Industriais (Portugal) Soc. Unip., Lda. Avintes, Janeiro, 19 pp.
- Soltic, P., Edenhauser, D., Thurnheer, T., Schreiber, D. and Sankowski, A. (2009), “*Experimental investigation of mineral diesel fuel, GTL fuel, RME and neat soybean and rapeseed oil combustion in a heavy duty on-road engine with exhaust gas aftertreatment*”. Fuel 88, pp. 1-8.
- Teixeira, C. A., Guerra, P. e Bentes, I. (2008), “*Avaliação de Desempenho em Sistemas de Gestão de RSU: O caso da Resíduos do Nordeste EIM*”, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. UTAD, Vila Real, Setembro, 16 pp.