



**Henrique João
Castanheiro Henriques**

**Viabilidade do Uso de Bioetanol como Combustível
Alternativo**



**Henrique João
Castanheiro Henriques**

**Viabilidade do Uso de Bioetanol como Combustível
Alternativo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri

Presidente

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa
Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientadora

Prof. Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho
Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Coorientador

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Doutora Ana Cláudia Relvas Vieira Dias
Bolsreira Pós-Doutoramento do Cesam – Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

No decorrer da presente Dissertação foram várias as pessoas que contribuíram, de diferentes formas, para que esta fosse executada com sucesso.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Margarida Coelho e ao meu coorientador, Professor Doutor Fernando Neto, não só por todo o apoio e disponibilidade demonstrada mas também por todas as críticas construtivas.

O meu agradecimento à minha namorada, Marisa Bastos, pelo consistente apoio, motivação e paciência demonstrada.

Um agradecimento à minha prima, Catarina Castanheiro, pela ajuda e motivação prestada.

O meu agradecimento aos restantes familiares pelo constante apoio e motivação prestada.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus pais, que sempre me apoiaram e me deram todas as condições para continuar os meus estudos.

Palavras-chave

Avaliação de Ciclo de Vida, Bioetanol, Combustíveis alternativos, Consumo Energético, Emissões.

Resumo

Os problemas relacionados com o consumo energético e emissões de poluentes relativos ao setor dos transportes representam seguramente a maior preocupação ao nível europeu no que respeita às emissões de gases de efeito de estufa (GEE) e à poluição atmosférica. O preço do petróleo é outra preocupação crescente, que gera a necessidade de poupança de combustível. Uma das formas de resolver / minimizar estes problemas é através da aposta em novas tecnologias, como os combustíveis alternativos.

As ferramentas para Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permitem identificar e quantificar os consumos energéticos e as emissões de poluentes de um combustível desde a sua produção até à sua utilização nos veículos. No entanto, as ferramentas numéricas mais apropriadas para a avaliação de ciclo de vida de combustíveis encontram-se concebidas, muitas vezes, para uma realidade distinta da realidade Europeia / Portuguesa. Assim, pretende-se com este trabalho atualizar a ferramenta numérica de ACV GREET (desenvolvida pelo *Argonne National Laboratory*), para contemplar a realidade Europeia no que se refere ao ciclo de vida do bioetanol. A atualização do modelo GREET originou o modelo MACVEtOH, que após ser calibrado foi submetido a um caso de estudo baseado no percurso do Oceanário de Lisboa à Universidade de Aveiro com veículos ligeiros de passageiros.

Na análise de fonte-ao-depósito (WTP) concluiu-se que o bioetanol, independentemente da origem deste, apresenta maior consumo energético total (de 6,9 a 10,2 vezes o consumo da gasolina) e de energia fóssil (1,6 a 3,3 vezes o valor de referência) do que a gasolina. Considerando apenas as emissões de poluentes locais, concluiu-se que a gasolina é o combustível menos poluente. Contudo, relativamente às emissões de GEE concluiu-se que o bioetanol apresenta emissões inferiores à gasolina (de 0,3 a 0,65 vezes o valor da gasolina). Na análise de fonte-à-roda (WTW), relativamente ao consumo energético total por quilómetro percorrido, concluiu-se que o veículo FFV E85 apresenta um consumo energético superior ao do veículo ICE a gasolina (1,6 a 2,1 vezes) enquanto o veículo ICE E10 apresenta um consumo praticamente igual ao do veículo ICE a gasolina (1,04 a 1,06 vezes o do veículo padrão). Quanto ao consumo de energia fóssil por quilómetro percorrido, o veículo FFV E85 apresenta valores inferiores aos do veículo a gasolina (0,32 a 0,48 vezes o consumo do veículo de referência), enquanto o veículo ICE E10 apresenta um consumo praticamente igual ao do veículo a gasolina (0,93 a 0,95 vezes o valor do veículo de referência), sendo que o bioetanol de gramíneas, resíduos florestais e árvores são os que consomem menos energia de origem fóssil. Quanto aos poluentes locais, a gasolina é a que apresenta emissões inferiores. Relativamente aos GEE, o veículo FFV E85 apresenta menores emissões que o veículo a gasolina (0,13 a 0,56 vezes as emissões do veículo de referência) enquanto o veículo ICE E10 apresenta emissões praticamente iguais às do veículo ICE a gasolina (0,936 a 0,938 vezes as emissões do veículo padrão).

Keywords

Life Cycle Assessment, Bioethanol, Alternative Fuels, Energy Consumption, Emissions.

Abstract

The problems related to energy consumption and pollutant emissions for the transportation sector certainly represent a major concern at European level regarding greenhouse gases emissions (GHG) and local air pollution. The oil price is another growing concern, which generates the need for fuel savings. One way to solve / minimize these problems is through investment in new technologies like alternative fuels.

Tools for Life Cycle Assessment (LCA) can identify and quantify energy consumption and pollutant emissions of a fuel since its production to its use in road vehicles. However, the most appropriate numerical tools for LCA of fuels are often developed for a different reality from Europe / Portugal. Thus, the main objective of this research work was to update the LCA model GREET (developed by Argonne National Laboratory), to behold the European reality regarding the life cycle of bioethanol. The update of GREET model originated MACVetOH model, which was submitted after being calibrated to a case study based on the route between Lisbon Oceanarium to the University of Aveiro with passenger cars.

In analysis Well-To-Pump (WTP) bioethanol (regardless its source), leads to a higher total energy consumption (6,9 to 10,2 times the gasoline consumption) and fossil energy use (1,6 to 3,3 times the value reference) than gasoline. Considering local pollutants emissions, it was concluded that gasoline is the less polluting fuel. However, bioethanol leads to lower GHG emissions than gasoline (from 0,3 to 0,65 times the value of the gasoline). In analysis Well-To-Wheels (WTW), for the total energy consumption per kilometer, it was concluded that the FFV E85 vehicle has a higher total energy consumption than ICE E10 vehicle (1,6 to 2,1 times relative to the reference vehicle) while the ICE E10 vehicle has almost equal consumption than ICE gasoline vehicle (1,04 to 1,06 times relative to the reference vehicle). Regarding the fossil fuel consumption per kilometer travelled, the FFV E85 vehicle has lower consumption than the gasoline vehicle (0,32 to 0,48 times relative to the reference vehicle), while the ICE E10 vehicle has almost equal consumption than ICE gasoline vehicle (0,93 to 0,95 times relative to the reference vehicle), and that cellulosic bioethanol consumes less fossil energy. Regarding local pollutants, gasoline shows lower emissions. For GHG, the FFV E85 vehicle has lower emissions than gasoline vehicle (0,12 to 0,56 times relative the reference vehicle), while the ICE E10 vehicle has almost equal emissions than gasoline vehicle (0,936 to 0,938 times relative the reference vehicle).

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Quadros	v
Nomenclatura.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Setor dos Transportes.....	1
1.2. O Protocolo de Quioto	3
1.3. Objetivos	5
1.4. Estrutura.....	6
2. O Bioetanol	7
2.1. Contexto dos Biocombustíveis	7
2.2. Propriedades do Bioetanol	8
2.3. Visão Global do Bioetanol.....	9
2.4. Potencial de Produção de Bioetanol no Mundo	16
2.5. Tipos de Etanol	18
2.6. Principais Matérias-Primas para a Produção de Bioetanol.....	19
2.7. Processos de Produção de Bioetanol.....	22
3. Revisão Bibliográfica	27
3.1. Análise do Equilíbrio Energético.....	27
3.2. Análise dos GEE	29
3.3. Análise dos Impactes Ambientais	30
4. Avaliação de Ciclo de Vida.....	33

4.1.	Descrição da Avaliação de Ciclo de Vida	33
4.2.	Benefícios de um Estudo ACV	34
4.3.	Limitações de um Estudo ACV	35
5.	Metodologia	37
5.1.	Plano de Trabalho	37
5.2.	O Modelo GREET	40
6.	O Modelo MACVEtOH	41
7.	Resultados e sua Discussão	71
7.1.	Calibração do Modelo	71
7.2.	Avaliação de Ciclo de Vida do Bioetanol.....	73
8.	Conclusões e Trabalho Futuro	101
9.	Referências Bibliográficas	105
10.	Anexos.....	109

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução e tendências dos transportes na Europa [2].....	1
Figura 2 - Evolução dos GEE na UE [1].	2
Figura 3 – Evolução das emissões de GEE nos países da UE no setor dos transportes [1]. .	3
Figura 4 - Metas das emissões de GEE na Europa no âmbito do Protocolo de Quioto (2008-2012) relativamente às emissões do ano base (1990) [3].	4
Figura 5 – Evolução da quota de biocombustíveis no setor dos transportes [1].	5
Figura 6 - Produção de bioetanol no período de 1982 a 2006 [18].	10
Figura 7 - Produção de bioetanol no Brasil de 1960 a 2006 [20].....	11
Figura 8 - Hidrólise do amido e celulose, seguido da fermentação da glicose em bioetanol (adaptado de [15]).....	23
Figura 9 - Energia fóssil para diferentes sistemas de bioetanol [50].....	28
Figura 10 – Emissões de CO ₂ equivalente para diferentes sistemas de bioetanol [50].	29
Figura 11 - Estágios do ciclo de vida do produto [53].	33
Figura 12 - Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida [54].....	33
Figura 13 - Fluxograma do plano de trabalho da Dissertação.....	38
Figura 14 - Representação da Avaliação de Ciclo de Vida efetuada pelo GREET [56].	40
Figura 15 - Aspeto da folha de cálculo “Apresentação” do modelo MACVetOH	43
Figura 16 - Seleção da quantidade de energia libertada por unidade de massa/volume.	43
Figura 17 - Dados relativos à produção de bioetanol.	44
Figura 18 - Dados relativos à simulação.	46
Figura 19 - Dados sobre o transporte de matérias-primas/combustíveis.....	48
Figura 20 – Fração de GN e crude utilizada para a produção de GPL.	54
Figura 21 - Comparação dos consumos energéticos totais WTP.	76

Figura 22 - Comparação dos consumos energia fóssil WTP.	78
Figura 23 - Comparação das emissões de VOC numa análise WTP.....	81
Figura 24 - Comparação das emissões de CO numa análise WTP.	82
Figura 25 - Comparação das emissões de NO _x numa análise WTP.....	83
Figura 26 - Comparação das emissões de PM numa análise WTP.	84
Figura 27 - Comparação das emissões de GEE numa análise WTP.	85
Figura 28 – Comparação dos consumos energéticos numa análise WTW.....	87
Figura 29 - Comparação dos consumos de energia fóssil numa análise WTW.	89
Figura 30 – Comparação das emissões de VOC numa análise WTW.	90
Figura 31 – Comparação das emissões de CO numa análise WTW.	91
Figura 32 – comparação das emissões de NO _x numa análise WTW.....	92
Figura 33 – Comparação das emissões de PM numa análise WTW.....	93
Figura 34 – Comparação das emissões de GEE numa análise WTW.....	94
Figura 35 – Distribuição do consumo de energia total WTW nas várias etapas.....	96
Figura 36 – Distribuição das emissões de GEE WTW nas várias etapas.	97

Índice de Quadros

Quadro 1 - Propriedades do bioetanol e da gasolina [15].....	8
Quadro 2 - Produção mundial de bioetanol no período de 2000-2004 (G1) [16].	9
Quadro 3 - Potencial de produção de bioetanol para todas as matérias-primas (G1) [37]... ..	17
Quadro 4 - Resumo dos impactes dos processos de produção de bioetanol comparativamente com o combustível convencional (1/2) [48].	30
Quadro 5 - Resumo dos impactes dos processos de produção de bioetanol comparativamente com o combustível convencional (2/2) [48].	31
Quadro 6 - Calendarização do plano de trabalho da Dissertação.	39
Quadro 7 - Propriedades dos combustíveis líquidos [4].....	49
Quadro 8 - Propriedades dos combustíveis gasosos [4].	49
Quadro 9 - Propriedades dos combustíveis sólidos [4].	49
Quadro 10 - Fatores de aquecimento global [58].	50
Quadro 11 - Frações de carbono e enxofre dos poluentes [4].	51
Quadro 12 - Fatores de emissão para as tecnologias estacionárias em g/kWh (1/3) [4, 57, 58, 59, 60].....	51
Quadro 13 - Fatores de emissão para as tecnologias estacionárias em g/kWh (2/3) [4, 57, 58, 59, 60].....	52
Quadro 14 - Fatores de emissão para as tecnologias estacionárias em g/kWh (3/3) [4, 57, 58, 59, 60].....	52
Quadro 15 - Fatores de emissão para o gasoduto a GN em g/kWh [60].	53
Quadro 16 - Fatores de emissão para o comboio a gásóleo em g/kWh [61].	53
Quadro 17 - Fatores de emissão para os petroleiros e navios de transporte a fuel óleo em g/kWh [4].....	54
Quadro 18 - Peso relativos das tecnologias estacionárias na produção de combustíveis [4].	55

Quadro 19 - Valores da eficiência global e emissões urbanas para o petróleo e seus derivados [4, 60, 62].....	55
Quadro 20 - Peso relativo dos combustíveis nos processos de extração de petróleo e produção de seus derivados [4].	56
Quadro 21 - Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extração e processamento do GN e produção de GPL [4].....	57
Quadro 22 - Valores da eficiência global e emissões urbanas para GN e GPL [4, 60, 62]. 57	
Quadro 23 - Peso relativo dos combustíveis nos processos de extração e processamento de GN e produção de GPL [4].....	58
Quadro 24 - Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extração e processamento do carvão [4].....	59
Quadro 25 - Valores da eficiência global e emissões urbanas para o carvão [4, 60].	59
Quadro 26 - Peso relativo de cada um dos combustíveis nos processos de extração e processamento do carvão [4].	60
Quadro 27 - Peso relativo das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção de bioetanol (1/2) [4].	61
Quadro 28 - Peso relativo das tecnologias processos de produção de bioetanol (2/2) [4]. .	61
Quadro 29 - Peso relativo de cada um dos combustíveis no processo de agricultura [4]. ..	61
Quadro 30 - Peso relativo por fonte energética na produção de energia elétrica em Portugal [63].	62
Quadro 31 - Valores das emissões urbanas para cada um dos combustíveis inerentes à produção elétrica [4].	63
Quadro 32 - Pesos relativos e eficiência das tecnologias de combustão estacionária na produção elétrica [4].	63
Quadro 33 - Fatores de emissão por unidade de energia elétrica produzida.	64
Quadro 34 - Consumos energéticos na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de eletricidade por parte destes [60].	64
Quadro 35 - Emissões de poluentes na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de eletricidade por parte destes [60].	65

Quadro 36 - Consumos energéticos na produção de torres eólicas incluído na produção de eletricidade por parte destas [60].	65
Quadro 37 - Emissões de poluentes na produção de torres eólicas [60].	65
Quadro 38 - Peso relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção dos fertilizantes, herbicidas e inseticidas [4].	66
Quadro 39 - Características dos modelos <i>flexifuel</i> analisados [66, 67, 68].	71
Quadro 40 - Comparação do consumo e emissões de CO ₂ dos veículos analisados com os dados do modelo MACVEtOH.	72
Quadro 41 - Extensão do gasoduto a GN no exterior de Portugal desde a Argélia [72].	75
Quadro 42 - Distância e meio de importação do petróleo bruto e do carvão.	75
Quadro 43 - Locais de importação de fertilizantes, herbicidas e inseticidas [73, 75, 76].	76
Quadro 44 - Análise da energia associada à produção de equipamentos agrícolas relativamente ao consumo energético total WTP [kJ/kWh].	79
Quadro 45 - Influência dos métodos para estimar os coprodutos do bioetanol a partir de trigo no consumo energético total WTP.	79
Quadro 46 - Comparação dos processos de produção de bioetanol para os tipos de biomassa incluídos no modelo MACVEtOH.	80
Quadro 47 - Análise da inclusão da exportação de eletricidade no processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina.	81
Quadro 48 - Resumo da análise WTP do bioetanol relativamente à gasolina.	86
Quadro 49 - Resumo WTW para os veículos a bioetanol comparativamente ao veículo ICE a gasolina.	98

Nomenclatura

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

CGF – Alimentos de Glúten de Milho “*Corn Gluten Foods*”

CGM – Farelo de Glúten de Milho “*Corn Gluten Meal*”

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DM – Moagem Seca “*Dry Milling*”

DDGS - Grãos Secos de Destilaria “*Distiller's Dried Grain with Solubles*”

E10 – Mistura com 90% de gasolina e 10% de bioetanol

E85 – Mistura com 85% de bioetanol e 15% de gasolina

EIA - *Energy Information Administration*

ETBE - Etil-Terc-Butílico

EUA – Estados Unidos da América

FFV – Veículos de Combustível Flexível

GEE – Gases de Efeito de Estufa

GN – Gás Natural

GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

GREET - *Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation*

H₂ – Hidrogénio

HC - Hidrocarbonetos

HFCS - Xarope de Milho Rico em Frutose

ICAO - *International Civil Aviation Organization*

ICE – Motor de Combustão Interna “*Internal Combustion Engine*”

MI – Milhões de Litros

MTBE - Éter Metilo Tetrabutileno

N₂O – Óxido Nitroso

NO_x – Óxido de Azoto

OMI - Organização Marítima Internacional

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PIB – Produto Interno Bruto

PM – Partículas

PTW – Depósito-às-rodas “Pump To Wheels”

SO₂ – Dióxido de Enxofre

UE – União Europeia

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

VOC - Compostos Orgânicos Voláteis

WM – Moagem Húmida “*Wet Milling*”

WTP – Fonte-ao-Depósito “*Well To Pump*”

WTW - Fonte-à-Roda “*Well To Wheels*”

1. Introdução

1.1. Setor dos Transportes

As discussões da política de transportes tendem a lidar apenas com a oferta de transporte. Mas a procura crescente do transporte está a prejudicar os esforços para resolver muitos dos problemas ambientais mais prementes. Abordar os aspetos ambientais mais importantes em conjunto com a oferta será a abordagem mais efetiva.

O número de passageiros que utiliza o transporte rodoviário e aéreo tem vindo a aumentar nos países da União Europeia (UE). Os níveis de crescimento têm sido particularmente acentuados na Europa do Leste onde o aumento no transporte aéreo tem sido acompanhado pela expansão dos transportes de baixo custo e onde os níveis de aquisição de automóveis estão a convergir com os da Europa ocidental [1].

Na figura seguinte pode observar-se a evolução e tendências dos transportes na Europa.

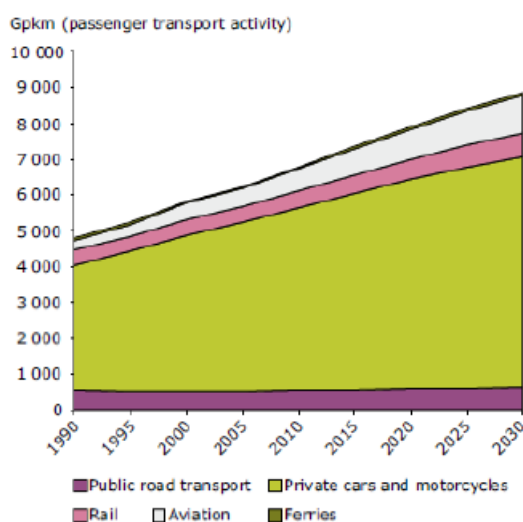


Figura 1 - Evolução e tendências dos transportes na Europa [2].

O transporte aéreo de passageiros é o setor que atualmente apresenta um maior crescimento. O transporte marítimo, por outro lado, diminuiu 9% no período de 1996-2006 (UE-27), baixando a sua quota modal para cerca de 1%. Os veículos de duas rodas expandiram ligeiramente a sua quota de mercado para cerca de 2%. O transporte ferroviário e os sistemas de metro correspondem a 7% do transporte de passageiros, enquanto os veículos ligeiros continuam a ser o modo dominante com uma quota de 73% [1].

A elevada percentagem modal do automóvel privado e do tráfego aéreo tem impactos ambientais negativos em todos os níveis geográficos. O transporte de passageiros contribui fortemente para a poluição atmosférica e sonora, para a fragmentação do *habitat* e para o aumento das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) [1].

As emissões de GEE provenientes do setor dos transportes continuam a crescer, em contraste com outros setores como a habitação, indústria e produção de energia. O transporte rodoviário continua a ser a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa para os transportes de mercadorias e de passageiros. Embora medidas tenham sido implementadas para melhorar a eficiência energética do transporte de passageiros e do transporte rodoviário de mercadorias, os ganhos foram muito ultrapassados pela crescente procura dos transportes. Relativamente a outros modos de transporte, a aviação internacional e o transporte marítimo têm evidenciado o maior crescimento das emissões de GEE ao longo da última década. Essas emissões não são regulamentadas pelo Protocolo de Quioto e até agora nenhum regulamento para a redução das emissões destes transportes foi criado. A Organização Marítima Internacional (OMI) e a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) estão a investigar diferentes opções para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa nos respetivos setores [1].

As emissões de GEE no setor dos transportes aumentaram 28% durante o período 1990-2006 (Figura 2). O aumento ocorreu apesar de as frotas terem aumentado a sua eficiência energética, o que portanto, reflete o aumento do volume de transporte.

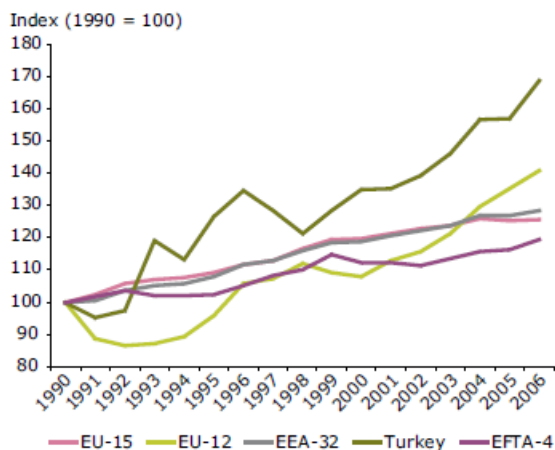


Figura 2 - Evolução dos GEE na UE [1].

A maioria dos países da UE registou um aumento nas emissões dos transportes (Figura 3), principalmente devido ao aumento dos movimentos dos transportes. Estónia, Lituânia, Bulgária e Alemanha foram os únicos países que apresentaram redução nas emissões de GEE no setor dos transportes, comparando 1990 e 2006 [1].

Na figura seguinte pode observar-se a evolução das emissões de GEE nos países da UE no setor dos transportes, tendo como comparação as emissões de 1990.

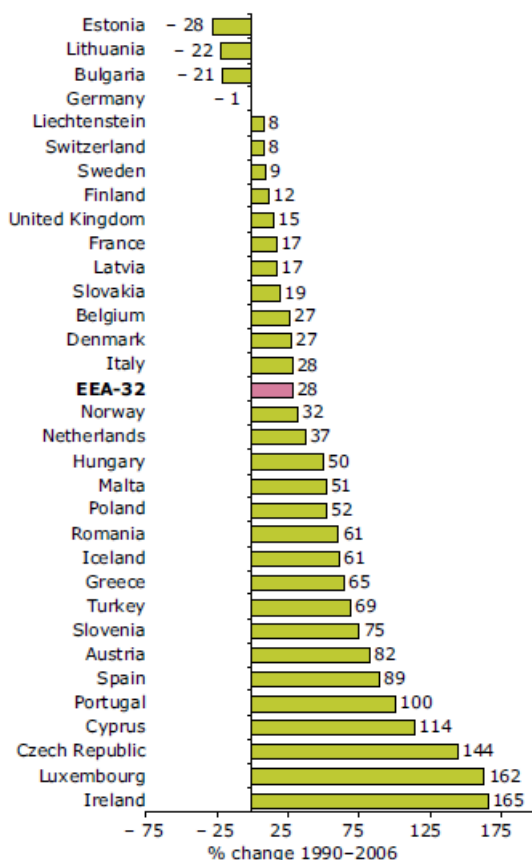


Figura 3 – Evolução das emissões de GEE nos países da UE no setor dos transportes [1].

1.2. O Protocolo de Quioto

Face aos graves impactos ao nível de emissões de GEE têm surgido medidas políticas de forma a reduzir as mesmas. A medida mais destacável foi o Protocolo de Quioto.

O Protocolo de Quioto é um protocolo da “*United Nations Framework Convention on Climate Change*” (UNFCCC), que visa um compromisso fixado à escala mundial, com exceção de alguns países como os Estados Unidos da América (EUA), de redução das emissões de GEE[3].

O protocolo (que foi inicialmente aprovado em 11 de Dezembro de 1997 em Quioto, no Japão e entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005) fixou uma redução das emissões de GEE de 5,2% entre 2008 e 2012 face aos valores do ano de referência que é 1990. No caso da UE a redução global de GEE seria de 8%. No entanto nem todos os países terão que diminuir as suas emissões de GEE. A UNFCCC adotou o princípio de "responsabilidades comuns mas diferenciadas". As partes acordaram que a maior parte das emissões globais de GEE têm origem nos países desenvolvidos e que as emissões “*per capita*” nos países em desenvolvimento ainda são relativamente baixas. Portanto, a quota de emissões globais

originárias dos países em desenvolvimento poderá aumentar para satisfazer as necessidades sociais e de desenvolvimento [3].

Na figura seguinte pode observar-se as metas estipuladas pelo protocolo de Quioto para as emissões de GEE (2008-2012) relativamente ao ano base (1990). À esquerda pode ver-se as metas estipuladas em termos de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO₂), e à direita em termos de percentagem.

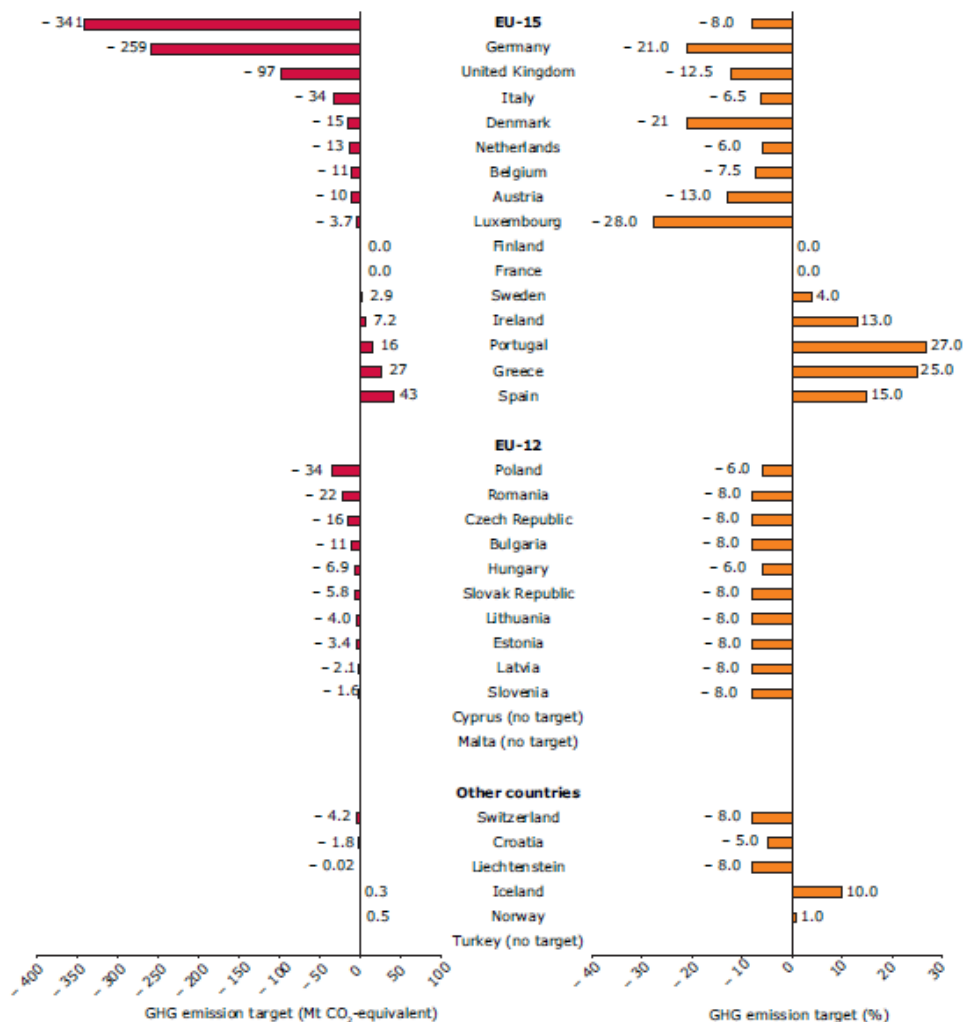


Figura 4 - Metas das emissões de GEE na Europa no âmbito do Protocolo de Quioto (2008-2012) relativamente às emissões do ano base (1990) [3].

O aumento dos preços dos combustíveis fósseis tem vindo a criar uma oportunidade para as alternativas renováveis aumentarem a sua quota de mercado. Infelizmente, a escolha mais óbvia - os biocombustíveis - seguiu uma evolução similar à do petróleo. Isto verificou-se principalmente devido ao aumento da procura de alimentos e à falta de produção agrícola o que provocou um debate sobre a dimensão ética do deslocamento da produção agrícola a partir de plantas comestíveis para a produção de combustíveis [1].

Os Estados Membros da UE estão a planear aumentar a quota de biocombustíveis no setor dos transportes de 5,75% em 2010 para 10% em 2020 [1]. Contudo a Europa não é a única região que visa aumentar o uso de biocombustíveis – a nível mundial prevê-se um aumento do uso de biocombustíveis de 2% em 2010, para 6% de biodiesel e para 8% de bioetanol em 2020 [1]. Para se atingir as metas estabelecidas a nível da quota de biocombustíveis no setor dos transportes serão necessárias melhorias significativas no rendimento das colheitas e uma expansão das áreas cultivadas para a produção de biocombustíveis [1].

Na Figura 5 é apresentada a meta da UE-27 e a meta a nível mundial da quota de biocombustíveis no setor dos transportes.

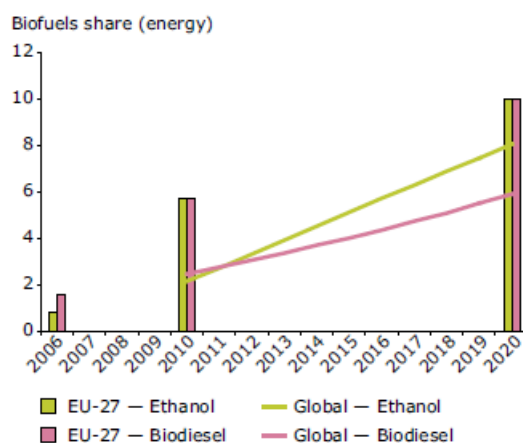


Figura 5 – Evolução da quota de biocombustíveis no setor dos transportes [1].

1.3. Objetivos

O principal objetivo da presente Dissertação de Mestrado consiste no desenvolvimento de um modelo de avaliação de ciclo de vida (ACV) para o bioetanol obtido a partir de diferentes matérias-primas baseado na ferramenta numérica “*Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation*” (GREET) [4], desenvolvida pelo “*Argonne National Laboratory*”. Este *software*, que funciona em Excel, realiza a ACV de combustíveis, mas tem por base parâmetros e dados de entrada característicos da realidade Norte-Americana. Como tal, efetuou-se uma atualização da base de dados para contemplar a realidade Europeia no que se refere ao ciclo de vida do bioetanol.

No desenvolvimento da dissertação foram tidos em conta todos os aspetos relacionados com a produção do bioetanol, desde a produção e transporte de matéria-prima, até à produção, distribuição do produto final e seu consumo nos veículos rodoviários.

A base de dados criada contemplou todas as entradas ao longo de todo o processo de produção, sejam elas de matérias-primas, fertilizantes, energia, assim como todas as emissões inerentes ao processo de ciclo de vida do bioetanol.

A presente dissertação contemplou ainda a análise de um caso de estudo com a construção de cenários alternativos.

1.4. Estrutura

A presente Dissertação de Mestrado encontra-se dividida em 9 capítulos ao longo dos quais são abordados os vários temas apresentados.

No **capítulo 1** apresenta-se uma análise introdutória do panorama atual do setor dos transportes bem como os objetivos da presente dissertação.

O **capítulo 2** é dedicado à descrição de todo o processo de produção do bioetanol, bem como às suas propriedades. Numa primeira fase será mostrada a situação atual do bioetanol. Posteriormente serão apresentados todos os processos inerentes à produção de bioetanol, desde a produção e transporte de matéria-prima, até à produção, distribuição e armazenamento do produto final.

No **capítulo 3** apresenta-se a revisão bibliográfica onde será abordado o estado de arte no que diz respeito à ACV da produção e utilização de bioetanol a partir de diferentes matérias-primas.

O **capítulo 4** é dedicado à descrição do processo de ACV, indicando os benefícios e as limitações desta análise.

No **capítulo 5** é apresentada a metodologia de base e o plano de trabalho para a execução da presente dissertação. Neste capítulo é ainda apresentado e descrito o funcionamento do modelo numérico de avaliação de ciclo de vida GREET.

No **capítulo 6** é apresentado o modelo desenvolvido ao longo da dissertação. Nesta fase é descrito todo o modelo bem como os pressupostos tidos em consideração.

O **capítulo 7** é dedicado aos resultados e sua discussão. Será apresentado um caso prático de aplicação do novo modelo e são feitas comparações com resultados obtidos através da utilização de outros programas.

O **capítulo 8** é dedicado às conclusões obtidas na presente Dissertação. Neste ponto, são apresentadas ainda sugestões sobre possíveis trabalhos futuros.

No **capítulo 9** são apresentadas as referências bibliográficas consultadas ao longo da realização da dissertação.

2. O Bioetanol

Neste capítulo será descrito todo o processo de produção do bioetanol, bem como as suas propriedades. Numa primeira fase será mostrada a situação atual da produção e utilização do bioetanol. Posteriormente serão apresentadas as propriedades do bioetanol bem como todos os processos inerentes à sua produção. Serão ainda discutidos os aspetos ambientais associados à utilização do bioetanol.

2.1. Contexto dos Biocombustíveis

Desde o ano 2000 tem-se verificado um rápido crescimento na procura por bioetanol. Os elevados preços do petróleo, as preocupações ambientais e a diversidade de interesses na segurança energética fizeram do bioetanol uma alternativa atraente, particularmente nos países industrializados [5].

Nos países em desenvolvimento o foco encontra-se mais no desenvolvimento rural, na criação de empregos e na melhoria do acesso à energia [6]. Contudo, no setor agrícola, o bioetanol pode trazer benefícios significativos para os agricultores e pode ser uma forma de reduzir custos e distorções de mercado das políticas de apoio existentes para a agricultura [7]. Por fim, as limitações da capacidade de reposição das refinarias têm também tido um impacto sobre o aumento dos preços dos derivados do petróleo [8], os quais favorecem a economia dos biocombustíveis.

A maioria dos especialistas aceita que o transporte individual continuará a desempenhar um papel fundamental no futuro e que o petróleo continuará a ser a principal fonte de energia para as próximas décadas, apesar dos esforços para se encontrar outras alternativas [9]. Os biocombustíveis (bioetanol e biodiesel) são a alternativa mais viável no futuro imediato, principalmente porque podem ser utilizados em motores de combustão interna recorrendo a infraestruturas de combustível existentes, que é um dos principais obstáculos à introdução de outros combustíveis [9]. O bioetanol requer poucas alterações ou nenhuma, especialmente em misturas de bioetanol até 10% (E10). Nos EUA, por exemplo, todos os construtores de automóveis garantem o uso de E10 desde 1980 [10].

2.2. Propriedades do Bioetanol

O bioetanol (álcool etílico, álcool de cereais, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ou EtOH) é um biocombustível líquido, que pode ser produzido a partir de diferentes fontes de biomassa e tecnologias de conversão. O bioetanol é um combustível alternativo atraente porque é um recurso renovável de base biológica que é oxigenado, com potencial para reduzir as emissões de partículas nos motores de ignição por compressão [11]. No entanto, por exemplo, a produção de bioetanol a partir de milho causa maior erosão no solo e usa uma maior quantidade de adubos à base de azoto do que qualquer outra cultura. Estas duas limitações ambientais também se aplicam à cana-de-açúcar produzida no Brasil [12].

O bioetanol tem um maior índice de octano, limites mais amplos de inflamabilidade e superior calor de vaporização que a gasolina. Essas propriedades permitem uma maior taxa de compressão e menor tempo de queima do motor, o que leva a uma maior eficiência do bioetanol relativamente à gasolina num motor de combustão interna (ICE) [13]. As principais desvantagens do bioetanol incluem a sua menor densidade energética (o bioetanol tem 66% da energia contida em igual volume de gasolina), a sua corrosividade, a menor pressão de vaporização (tornando difícil o arranque a frio), a miscibilidade com água e a toxicidade para os ecossistemas [14]. Algumas das propriedades do bioetanol e da gasolina são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Propriedades do bioetanol e da gasolina [15].

Propriedades dos Combustíveis	Gasolina	Bioetanol
Peso Molecular [kg/kmol]	111	46
Densidade [kg/L] a 15°C	0,75	0,80-0,82
Teor de Oxigénio [% em peso]		34,8
Poder Calorífico Inferior (PCI) [MJ/kg a 15°C]	41,3	26,4
Poder Calorífico Inferior [MJ/L a 15°C]	31	21,2
Índice de Octano (RON)	97	109
Índice de Octano (MON)	86	92
Índice de Cetano	8	11
Relação Estequiométrica do ar/combustível [kg Ar/kg Combustível]	14,7	9
Temperatura de Ebulição [°C]	30-190	78
Pressão de Vaporização [kPa] a 15°C	75	16,5

O índice de octano do bioetanol é superior ao da gasolina, portanto, o bioetanol tem melhores características antidetonantes. Esta qualidade pode ser explorada se a taxa de compressão do motor for ajustada em conformidade. O conteúdo de oxigénio do bioetanol também leva a uma maior eficiência, o que resulta num processo de combustão mais limpa a temperaturas relativamente baixas. A pressão de vaporização, uma medida da volatilidade dos combustíveis, é muito baixa para o bioetanol. Isso indica uma lenta

evaporação que tem a vantagem de a concentração de emissões evaporativas do ar permanecerem relativamente baixas o que reduz o risco de explosões. No entanto, a combinação da baixa pressão de vaporização do bioetanol com a sua temperatura de ebulição, é desvantajosa relativamente ao arranque a frio. Sem ajudas, motores que utilizam bioetanol não podem arrancar com temperaturas abaixo de 20 ° C [15].

A presença de oxigénio na produção de bioetanol melhora a combustão e, portanto, reduz as emissões de hidrocarbonetos (HC), de monóxido de carbono (CO) e de partículas (PM). No entanto a utilização de combustíveis oxigenados tende a aumentar as emissões de óxidos de azoto (NO_x). O bioetanol é adequado para a mistura de combustível nos motores a gasolina devido ao seu alto índice de octano, baixo valor de cetano e elevado calor de vaporização que impede a autoignição do combustível [16]. A mistura mais popular para veículos ligeiros é conhecida como o E85, e contém 85% de bioetanol e 15% de gasolina. No Brasil, o bioetanol é derivado da cana-de-açúcar e é usado puro ou misturado com gasolina numa mistura chamada “*Gasohol*” (24% de bioetanol e 76% de gasolina) [17]. Em vários estados dos EUA, uma pequena quantidade de bioetanol (10% em volume) é adicionada à gasolina, conhecida como E10.

2.3. Visão Global do Bioetanol

Os últimos anos têm testemunhado um crescente interesse no bioetanol como um substituto à escala global para a gasolina no setor dos transportes, devido a uma combinação de fatores, inclusive ambientais, sociais e relativos à segurança energética. Conforme ilustrado no Quadro 2 e na Figura 6, a produção mundial de bioetanol tem aumentado significativamente nos últimos anos.

Quadro 2 - Produção mundial de bioetanol no período de 2000-2004 (Gt) [16].

Continentes/Países	2000	2001	2002	2003	2004
<u>Europa</u>	3,56	4,03	4,08	4,27	4,01
EU-15	2,07	2,11	2,22	2,37	2,58
<u>América</u>	19,26	20,68	23,26	26,23	29,32
Brasil	0,59	1,54	2,62	4,81	15,28
USA	7,60	8,11	9,60	11,18	12,90
<u>Ásia</u>	5,90	6,05	6,23	6,65	6,64
<u>Oceânia</u>	0,15	0,18	0,16	0,16	0,27
<u>África</u>	0,54	0,55	0,58	0,59	0,59
África do Sul	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41
<u>Mundo</u>	29,81	31,89	34,71	38,30	40,73

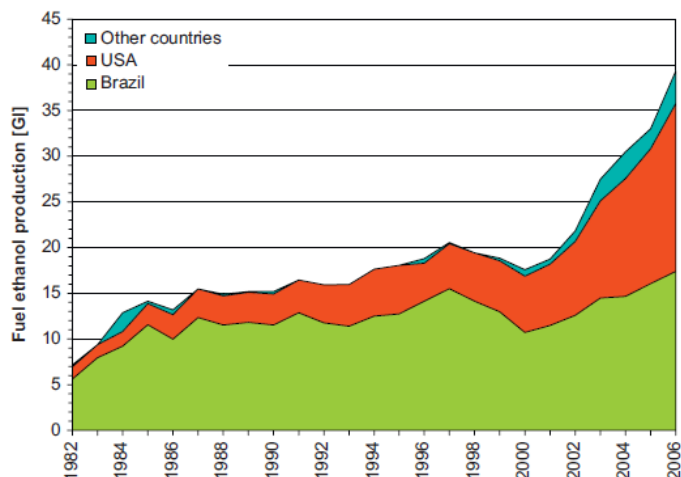


Figura 6 - Produção de bioetanol no período de 1982 a 2006 [18].

Dados recentes indicam que a produção e o consumo mundial são dominados por Brasil e EUA, sendo responsáveis por 70% da produção mundial, com 15,3 GJ e 12,9 GJ, respectivamente [18].

Em 2005, cerca de 60% da produção de bioetanol foi obtida a partir da cana-de-açúcar, 30% a partir de cereais (principalmente milho), 7% a partir de bioetanol sintético (de etileno a partir do carvão, etc.) e 3% a partir de outras matérias-primas. Recentemente, cerca de 40 países introduziram ou demonstraram interesse no bioetanol [19]. Até ao final de 2006, existiam regulamentos para mistura dos biocombustíveis em nove países (Brasil, Colômbia, Alemanha, França, Malásia, Filipinas, Tailândia, EUA e República Dominicana). Em quatro países regulamentos foram validados em alguns estados / regiões (Índia, China, Canadá e EUA - Havaí, Minnesota, Montana, Washington, Wisconsin) [19]. As principais experiências sobre o uso de bioetanol são descritas seguidamente.

Visão Global e Perspetivas no Brasil

Além da existência de veículos a álcool puro, todos os veículos a gasolina vendidos no Brasil podem utilizar combustível que contenha uma percentagem de bioetanol de 20-25% [em termos de volume (E20-E25)]. O bioetanol hidratado (bioetanol misturado com água – normalmente 2% a 7% de água) é usado puro em veículos, enquanto o bioetanol anidro (bioetanol que contém teores de água muito baixos – no Brasil o máximo é de 0,7%) é misturado na gasolina. No Brasil, os veículos de combustível flexível (FFV) também podem ser abastecidos com bioetanol hidratado [18].

A experiência brasileira com misturas de bioetanol - gasolina remonta à década de 1930, mas só em 1975 quando o Programa Nacional do Alcool (Proalcool) foi criado, a gasolina começou a ser substituída numa escala significativa em todos os veículos de passageiros.

Em 1979, o Governo Brasileiro decidiu-se a favor da produção em grande escala de bioetanol hidratado em motores especialmente modificados. Apesar do seu sucesso considerável (ou seja, a redução das importações de petróleo, a estabilização dos mercados do açúcar e reforço da competitividade brasileira), o Proalcol não foi isento de polémica, em parte devido ao apoio financeiro dado pelo governo, que também beneficiava os produtores ineficientes. Em meados da década de 1980 as críticas aumentaram ainda mais devido ao declínio dos preços internacionais do petróleo e do grande excedente de gasolina. Na década de 1990, o governo reduziu o seu apoio devido a uma crise económica do país, que combinado com outros fatores levou à escassez de bioetanol causando sérias dificuldades aos consumidores. Os preços dos combustíveis foram liberalizados e até ao final de 1990 todos os subsídios para a indústria do bioetanol foram removidos [18].

As vendas de veículos movidos a bioetanol puro começaram a crescer novamente em 2001 devido a uma grande diferença de preços entre o bioetanol e a gasolina, causada pela combinação dos altos preços do petróleo e pela redução dos custos do bioetanol. Outro fator importante foi o lançamento de FFV's em 2003, aumentando a procura do bioetanol consideravelmente; os FFVs atingiram 85% das vendas de veículos novos em 2006. O sucesso dos FFV's e o preço relativamente baixo do bioetanol quando comparado com o da gasolina são as principais razões pelas quais se prevê que o mercado interno de bioetanol cresça significativamente num futuro próximo. Em 2006, a produção de bioetanol (anidro mais hidratado) foi de 17,8 Gt, conforme ilustrado na Figura 7. O Brasil é o único país no mundo com condições para uma rápida expansão da capacidade de produção de bioetanol no curto e médio prazo, devido à disponibilidade de terra, tecnologia, capital, “*know-how*” e mão-de-obra relativamente barata. Atualmente cerca de 80 novas unidades industriais estão em diferentes fases de construção, estando 335 unidades já em operação. Estima-se que a capacidade de produção de bioetanol possa aumentar para o dobro até 2015. Esse potencial de expansão não está isento de críticas, tanto no Brasil como internacionalmente, visto existirem preocupações com a monocultura da cana-de-açúcar, uso da água, potencial de impactos ambientais e da biodiversidade, condições de trabalho, etc. [18].

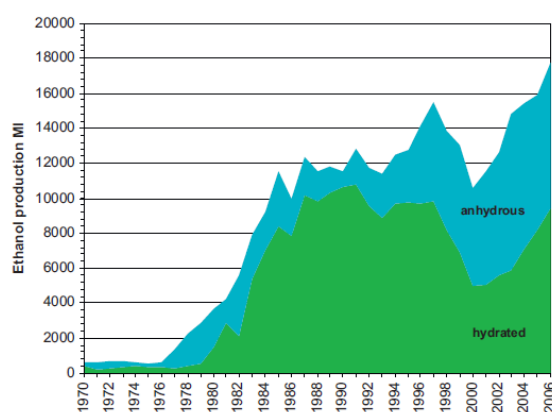


Figura 7 - Produção de bioetanol no Brasil de 1960 a 2006 [20].

Visão Global e Perspetivas nos EUA

Os EUA têm o maior mercado de bioetanol, com uma produção estimada de 18,4 GJ em 2006 (dobro do valor registado em 2002) [21]. Estima-se que a capacidade de produção duplicou novamente entre 2007 e 2009. A produção de bioetanol está concentrada no Centro - Oeste do país, mas desde 2006 o bioetanol tem sido consumido por todo o país e misturado em 30% da gasolina consumida [22]. A mistura E85 também é usada, mas a sua expansão é limitada pela falta de infraestruturas. Além das razões ambientais e da influência do setor agropecuário, uma outra força motriz é o desejo de reduzir a dependência externa do petróleo, juntamente com a eliminação do éter metilo tetrabutílico (MTBE) como estimulador do octano, banido em 23 estados em 2005. Uma das principais preocupações com o MTBE é a contaminação da água bem como os seus efeitos na saúde [18].

Em 2005, o governo dos EUA assinou os direitos do “*Energy Policy Act of 2005*”, criando a “*National Renewable Fuels Standard*”, que estabeleceu metas de 28,4 GJ de combustível renovável a ser utilizado no setor dos transportes até 2012 (bioetanol numa vasta maioria). Em 2006, a “*Energy Information Administration*” (EIA) [23] estimou que o consumo de bioetanol pode chegar a 55,3 GJ em 2030. Entretanto no início de 2007 o Governo Federal dos EUA estabeleceu uma nova meta de 132 GJ de combustíveis renováveis (etanol também na maior parte) em 2017 como parte de um plano estratégico para reduzir o consumo de gasolina em 20% [24].

Além disso, cinco estados (principalmente os potenciais produtores em grande escala) introduziram legislação local para auxiliar os combustíveis renováveis. Por exemplo, o Minnesota adotou uma meta de 20% de bioetanol a misturar na gasolina até 2013 [22]. Nos EUA, o milho é a matéria-prima principal para a produção de bioetanol [22]. Em 2006, o custo de produção de bioetanol a partir do milho foi de cerca de 0,33-0,50 euros por litro em comparação com 0,21-0,29 euros por litro para o custo da produção de bioetanol a partir de cana-de-açúcar no Brasil [25]. O balanço energético da produção de bioetanol (a proporção entre a energia contida no biocombustível e a energia do combustível fóssil usada para a sua produção) a partir do milho também é desfavorável, 1,25 nos EUA, [18] comparado com 8,3-10 no Brasil [26]). No longo prazo, a competitividade do bioetanol produzido a partir do milho dependerá dos progressos nas fases da cadeia de produção (ou seja, reduzir o consumo energético, maior autossuficiência energética, desenvolvimento de novos coprodutos, etc.) Estima-se que os custos de produção podem ser reduzidos em 8-15% no médio prazo [25], enquanto o rácio de energia pode ser melhorada para cerca de 1,3-2,9 se os combustíveis fósseis utilizados nos processos industriais forem substituídos pelos combustíveis obtidos a partir de biomassa (como por exemplo as aparas de madeira) [27].

No entanto, apesar do grande interesse dos produtores de milho, a sustentabilidade a longo prazo do bioetanol nos EUA vai depender da utilização de novas matérias-primas. Consideráveis esforços estão a ser feitos para desenvolver novas rotas de produção de combustíveis líquidos a partir de material celulósico. Em 2006, uma previsão do EIA [23] afirmou que até 2030 mais de 93% da produção de bioetanol poderia ser à base de milho e menos de 7% baseada em matérias-primas celulósicas. Entretanto, estimativas mais recentes indicam que a produção de bioetanol baseada no milho pode chegar a 55-57 Gt entre 2012 e 2017, sendo os restantes obtidos a partir de material celulósico [28]. As estimativas de energia dos EUA são as de que através de esforços de investigação e desenvolvimento, os custos do bioetanol celulósico possam ser de 0,35 euros por litro em 2012 e aproximadamente 0,32 euros por litro em 2017 [24].

Visão Global e Perspetivas na Europa

A UE tem uma forte política de promoção do uso de combustíveis alternativos, nomeadamente de biocombustíveis. Em 2001, uma diretiva da UE estabeleceu que até 2005 a utilização de biocombustíveis deveria satisfazer 2% do consumo total do combustível para transportes (base de energia), enquanto a meta para 2010 foi fixada em 5,75%. No entanto, até agora, a contribuição média dos biocombustíveis tem sido mínima (0,5%, 0,6% e 1% em 2003, 2004 e 2005, respetivamente) e entre 2003-2005 dez países da EU ainda não tinham usado o biodiesel ou o bioetanol como substitutos dos combustíveis convencionais [18].

A Diretiva “*EU Biofuels*” deixou os Estados Membros da UE decidirem individualmente sobre as políticas e as medidas necessárias para atingir as suas metas. Este grau de flexibilidade faz com que seja muito difícil estimar-se o potencial dos biocombustíveis a longo prazo na UE. No documento “*Energy Policy Document*”, publicado em Janeiro de 2007, a UE adotou uma estimativa mais conservadora para 2020 de 10% (com base nas tendências atuais) do que os 20% sugeridos nos documentos anteriores. No entanto, muitos acreditam que até 10% é irrealista [18].

Na UE, apenas uma pequena fração de etanol é utilizado como combustível. A produção de bioetanol na UE abrangeu cerca de 6% da produção mundial em 2005 (2,7 Gt). Os principais países produtores de bioetanol na Europa são a Alemanha, a Espanha, a França, a Polónia e a Suécia, que representavam cerca de 90% da produção de bioetanol em 2006 na Europa [29]. Coincidentemente, dois dos principais produtores europeus, a França e a Espanha consomem gasolina misturada com etil-terc-butílico (ETBE), de 8-10% [18]. O ETBE produzido é parcialmente renovado quando o bioetanol é utilizado.

As matérias-primas mais utilizadas na UE para a produção de bioetanol são a beterraba e o trigo, embora algumas unidades ainda em construção possam utilizar o milho - principalmente nos novos Estados Membros da UE. Ultimamente, os excedentes de vinho foram também convertidos para a produção de bioetanol. O custo da matéria-prima é o fator maior desfavorável na UE, com preços que variam de 0,74 euros por litro para o trigo a 0,85 euros por litro para a beterraba, em comparação com 0,21 euros por litro no Brasil [30]. A perspectiva de curto ou médio prazo é que os custos de produção poderão ser reduzidos até 15-20% [25]. O rácio de energia da produção de bioetanol a partir de beterraba ou trigo está estimado em cerca de 2 [25].

Dadas as limitações da produção de bioetanol a partir das tecnologias atuais disponíveis e matérias-primas, a UE está a exercer um esforço considerável no desenvolvimento de biocombustíveis de segunda geração, baseado em materiais celulósicos. A conversão de material linhocelulósico na produção de bioetanol tem recebido atenção especial na Suécia e, em menor medida, no Reino Unido, Espanha e Países Baixos. Além disso, outras rotas de gaseificação de biomassa para a produção de gás de síntese e posterior conversão em biocombustíveis [metanol, ou hidrogénio (H_2)] também estão a ser investigados intensamente em muitos dos Estados Membros da UE [31].

A política de curto prazo é evitar a aplicação em larga escala de biocombustíveis até que os custos das matérias-primas possam ser reduzidos significativamente. Alguns países, como a Alemanha e França, têm interesses políticos e culturais nos seus setores agrícolas e as políticas nacionais são a favor das produções locais de biodiesel e bioetanol [31]. No entanto, o alto custo dos subsídios levou alguns países a repensar a sua política.

Visão Global e Perspetivas de Outros Países

Mais de 40 países no mundo têm demonstrado interesse no bioetanol. O Japão é um dos principais consumidores de gasolina no mundo e é fortemente dependente do petróleo importado. O país tem considerado o uso de bioetanol em larga escala, ou ETBE, visando a sua segurança energética e a redução das emissões de GEE para cumprir as suas obrigações do Protocolo de Quioto. Desde 2005, o uso da mistura de bioetanol E3 passou a ser obrigatório e misturas de bioetanol E10 começaram a ser utilizadas em algumas regiões - um regulamento E3 foi definido a nível nacional e expandiu-se para E10 até 2010. No entanto, há uma certa resistência devido ao baixo número de fornecedores de bioetanol e aos interesses das companhias petrolíferas que preferem misturas de gasolina com ETBE em vez de bioetanol [32].

O Japão é um importante produtor de bioetanol sintético, mas não tem condições de produzir bioetanol a partir da biomassa em larga escala. Em 2005, o país foi o segundo maior importador de etanol - mais de 500 milhões de litros (MI) [18] -, utilizado

principalmente como combustível. Se os mandatos forem finalmente implementados, incluindo misturas de ETBE, o Japão pode tornar-se num dos principais mercados no mundo para o bioetanol.

A China é atualmente o terceiro maior produtor mundial de bioetanol e é um foco de atenção considerável dado o potencial da dimensão do seu mercado. Em 2005, a sua capacidade de produção de bioetanol (de todos os tipos) foi estimada em 3,8 Gt [33], enquanto o consumo de bioetanol atingiu cerca de 1Gt [34]. Existem quatro empresas de combustível do estado na China, com uma capacidade de produção combinada de 1,3 Gt de bioetanol por ano, embora existam outras fábricas [35]. Há três novas centrais em construção, com uma capacidade combinada de 1,5 Gt por ano [34]. Na China, mais de 80% de bioetanol é produzido a partir de cereais (arroz, milho, etc), enquanto a produção a partir de cana-de-açúcar representa cerca de 10% [34].

Previa-se que a capacidade total da China podia chegar a 2,5 Gt em 2010 e até 12,6 Gt em 2020 [34]. Dada a restrição à disponibilidade de terra, há uma política de diversificação das matérias-primas como a celulose. Há pelo menos duas centrais piloto em operação na produção de bioetanol, uma a partir de palha de arroz e outra a partir de caules de sorgo sacarino [35].

Até agora é obrigatório o uso de E10 em nove províncias, que correspondem a cerca de um sexto dos veículos daquele país. Entre as várias razões para apoiar o bioetanol, estão: a redução da dependência do petróleo, a melhoria da qualidade do ar nas grandes cidades, a estabilização dos preços dos cereais e a melhoria do rendimento dos agricultores. Em resumo, pode dizer-se que a China pretende desenvolver bioetanol passo-a-passo, e vai dar prioridade à produção de bioetanol a partir de culturas não relacionadas com os alimentos [36].

A Índia é o segundo maior produtor mundial de cana-de-açúcar e um grande produtor de bioetanol, utilizado principalmente como matéria-prima química. Entretanto, a maior parte da produção de cana-de-açúcar ainda é destinada ao seu mercado interno de açúcar que é enorme [37]. Recentemente, a Índia tem considerando seriamente a produção de bioetanol e um regulamento para a mistura E10 já foi introduzido em todo o país [33].

A Índia tem o potencial para ser um grande produtor de bioetanol a partir da cana-de-açúcar, mas a restrição à disponibilidade de terra poderá ser um fator desfavorável. Além disso, ao contrário do Brasil, a cana-de-açúcar é produzida por pequenos agricultores e a redução de custos será mais difícil.

A Tailândia importa 90% do petróleo consumido, o que custa 13% do produto interno bruto (PIB) do país. O Governo tailandês tem procurado seguir uma política de produção nacional e consumo de biodiesel e bioetanol. A eliminação do MTBE levou ao aumento do consumo de bioetanol para 340 Mt, em 2006 [33]. A principal matéria-prima usada na

produção de bioetanol é a mandioca (visto o país ser um dos maiores produtores mundiais). Uma longa tradição, alta produtividade e experiência com essa cultura, juntamente com o preço elevado do açúcar no mercado interno, torna improvável que a cana-de-açúcar se torne numa matéria-prima principal na produção de bioetanol na Tailândia. Estima-se que em 2009 existiam pelo menos 24 centrais de bioetanol em operação, com capacidade total de produção de 1,7-1,8 Gt até o final de 2011 [18].

A cana-de-açúcar é uma cultura tradicional em muitos países da América Latina e como tal o potencial de produção de bioetanol é bastante significativo nessa região. Na América Central e nas Caraíbas, os principais produtores de cana-de-açúcar estão a considerar a opção do bioetanol, a fim de modernizar e diversificar a indústria da cana-de-açúcar. Ao contrário da maioria dos outros países, o objetivo principal é a exportação para os EUA [37]. Os EUA e o Brasil assinaram recentemente uma parceria para promover a produção de bioetanol em toda a região. O mercado dos EUA é também o principal alvo no Peru, onde a produção de bioetanol tem uma forte conotação política com plantações de cana-de-açúcar que são destinadas a substituir as plantações de cocaína. Na Colômbia, um programa nacional foi lançado em 2001, onde a mistura gasolina – etanol é obrigatória em cidades com mais de 500.000 habitantes. Cinco novas destilarias de bioetanol de cana-de-açúcar foram estabelecidas entre 2005 e 2006, com uma capacidade de produção de cerca de 200 Ml por ano [38].

2.4. Potencial de Produção de Bioetanol no Mundo

O desejo e a necessidade de reduzir as importações de petróleo, reduzir as emissões de GEE, melhorar a qualidade do ar e impulsionar as economias rurais têm sido os principais vetores de promoção do bioetanol. Houve várias tentativas para estimar a produção mundial e a procura do bioetanol, mas é difícil chegar a estimativas confiáveis devido ao grande número de incertezas (por exemplo, procura de energia no setor dos transportes, percentagem de combustível substituído por bioetanol, custos e evolução das tecnologias, etc.).

Alguns estudos foram realizados para a estimativa da capacidade total de produção de bioetanol incluindo outras matérias-primas (por exemplo, cereais, beterraba e material linhocelulósico). Os resultados até 2050 estão resumidos no Quadro 3.

Quadro 3 - Potencial de produção de bioetanol para todas as matérias-primas (Gt) [37].

Países/Regiões e Matérias-Primas	2010	2020	2030	2050
Brasil - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	21.0	61.3	121.2	309.6
Resto da América Latina - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	4.4	24.2	42.7	59.8
Índia - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	5.9	23.6	49.7	100.6
África - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	1.6	16.6	35.6	65.9
Ásia (exceto China) - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	5.6	19.8	31.2	54.4
China - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	1.9	7.6	16.0	38.6
Médio Oriente - Bioetanol a partir da cana-de-açúcar	0.3	1.2	2.0	3.7
Mundo - Bioetanol a partir de cana-de-açúcar	40.7	154.3	298.4	632.6
UE - Bioetanol a partir de cereais e beterraba	12.1	27.3	27.3	27.3
América do Norte - Bioetanol a partir de cereais	28.9	68.2	68.2	68.2
Resto do Mundo - Bioetanol a partir de cereais	4.6	10.6	10.6	10.6
Bioetanol Linhocelulósico	0.0	21.2	203.0	1,036.4
Bioetanol total a partir de todas as matérias-primas	86.3	281.7	607.6	1,775.1
Quantidade de Bioetanol por consumo de petróleo (%)	5	13	25	57

A longo prazo, estima-se que o potencial de produção do bioetanol de cana-de-açúcar em 2050 possa chegar aos 633 Gt por ano (cerca de 20% da procura de gasolina mundial estimada) [39]. Esse cenário considera um máximo de 10% de área cultivada a ser usada para a cana-de-açúcar, exceto no Brasil (que corresponde a quase metade da produção de bioetanol total estimada).

Estima-se que a produção total de bioetanol varie de 5% em 2010 para 54% em 2050. No longo prazo, é provável que uma combinação global de combustíveis surja no mercado de transportes, sendo o bioetanol uma das alternativas disponíveis [37].

Este cenário exige a construção de 3460 centrais em todo o mundo até 2050 (1720 delas no Brasil). Um aumento significativo da procura terá de ser assegurado pelo aumento da produtividade para evitar sérios problemas de abastecimento, uma vez que existem poucos países no mundo capazes de se tornarem grandes exportadores e, também, devido à crescente procura doméstica. O Brasil tem, portanto, o maior potencial do mundo para a expansão da produção de bioetanol da cana-de-açúcar.

Muitos estudos indicam que até 2020, o biocombustível líquido mais rentável será provavelmente o bioetanol de cana-de-açúcar. A partir de 2020, a produção de bioetanol poderá ser consideravelmente aumentada com o desenvolvimento das tecnologias de produção de bioetanol a partir de material linhocelulósico. Isto irá aumentar ainda mais a capacidade de produção mundial, tornando o bioetanol um produto global [37].

Nos EUA há um grande potencial para a produção de bioetanol, mas dado o alto custo da produção e da procura interna, o país não deverá ser um grande exportador. O mercado dos

EUA de bioetanol, atualmente o maior do mundo, depende fortemente das estratégias dos fabricantes de veículos para reduzir emissões e cumprir metas impostas pelo governo federal. Por exemplo, as empresas que investiram fortemente em carros híbridos têm pouco interesse no bioetanol. Num longo prazo, quando o bioetanol a partir de materiais à base de celulose poder ser produzido economicamente, isso pode mudar drasticamente [37].

2.5. Tipos de Etanol

O etanol pode ser classificado de acordo com a matéria-prima utilizada na sua produção e por uso final:

- Por tipo de matéria-prima: biológico (por exemplo, cereais, melão, frutas) ou sintético (por exemplo, derivados de petróleo, gás, carvão e biomassa). Em 2003, apenas 5% do total produzido foi a partir de matérias-primas sintéticas [37].
- Por composição: hidratado vs não-hidratado, desnaturado vs não-desnaturado.
- Por uso: industrial, combustível ou bebidas.

Quimicamente, os álcoois são idênticos, independentemente da matéria-prima utilizada na sua produção. Existem dois tipos de etanol.

- Hidratado – significa que o etanol é misturado com água (normalmente 2 a 7% de água). Este etanol é utilizado em motores a etanol puro (motores adaptados para usar 100% de etanol) [37]. Isso é possível porque, distintamente do etanol que é misturado com a gasolina, não existe separação de fases.
- Não-hidratado – significa que o etanol contém teores de água muito baixos (no Brasil o máximo é de 0,7%), e é misturado com gasolina em diferentes proporções [37].

O etanol também pode ser classificado em:

- Etanol desnaturado - é utilizado como combustível, no qual uma pequena percentagem de outros materiais tem de ser adicionada para torná-lo viável, podendo ser a gasolina ou outros produtos químicos, caros e difíceis de remover.
- Etanol não-desnaturado, ou "álcool potável" é o etanol contido em bebidas, e é também a matéria-prima utilizada na preparação de muitos produtos químicos industriais orgânicos.

Por fim, o etanol pode também ser classificado de acordo com seu uso final:

- Bebidas - é a forma mais antiga do uso do etanol.

- Solvente - é o mais importante mercado para o etanol em aplicações industriais. A produção e o consumo concentram-se nos países industrializados e este é o único mercado onde os produtores de etanol sintético têm uma participação significativa.
- Combustível - pode ser utilizado em misturas ou na sua forma pura. O Brasil atualmente é o único país que utiliza o etanol puro como um substituto da gasolina, além de o misturar também com a gasolina. Em todos os outros países o etanol é misturado na gasolina em diferentes proporções.

2.6. Principais Matérias-Primas para a Produção de Bioetanol

O bioetanol pode ser obtido a partir de qualquer matéria-prima que contenha açúcar. Estas podem ser classificadas em três grupos principais: (1) materiais sacarinos (isto é, cana de açúcar, melado, frutas, etc.), que podem ser convertidos em bioetanol diretamente através da fermentação, (2) materiais à base de amido (ou seja, cereais como o milho, ou culturas como a mandioca), que primeiro devem ser hidrolisados em açúcares fermentáveis, e (3), materiais celulósicos (ou seja, materiais lenhosos, resíduos agrícolas, licor negro a partir de celulose e papel), que também devem ser convertidos em açúcares pela ação de ácidos minerais (por exemplo, pela hidrólise enzimática).

Atualmente o bioetanol é produzido a partir de uma grande variedade de matérias-primas. No entanto, do ponto de vista económico poucas matérias-primas podem ser seriamente consideradas, tais como a cana-de-açúcar, beterraba, mandioca, sorgo sacarino e alguns cereais, como o trigo e milho. De todas as matérias-primas, a cana-de-açúcar e o milho são as mais utilizadas atualmente [37].

Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, atualmente, é a matéria-prima mais importante na produção de bioetanol pelas seguintes razões:

- É produzido em mais de 100 países;
- É uma cultura muito eficiente, ou seja, tem uma produtividade muito alta ou uma grande potencialidade de aumentá-la;
- É a cultura mais eficiente até o momento na produção de bioetanol, ou seja, uma central de bioetanol da cana-de-açúcar pode ser energeticamente autossuficiente, exporta os excedentes de eletricidade para a rede e gera muitos outros subprodutos comerciais.

Milho

O milho é uma cultura de importância mundial, particularmente nos EUA, onde é a principal fonte do bioetanol, adoçantes e uma infinidade de outros produtos. Em outros países, por exemplo, a China, o milho poderia desempenhar um importante papel como matéria-prima para o bioetanol, mas é improvável que seja usado em grande escala devido aos altos custos, baixa produtividade e alta procura por outros produtos como os adoçantes [40]. Subprodutos desempenham um papel fundamental na economia do bioetanol do milho.

Trigo

Em termos de fornecimento de matéria-prima na UE, o trigo é uma das culturas mais relevantes para a produção de bioetanol. Em 2004, os Estados Membros da UE produziram 138 milhões de toneladas de trigo [37]. No mesmo ano, a produção comunitária de bioetanol usou cerca de 1,2 milhões de toneladas de trigo. Isso indica que 0,4% do total do trigo produzido foi utilizado na produção de bioetanol [37]. Como apenas uma pequena percentagem de trigo é utilizada na produção de bioetanol, existe espaço para a expansão do trigo nos processos de produção de bioetanol.

Sorgo Sacarino

O sorgo sacarino oferece boas possibilidades, principalmente numa cultura intercolheita como a cana-de-açúcar, especialmente na China e na África do Sul. As suas principais vantagens são o seu curto ciclo de crescimento (4 meses), a sua resistência à seca e menor necessidade de água e o seu alto potencial de produtividade (por exemplo, 7.000 a 8.000 litros de bioetanol por hectare foram relatados). No entanto existem alguns problemas, incluindo: (1) dificuldades com os transportes (muito pesado), (2) problemas de fermentação, por exemplo, a deterioração rápida; (3) agricultura em pequena escala - 90% da área encontra-se nos países em desenvolvimento, onde a produção é realizada por pequenos agricultores, principalmente para os alimentos, (4) falta de experiência com grandes aplicações industriais [37].

Celulose

O potencial de produção de bioetanol a partir de celulose é de facto muito grande, pois é o recurso de biomassa mais abundante. Na verdade, qualquer material que contenha celulose pode ser usado para produzir bioetanol. O principal obstáculo é o custo. Uma das matérias-primas mais promissoras é a poda das árvores e gramíneas por causa da sua alta produtividade, baixos custos, adequação a terras de baixa qualidade, aptidão para ser colhido anualmente (e na maioria dos casos com as mesmas máquinas das culturas alimentares e, potencialmente com um baixo impacto ambiental). Muitos países estão a investir fortemente na produção de bioetanol competitivo a partir de materiais celulósicos, especialmente nos EUA e na UE. No entanto, os resultados até agora têm sido

decepcionantes, pois os custos mantêm-se elevados e provavelmente continuarão assim por muitos anos [37].

Num cenário a longo prazo (2020-2050), a produção de bioetanol a partir de material celulósico é considerada a alternativa mais promissora por muitos autores. No entanto, a sua viabilidade a longo prazo dependerá fortemente da evolução tecnológica em diversas áreas (por exemplo, pré-tratamento, utilização de micro-organismos para melhores conversões e integração de processos), redução dos custos de capital, investimento e baixo custo de matéria-prima [37].

A necessidade de reduzir os custos de investigação centrou-se em novos conceitos, por exemplo, em biorrefinarias capazes de produzir uma variedade de produtos, como eletricidade, produtos químicos, plásticos, alimentos, fibras além de biocombustíveis. Na verdade o material celulósico pode fornecer muitos dos combustíveis e produtos químicos dos quais a sociedade depende atualmente. A integração das culturas de agroenergia com tecnologias de produção de bioenergia oferece o potencial para o desenvolvimento sustentável da bioenergia e biomateriais, que conduzirão a um novo paradigma da produção. A produção de eletricidade é uma questão fundamental, especialmente tendo em conta o potencial de redução de emissões de CO₂, as quais podem ser reduzidas, se a eletricidade cogerada deslocar a eletricidade obtida a partir de combustíveis fósseis [37].

Uma vantagem considerável e atrativa para a produção de bioetanol em larga escala a partir da celulose é que esta é muito abundante e está espalhada por muitos países do mundo. Para países de clima temperado, onde a produtividade agrícola é muito inferior, a celulose é particularmente atraente para a produção de bioetanol em larga escala [37].

O bagaço da cana-de-açúcar é outro forte candidato para a produção de bioetanol através da hidrólise, mas também com resultados decepcionantes até ao momento. No entanto, esta situação está a mudar por duas razões principais: (1) o custo do bagaço (por exemplo, no Brasil é inferior a 1 euro por GJ), e (2) o facto de infraestruturas já existentes poderem ser utilizadas, tornando esta opção muito atraente no médio e longo prazo. No entanto, se o bagaço for usado em larga escala na produção de bioetanol, outras fontes, teriam que ser encontradas para gerar calor e eletricidade. Uma alternativa a ser considerada é complementar o bagaço com o lixo da cana-de-açúcar [37].

Mandioca

A mandioca é um alimento básico muito importante em muitos países em desenvolvimento. É uma cultura de tubérculos capazes de resistir à seca e distúrbios civis, e muitas vezes é a única fonte de alimento para os pobres. Tal como acontece com o sorgo, numerosos estudos têm sido realizados para testar a sua viabilidade como matéria-prima do bioetanol. Por exemplo, no Brasil, no início da década dos anos 70 houve um grande programa de bioetanol de mandioca com base em cerca de 500000 litros por ano. No

entanto, a aposta na mandioca não resultou por uma combinação de razões: (1) custos elevados (porque as raízes da mandioca devem ser primeiro hidrolisadas em açúcares fermentáveis), (2) falta de experiência com plantações comerciais, e (3) a concorrência com a cana-de-açúcar. Mais recentemente, países como China, Tailândia e Filipinas demonstraram interesse na obtenção de bioetanol a partir da mandioca [41]. A Tailândia, em particular planeou a produção primária de bioetanol a partir de mandioca e melão de cana-de-açúcar, porque o país produz grandes excedentes de mandioca [42], para o qual é cada vez mais difícil encontrar novos mercados, assim como para o melão [43].

2.7. Processos de Produção de Bioetanol

A tecnologia predominantemente usada na conversão das matérias-primas em bioetanol é a fermentação seguida de uma destilação. A fermentação é um processo de conversão bioquímica no qual as matérias-primas são decompostas através de microrganismos (bactérias e enzimas). Esta tecnologia pode ser usada para vários tipos de fontes de bioetanol. Praticamente toda a fermentação do bioetanol é ainda baseada no “fermento de padeiro” (“*Saccharomyces cerevisiae*”), que exige simples açúcares (monómeros) como matéria-prima. A fermentação de leveduras convencionais produz 0,51 kg de bioetanol a partir de 1 kg de glicose, manose e sacarose de qualquer açúcar C6. No entanto, nem todas as matérias-primas contêm açúcares simples. Amido e linhocelulose são polímeros, nos quais é necessária uma hidrólise para romper as ligações entre monómeros de forma a produzir açúcares simples C6 para a fermentação [15].

O primeiro passo neste processo de conversão inclui uma moagem ou trituração (seca ou húmida) do grão de modo a libertar o amido. Em seguida, esse material é diluído em água para ajustar a quantidade de açúcar no mosto. Isso é necessário para manter o fermento e tornar a mistura mais fácil de mexer e manipular. Em seguida, a mistura é cozida para dissolver os amidos solúveis em água. O amido é convertido em açúcares simultaneamente. Isso pode ser feito por enzimas ou por hidrólise ácida. No caso da hidrólise ácida, ácido mineral diluído é adicionado à suspensão de grãos antes de estes serem cozidos. Os carboidratos resultantes das etapas de processamento podem ser fermentados por microrganismos. Para a cultura de leveduras necessárias para o processo de fermentação, a solução deve ser levemente ácida, ou seja, possuem um pH entre 3,5 e 5,0. Durante a fermentação, é produzido bioetanol, o qual é diluído em água. Esse processo também resulta na formação de CO₂. Através de uma série de etapas de destilação e desidratação, a concentração de bioetanol pode ser aumentada [15].

Biomassa Linhocelulósica

O processo de conversão de biomassa linhocelulósica em bioetanol apenas é diferente do processo descrito acima relativamente à divisão, ou hidrólise, da matéria-prima em

açúcares fermentáveis. Este processo de hidrólise é mais difícil de conseguir do que a hidrólise do amido. A biomassa linhocelulósica contém polímeros de carboidratos chamados de celulose (40-60% do peso seco) e hemicelulose (20-40% do peso seco) que podem ser convertidos em açúcares. A celulose é composta por moléculas de glicose ligadas em longas cadeias que formam uma estrutura cristalina. A hemicelulose é constituída por uma mistura de polímeros feitos a partir de xilose, manose, galactose ou arabinose. É muito menos estável do que a celulose. Nenhum dos materiais é solúvel em água. A fração restante, um polímero aromático complexo chamado lignina (10-25% do peso seco), não pode ser fermentado, pois é resistente à degradação biológica. Este material pode ser utilizado para a produção de eletricidade e / ou calor [15].

Na figura seguinte pode observar-se um esquema da hidrólise do amido e celulose, e da fermentação da glicose em bioetanol.

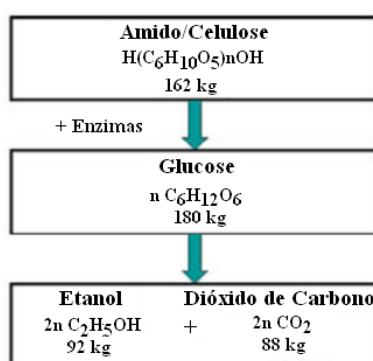


Figura 8 - Hidrólise do amido e celulose, seguido da fermentação da glicose em bioetanol (adaptado de [15]).

Beterraba Sacarina

A beterraba sacarina é uma cultura de alto rendimento que produz hidratos de carbono já sob a forma de açúcar, que é facilmente esmagado e amassado durante a fermentação o que torna o processo de produção de bioetanol relativamente barato. A beterraba sacarina continua a respirar durante o armazenamento, o que provoca uma perda de energia. A fim de limitar essa perda de energia, as “campanhas” de processamento duram em média 90 dias. Após o processamento, o xarope é extraído das beterrabas, e posteriormente é pasteurizado. O xarope pasteurizado pode ser armazenado para manter as partes de fermentação e destilação durante todo o ano. Do processo de conversão resultam alguns subprodutos como a polpa de beterraba sacarina e resíduos secos. Estes subprodutos podem ser utilizados como baixas proteínas para comida animal, contudo os altos custos de secagem levam normalmente à queima dos mesmos. Para melhorar o rendimento de bioetanol, a polpa pode ser tratada por um processo do tipo SSCF (sacarificação simultânea e cofermentação) para quebrar a celulose e hemicelulose [37].

Trigo

O bioetanol pode ser produzido a partir de grãos de trigo por meio de hidrólise e de fermentação. O processo de produção de bioetanol a partir de trigo é mais complexo e, portanto, mais dispendioso do que o da beterraba sacarina. A moagem e a destilação são as partes do processo de produção energeticamente mais dispendiosas. Estes processos requerem energia, mas sobretudo calor para um nível de temperaturas baixo. Na maior parte das instalações de processamento de bioetanol de trigo, o calor é fornecido por uma caldeira convencional de gás natural e a eletricidade é adquirida. Esta é a solução mais utilizada e também a mais barata. Todos os esquemas de cogeração produzem um excedente de eletricidade que se assume ser vendida para a rede e que portanto, gera um crédito (energia e GEE). Quanto maior for a geração de energia elétrica em comparação com a produção de bioetanol, melhor é o balanço de energia fóssil do bioetanol de trigo. A produção de bioetanol produz um subproduto conhecido como DDGS (“*Distiller's Dried Grain with Solubles*”), que é um resíduo sólido formado após a digestão dos hidratos de carbono. Os DDGS são materiais ricos em proteínas, e são utilizados como componentes de comida para animais. Os DDGS podem também ser usados como combustível, por exemplo, em centrais que precisam cumprir as suas obrigações de energias renováveis. O conteúdo de energia calorífica dos DDGS é consideravelmente maior do que a energia necessária para produzir a ração animal equivalente, contudo os DDGS dão um crédito de energia maior [37].

Cana-de-açúcar

Existem dois tipos principais de destilarias utilizados na produção de bioetanol à base de cana-de-açúcar: anexas e autónomas. O tipo e o tamanho da destilaria são determinados pelas necessidades específicas do bioetanol (e açúcar) no mercado [33].

As destilarias anexas são construídas ao lado dos campos de cana-de-açúcar. Neste caso, o principal objetivo é produzir açúcar ao invés de bioetanol, compartilhando diversos sistemas comuns (por exemplo, caldeiras e tratamento de afluentes). Uma destilaria anexa pode fornecer considerável flexibilidade contra flutuações de preços e é atualmente a melhor opção [44]. A matéria-prima é geralmente uma mistura de caldo de cana-de-açúcar e melão. Uma desvantagem reside no alto custo de capital necessário para uma central de cana-de-açúcar.

Numa destilaria autónoma o principal objetivo é a produção de bioetanol. Estas destilarias só se justificam quando existe um grande e seguro mercado para o bioetanol, como no caso do Brasil (e mesmo neste país muitas destilarias foram convertidas de volta para o tipo destilarias anexas) [37]. O custo de capital de uma destilaria autónoma é menor do que o de uma anexa, mas a indústria tem pouca flexibilidade no caso de flutuações de preços, tanto para o açúcar como para o bioetanol.

Um dos grandes benefícios do processo de produção de bioetanol da cana-de-açúcar é que o calor de processo é totalmente fornecido pelo bagaço da cana-de-açúcar. As centrais de processamento são também autossuficientes para eletricidade. A vinhaça resultante da fermentação é depois reciclada para os campos [37].

Milho

Nos EUA, predominam as destilarias de milho, e dois processos diferentes são usadas para produzir bioetanol ou outros produtos amiláceos base: (1) moagem seca (DM), e (2) moagem húmida (WM). A principal diferença entre os dois processos ocorre durante a fermentação. No processo de DM o grão é limpo para reduzir o tamanho das partículas que depois são fermentadas. Os principais subprodutos são os DDGS. O processo de WM extrai o máximo de amido a partir do grão por adição de água o que facilita a remoção do amido. O amido é convertido em glicose para refinação e posteriormente é usado para converter enzimas para produzir aminoácidos, ácidos orgânicos, etc. As centrais de WM produzem alimentos de glúten de milho (CGF) e farelo de glúten de milho (CGM), que são ricos em proteínas e óleo de milho. CGF e CGM são as fontes de produção de bioetanol, juntamente com HFCS (xarope de milho rico em frutose) [37].

3. Revisão Bibliográfica

Estimativas indicam que a produção de bioetanol tem potencial para substituir até cerca de 32% do consumo total de gasolina em todo o mundo, quando utilizado como E85 em veículos de passageiros de médio porte [45]. Esta substituição pode contribuir para a redução do uso de recursos não renováveis (combustíveis fósseis) e para a redução dos impactos sobre alterações climáticas (especialmente ao nível de emissões de CO₂ e de GEE), mas nem sempre é vista como uma forma de melhoria global. Por exemplo, a conversão de biomassa em bioenergia requer um consumo adicional de energia, a maior parte das vezes na forma de combustíveis fósseis. O balanço energético do ciclo de vida de um biocombustível comparativamente com os combustíveis fósseis convencionais deve ser positivo, mas, dependendo das opções de processamento, a procura de energia fóssil acumulada pode, às vezes, ser apenas ligeiramente inferior ou mesmo superior à de combustíveis fósseis [46]. Além disso, o bioetanol na gasolina pode resultar numa diminuição da qualidade do ar urbano, e estar associado a riscos ao nível de recursos hídricos e da biodiversidade [47].

Os sistemas bioenergéticos têm outros possíveis inconvenientes ecológicos. A produção agrícola de biomassa tem um contributo intensivo no uso da terra, havendo o risco dos poluentes contaminarem fontes de água (provenientes de fertilizantes e pesticidas que são aplicados no solo para favorecer o crescimento das plantas). Um grande número de pesquisas têm sido realizadas de forma a analisar os sistemas de bioetanol, num esforço para descrever a sua sustentabilidade ambiental e determinar se os combustíveis de base biológica - os biocombustíveis – contribuem de forma positiva para um ambiente sustentável quando utilizados nos transportes [48].

3.1. Análise do Equilíbrio Energético

Em geral, quase todos os estudos sobre biocombustíveis abordam a capacidade de redução da quantidade de combustível fóssil necessária à propulsão dos veículos num futuro próximo. Embora este tipo de análise seja muitas vezes inspirada pelos resultados controversos de Pimentel [49] sobre o bioetanol de milho nos Estados Unidos (estudos muito críticos quanto à sua sustentabilidade ambiental), a maior parte dos estudos refere algum potencial de substituição de combustíveis fósseis para os sistemas de bioetanol [50, 51, 52].

Balço da Energia Fóssil

A substituição de energia fóssil pode ser abordada relativamente ao número de quilómetros percorridos (por exemplo, por cem quilómetros percorridos), ou relativamente à área de terreno utilizado. Na Figura 9, o balanço de energia fóssil é apresentada relativamente ao transporte realizado, sendo apresentados resultados de um estudo de *Joint Research Centre* [50]. Os resultados são apresentados numa análise de fonte-à-roda (WTW) que engloba a análise de fonte-ao-depósito (WTP) e análise do depósito-à-roda (PTW). A análise WTP engloba as fases de extração de petróleo / cultivo de matérias-primas, transporte de matérias-primas, produção de combustível e distribuição até ao posto de reabastecimento; a análise PTW engloba a fase de utilização do combustível nos veículos.

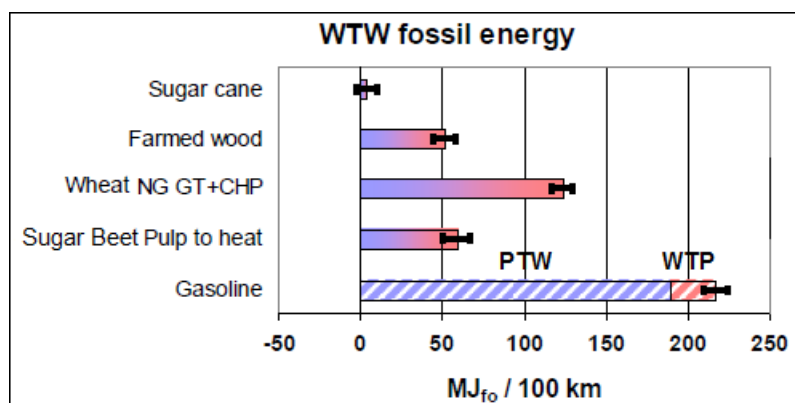


Figura 9 - Energia fóssil para diferentes sistemas de bioetanol [50].

Das possíveis fontes de bioetanol, as culturas à base de cana-de-açúcar (cultivadas em países tropicais) são as mais eficientes na substituição da energia fóssil. De facto a cana-de-açúcar supera significativamente as restantes culturas de bioetanol, o que pode ser explicado pelo elevado rendimento destas culturas e pela possibilidade de se usar os seus resíduos (bagaço da cana-de-açúcar) na produção de calor no processo de produção de bioetanol. As centrais de processamento são também autossuficientes para eletricidade [51].

Para as culturas à base de trigo, a substituição de energia fóssil é significativamente menor, o que pode ser explicado pelo fato de o processo de produção de bioetanol a partir de trigo ser mais complexo e, portanto, mais dispendioso do que o de cana-de-açúcar. A moagem e a destilação são as partes do processo de produção energeticamente mais dispendiosas. Estes processos requerem energia, mas sobretudo calor para um nível de temperaturas baixo [51]. A Figura 9 não inclui os resultados relativamente às culturas de milho, mas um estudo do USDA [52] indica uma substituição de energias fósseis idênticas às das culturas de trigo.

Para o bioetanol produzido a partir de biomassa, a contribuição para a substituição de energia fóssil é superior às culturas de trigo e beterraba sacarina. Estes resultados podem

ser explicados pelo facto de nos processos de produção deste tipo de bioetanol se usar parte da biomassa como combustível, envolvendo assim menor energia fóssil [51].

3.2. Análise dos GEE

Com as evidências científicas cada vez mais crescentes de que o clima está a mudar, e que isso pode ser atribuído ao uso em larga escala de combustíveis fósseis, o potencial dos biocombustíveis para fornecer energia nos transportes de uma forma neutra em carbono está a receber uma atenção crescente. Há evidências científicas claras de que as emissões de GEE como o CO₂, o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), decorrentes da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra como resultado de atividades humanas, têm levado a perturbações no clima da Terra [51]. A mitigação na mudança do clima é, portanto, uma das principais forças motrizes para o desenvolvimento e implantação de sistemas de biocombustíveis.

Mitigação de emissões de CO₂ equivalente

Intimamente relacionado com o indicador de substituição de energia fóssil encontra-se a mitigação de emissões de GEE. As emissões são denominadas por CO₂ equivalente, mas a natureza dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) introduz um certo grau de divergência entre o indicador de energia, como as diferentes intensidades carbónicas desses combustíveis. Os dois GEE considerados mais prejudiciais são o CH₄ e o N₂O, com um potencial de aquecimento global de 25 e 298 vezes superiores às de CO₂, respetivamente [48].

O indicador de emissões de CO₂ equivalente evitadas pode ser abordado relativamente ao número de quilómetros percorridos ou relativamente à área de terras utilizadas. Na Figura 10 são apresentados os resultados da avaliação das emissões de CO₂ equivalente evitadas por quilómetro percorrido, para o estudo de *Joint Research Centre* [50] numa análise WTW.

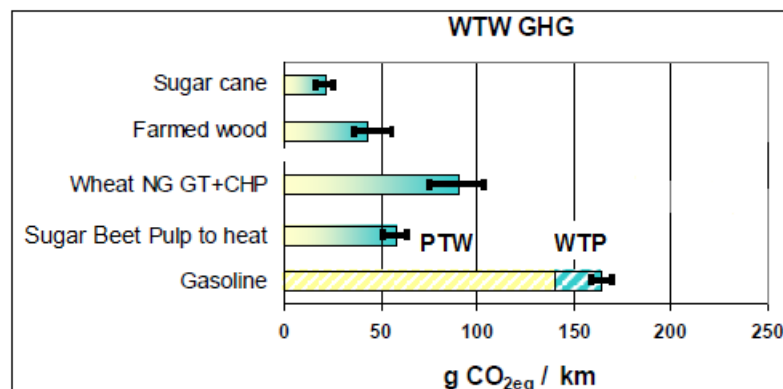


Figura 10 – Emissões de CO₂ equivalente para diferentes sistemas de bioetanol [50].

Como se pode observar pela análise da Figura 10, a cana-de-açúcar apresenta-se como a cultura mais eficiente, também ao nível de emissões de CO₂ equivalente evitadas. Isto deve-se

à inclusão de créditos de energia elétrica dos coprodutos por parte do estudo de *Joint Research Centre* [50].

As culturas de biomassa apresentam-se como a segunda opção mais eficiente no que respeita à emissão de GEE, pois usam parte da biomassa como combustível nos processos de produção de bioetanol, o que leva a menores consumos de energia fóssil e consequentemente a menores emissões de GEE [51].

As culturas de beterraba sacarina apresentam emissões de GEE um pouco superiores às registadas para os recursos de biomassa.

As culturas de trigo apresentam-se neste estudo, como a opção menos eficiente no que respeita à emissão de GEE, ainda assim com valores abaixo dos registados para a gasolina. Os piores resultados das culturas de trigo estão associados à maior quantidade de azoto envolvida na sua produção relativamente às restantes matérias-primas, o que leva a maiores emissões de campo de N₂O. Devido ao elevado potencial de aquecimento deste gás (298 vezes o do CO₂), as emissões, ainda que relativamente pequenas, podem ter um impacto significativo no equilíbrio global de GEE [51].

3.3. Análise dos Impactes Ambientais

Os Quadros 4 e 5 apresentam um resumo de um estudo realizado por *Harro von Blottnitz* e *Mary Ann Curran* [48], indicando treze categorias de impacte e seis categorias relacionadas com inventário. O estudo indica se os impactos aumentaram ou diminuíram nos processos de produção de bioetanol comparativamente com o combustível convencional. Um traço indica que nenhuma mudança foi registada e NA que o parâmetro em questão não foi avaliado.

Quadro 4 - Resumo dos impactes dos processos de produção de bioetanol comparativamente com o combustível convencional (1/2) [48].

	Beterraba Trigo Batata	Mandioca	Resíduos do Bagaço	Palha de Milho	Resíduos Celulósicos
	Europa	China	Índia	EUA	Filipinas
Esgotamento de recursos	↓	↓	↓	↓	↓
Aquecimento Global	↓	NA	↓	↓	↓
CO ₂	↓	↓	NA	NA	NA
Acidificação	↑	NA	↓	↑	↑
SO _x	↑	NA	NA	NA	NA

Quadro 5 - Resumo dos impactos dos processos de produção de bioetanol comparativamente com o combustível convencional (2/2) [48].

	Beterraba Trigo Batata	Mandioca	Resíduos do Bagaço	Palha de Milho	Resíduos Celulósicos
	Europa	China	Índia	EUA	Filipinas
NO_x	↑	↑	NA	NA	NA
Eutrofização	↑	NA	↓	NA	↑
Toxicidade	NA	NA	↓	NA	↑
CO	↑	↓	NA	NA	NA
PM	↑	↓	NA	NA	NA
"Smog"	↓	NA	NA	↑	↓
HC	↓	↓	NA	NA	NA
Resíduos sólidos	NA	NA	↓	NA	NA
Utilização da terra	NA	NA	NA	↔	NA
Utilização da água	NA	NA	↔	NA	NA
Destruição da Camada do Ozono	NA	NA	NA	↓	NA
Odor	NA	NA	↓	NA	NA

Como se pode verificar através dos Quadros 4 e 5, torna-se evidente que não há muito consenso sobre os benefícios ambientais do bioetanol. Contudo, existe um amplo consenso de que o bioetanol, quando comparado com os combustíveis convencionais, leva a um aumento dos impactos da toxicidade humana e do ecossistema, bem como de outras categorias de impacto. Isto aplica-se particularmente para as culturas que usam práticas agrícolas intensivas juntamente com o uso de fertilizantes (especialmente à base de azoto) que podem causar preocupações ambientais ao nível do solo, água e atmosfera. Normalmente, o aumento das emissões ocorrem em categorias de impacto diretamente afetadas pelas emissões à base de azoto, como acidificação, eutrofização e formação de *smog* [51].

4. Avaliação de Ciclo de Vida

4.1. Descrição da Avaliação de Ciclo de Vida

A ACV é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produtos ao longo do seu ciclo de vida.

O termo “ciclo de vida” refere-se à maioria das atividades no decurso da vida do produto desde a sua fabricação, utilização, manutenção, e deposição final; incluindo aquisição de matéria-prima necessária para a fabricação do produto. A figura seguinte ilustra os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados numa ACV e as típicas entradas / saídas medidas [53].

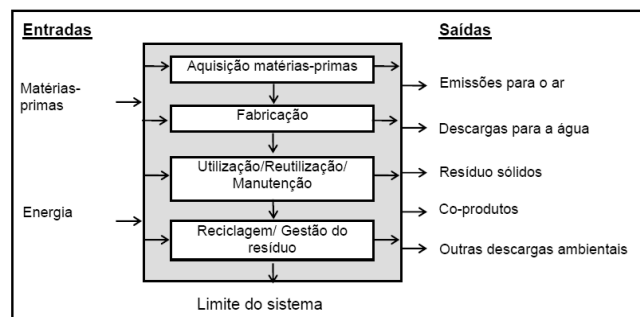


Figura 11 - Estágios do ciclo de vida do produto [53].

No estudo de ACV de um produto ou serviço, todas as extrações para o ambiente são determinadas, quando possível, numa forma quantitativa ao longo de todo o ciclo de vida, desde a produção até à decomposição, sendo com base nestes dados que são avaliados os potenciais impactos nos recursos naturais, no ambiente e na saúde humana.

O processo ACV é uma sistemática abordagem faseada composta por quatro componentes: definição de objetivos e âmbito; análise de inventário; análise do impacto; e interpretação dos resultados, como se pode observar na Figura 12 (ISO 14040: 2006).

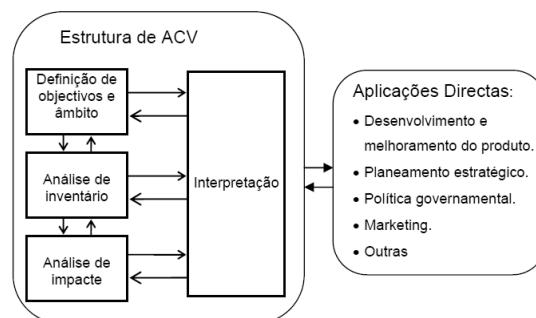


Figura 12 - Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida [54].

Seguidamente procede-se à descrição das fases da ACV [54]:

- *Definição de Objetivos e Âmbito* – Define e descreve o produto, processo ou atividade. Estabelece o contexto no qual a avaliação vai ser realizada e identifica os limites e efeitos ambientais a serem revistos para a avaliação.
- *Análise de Inventário* – Identifica e quantifica a energia, água e materiais utilizados e descargas ambientais (por exemplo: emissões para o ar, deposição de resíduos sólidos, descargas de efluentes líquidos).
- *Análise de Impacte* – Analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água, e materiais e das descargas ambientais identificadas na análise do inventário.
- *Interpretação* – Avalia os resultados da análise do inventário e do impacte de forma a seleccionar o produto preferido, processo ou serviço com uma compreensão clara das incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados.

A metodologia ACV tem numerosas aplicações, desde o desenvolvimento de produtos, rotulagem ecológica e regulação, até à definição de cenários de prioridade e de política ambiental [54].

4.2. Benefícios de um Estudo ACV

Os dados de um estudo ACV em conjunto com outras informações, por exemplo, dados de custos e performance, podem ajudar os responsáveis pela tomada de decisão na seleção de produtos ou processos que resultem num menor impacte para o ambiente [54].

A metodologia ACV é a única que permite identificar a transferência de impactes ambientais de um meio para outro (por exemplo: a eliminação de emissões atmosféricas pode ser feita à custa do aumento das emissões de efluentes líquidos) e/ou de um estágio de ciclo de vida para outro (por exemplo: da fase de aquisição de matérias-primas para a fase de utilização) [54].

Por exemplo, quando se selecciona entre dois produtos concorrentes pode parecer que a “opção 1” é melhor para o ambiente porque necessita de menos matérias-primas, na fase de produção, que a “opção 2”. Porém, como na elaboração de um estudo ACV são considerados todos os estágios do ciclo de vida, os resultados finais podem mostrar que é a “opção 1” que mais impacte causa no ambiente, dada a necessidade que tem de um maior consumo de electricidade, na fase de utilização, que a “opção 2”. Sem a elaboração de um estudo ACV estes factos não serão detetados [54].

Na elaboração de um estudo ACV, pode-se [53]:

- Desenvolver uma sistemática avaliação das consequências ambientais associadas com um dado produto.
- Analisar os balanços (ganhos/perdas) ambientais associados com um ou mais produtos/processos específicos de modo a que os visados (estado, comunidade, etc.) aceitem uma ação planeada.
- Quantificar as descargas ambientais para o ar, água, e solo relativamente a cada estágio do ciclo de vida e/ou processos que mais contribuem.
- Identificar as mais significativas trocas de impactes ambientais entre estágios de ciclo de vida e o meio ambiental.
- Avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e descargas ambientais para a comunidade local, região e/ou mundo.
- Comparar os impactes ecológicos na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos rivais ou identificar os impactes de um produto ou processo específico.
- Identificar impactes em uma ou mais áreas ambientais específicas de interesse.

4.3. Limitações de um Estudo ACV

A elaboração de um estudo ACV necessita normalmente de muitos recursos e arrasta-se por muito tempo. Deste modo, os recursos financeiros deverão ser balanceados com os benefícios previsíveis do estudo [54].

O estudo ACV não determina o qual produto ou processo é mais caro ou funciona melhor. Por isso, a informação desenvolvida num estudo ACV deve ser utilizada como uma componente de um processo de decisão que conta com outras componentes, como sejam, o custo e a performance [54].

5. Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia de base e o plano de trabalho para a execução da presente dissertação. Neste capítulo é ainda apresentado e descrito o funcionamento do modelo numérico de avaliação de ciclo de vida GREET.

5.1. Plano de Trabalho

A primeira fase da realização da presente Dissertação centrou-se na revisão bibliográfica dos conceitos teóricos subjacentes à realização do trabalho proposto. Nesta fase foram pesquisados vários documentos técnico-científicos relativos a biocombustíveis (mais especificamente bioetanol), técnicas de avaliação de ciclo de vida de produtos e modelos numéricos de avaliação de ciclo de vida de combustíveis. Relativamente ao bioetanol, a pesquisa centrou-se em primeiro lugar na sua implementação a nível mundial e na sua aplicação no setor dos transportes. Seguidamente pesquisaram-se as suas propriedades físico-químicas, sua composição, constituintes básicos, reações e processos associados à sua produção.

Numa segunda fase foi feito o levantamento de informação relativa ao ciclo de vida do bioetanol na Europa. Neste caso efetuou-se um levantamento de informação relativa à produção, ao transporte, ao armazenamento e à utilização do bioetanol como combustível. Para além da produção direta do bioetanol foram abrangidos os processos de produção dos combustíveis fósseis, energia elétrica e químicos agrícolas que são direta ou indiretamente associados à produção de bioetanol. Nesta fase a pesquisa incidiu nas características dos combustíveis, tais como a massa volúmica, o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS), as frações de carbono e enxofre dos combustíveis, bem como as eficiências de extração, produção e refinação dos combustíveis. Relativamente aos veículos na fase de utilização, apenas se considerou os meios terrestres, efetuando-se desta forma pesquisa sobre os fatores de consumo e de emissões dos veículos selecionados. Contudo relativamente ao transporte de matérias-primas e de combustíveis foi considerado o transporte via marítima e via terrestre recolhendo-se os fatores de emissão e de consumo relativos não só ao transporte como ao consumo dos próprios meios de transporte.

Depois de recolhida a informação necessária procedeu-se à atualização / alteração da base de dados do modelo GREET relacionada com o bioetanol. A atualização do GREET levou à criação de um novo modelo designado de MACV_{EtOH} – Modelo de Avaliação do Ciclo de Vida do Bioetanol. Este modelo é centrado na avaliação do ciclo de vida do bioetanol aplicado à realidade Portuguesa / Europeia. Através deste modelo é possível efetuar de forma simples e rápida uma avaliação de ciclo de vida dos principais combustíveis utilizados em Portugal / Europa, com principal enfoque no bioetanol, que é o tema da presente Dissertação.

Por último procedeu-se à realização de um caso prático de aplicação do modelo desenvolvido de forma a testar os resultados obtidos e serem retiradas as devidas conclusões acerca do modelo e do ciclo de vida do bioetanol.

Na Figura 13 encontra-se o fluxograma do plano de trabalho da Dissertação e no Quadro 6 a calendarização do referido plano de trabalho.

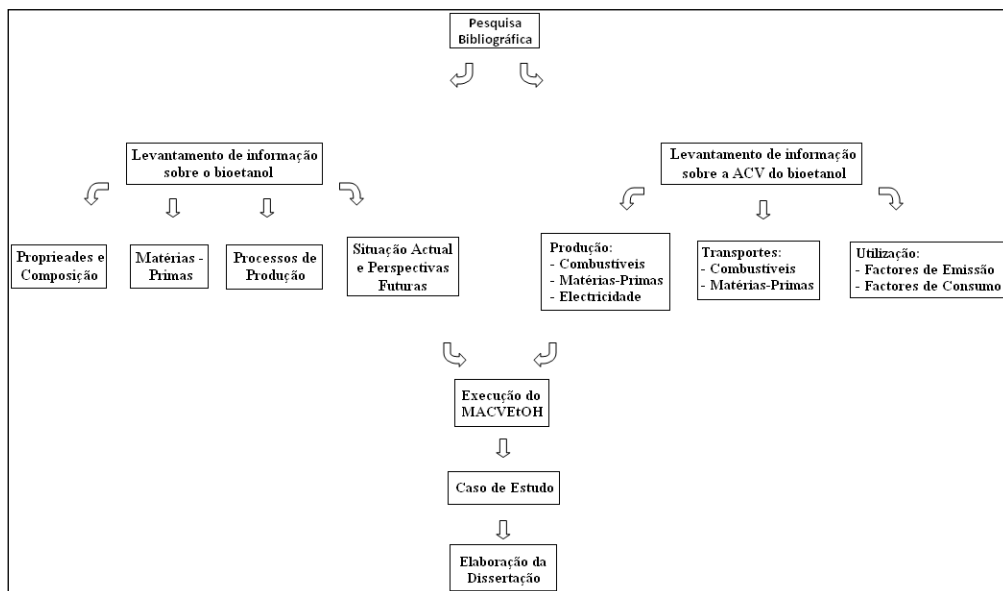


Figura 13 - Fluxograma do plano de trabalho da Dissertação.

Quadro 6 - Calendarização do plano de trabalho da Dissertação.

		Revisão bibliográfica	Pesquisa de informação sobre o ciclo de vida do bioetanol	Calibração do ciclo de vida do bioetanol no modelo GREET	Avaliação do ciclo de vida do bioetanol: Caso de Estudo	Criação de cenários alternativos	Escrita da Dissertação de Mestrado
2011	Fev						
	Mar						
	Abr						
	Mai						
	Jun						
	Jul						
	Ago						
	Set						
	Out						
	Nov						
Dez							
2012	Jan						
	Fev						
	Mar						
	Abr						
	Mai						
	Jun						
	Jul						
	Ago						
	Set						
	Out						

5.2. O Modelo GREET

O GREET é uma ferramenta numérica de ACV desenvolvida em 1995 pelo “*Argonne National Laboratory*”, mais precisamente pela divisão de investigação de transportes (“*Center for Transportation Research*”) [55].

Este modelo permite avaliar vários veículos e combinações de combustível, numa análise WTP ou numa análise WTW, como se apresenta na Figura 14. Na análise WTP, é considerada a extração, a produção e o transporte dos combustíveis até aos respetivos postos de reabastecimento. A análise WTW engloba a análise WTP e a análise PTW, ou seja, nesta análise além de se considerar todos os processos relacionados com o combustível até este chegar ao posto de reabastecimento também se considera a utilização do combustível em veículos. A análise WTW engloba todo o ciclo de vida do combustível [55].

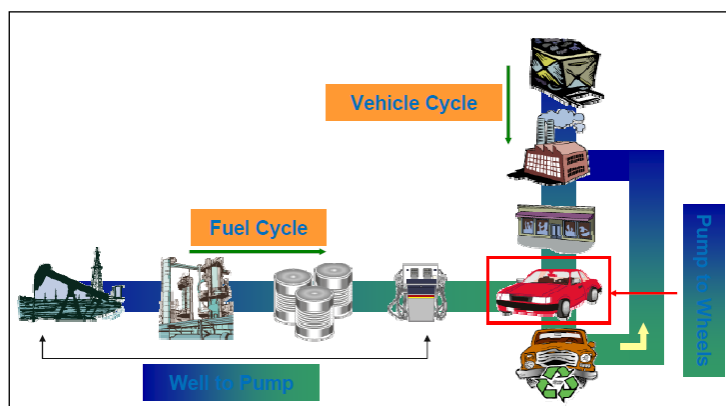


Figura 14 - Representação da Avaliação de Ciclo de Vida efetuada pelo GREET [56].

O funcionamento do *software* GREET [4] encontra-se explicado pormenorizadamente no Anexo 1.

6. O Modelo MACVEtOH

No presente capítulo é apresentado o modelo desenvolvido ao longo da dissertação. Nesta fase é descrito todo o modelo bem como os pressupostos tidos em consideração.

Como referenciado anteriormente, o principal objetivo da presente dissertação de mestrado consistiu na atualização da ferramenta numérica de avaliação do ciclo de vida GREET, para o caso específico do bioetanol. Esta atualização consistiu em adaptar a base de dados para uma realidade Portuguesa / Europeia. A atualização do modelo deu origem a uma nova ferramenta, denominada MACVEtOH. O MACVEtOH foi elaborado de maneira a que o utilizador consiga de forma simples e intuitiva realizar uma ACV.

Na elaboração do MACVEtOH procurou-se limitar a quantidade de informação requerida ao utilizador, de forma a aumentar a facilidade e rapidez de obtenção de resultados. Este modelo foi concebido para a realização de uma pré-avaliação de ciclo de vida do bioetanol. Contudo, um estudo mais preciso e aprofundado também é possível, pois é permitido o manuseamento da base de dados de forma a adaptá-la a casos específicos ou cenários

A base de dados do modelo MACVEtOH foi elaborada de forma a manter as mesmas características da base existente no GREET [4], mas adaptada aos processos, equipamentos e veículos existentes em Portugal / Europa. A elaboração da base de dados centrou-se no levantamento de informação relativa a todas as etapas do ciclo de vida do bioetanol (produção de matérias-primas, produção de combustíveis, utilização nos veículos).

Ao longo deste capítulo será descrito o princípio de funcionamento do modelo MACVEtOH, assim como os pressupostos e as referências utilizadas na elaboração da base de dados.

O modelo MACVEtOH mantém uma estrutura semelhante ao GREET [4], sendo desenvolvido em plataforma Excel. O modelo é composto por quinze folhas de cálculo. No decorrer das simulações o modelo efetua os cálculos para as diversas etapas do ciclo de vida dos combustíveis intervenientes e para os consumos e emissões relativos aos veículos considerados.

Nas secções seguintes serão abordadas individualmente as folhas de cálculo constituintes do modelo.

Apresentação

Na folha de cálculo “Apresentação” é exposto, em primeiro lugar, a designação do acrónimo MACVEtOH.

Seguidamente segue uma breve descrição das folhas de cálculo presentes no modelo. Desta forma o utilizador ao consultar a folha de cálculo inicial poderá entender o funcionamento básico do modelo.

Posteriormente é apresentado um esclarecimento da codificação de cores utilizadas. O modelo apresenta quatro cores:

Branças – células da base de dados definidas para cálculos e pressupostos secundários do modelo.

Amarelas – células definidas para a introdução de dados por parte do utilizador.

Laranjas – células alteradas após seleção de dados do utilizador, na folha "Dados de Entrada".

Verdes – células sem valores atribuídos (não necessitam de valor).

O modelo apresenta ainda células em que as letras aparecem a vermelho, alertando o utilizador para a ocorrência de um erro na introdução de dados.

Por fim, é apresentada a identificação do autor do modelo. Na figura seguinte pode observar-se o aspeto da folha inicial do modelo.



Universidade de Aveiro
theoria poiesis praxis

MACVetOH

Modelo de Análise de Ciclo de Vida para o Bioetanol

Breve Descrição das Folhas de Cálculo do MACVetOH

Folha de Cálculo:	Descrição:
Apresentação	Introdução ao modelo, descrição das folhas de cálculo, codificações das cores das células e dados do autor
Dados de Entrada	Introdução de dados de entrada pelo utilizador para a simulação correr
Combustíveis	Características dos combustíveis e potenciais de aquecimento global dos gases de efeito de estufa
FE	Fatores de emissão das tecnologias de combustão por tipo de combustível
Petróleo	Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às actividades de extração e refinamento de petróleo bem como da produção dos combustíveis derivados do petróleo
Gás Natural	Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às actividades de extração de gás natural
Carvão	Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às actividades de mineração do carvão
Etnol	Cálculo do consumo de energia e emissões associadas à produção de etanol através de trigo e beterraba sacarina
Electricidade	Cálculo do consumo e emissões associadas à produção de energia eléctrica
Químicos	Cálculo do consumo de energia e emissões associadas à produção agrícola e suas matérias-primas, incluindo fertilizantes, herbicidas, insecticidas e fabricação de máquinas agrícolas
Transportes	Cálculo do consumo de energia e emissões associadas ao transporte e distribuição de matérias-primas e combustíveis
Veículos	Cálculo do consumo de combustível e das emissões de poluentes associados ao funcionamento dos veículos
Resultados	Resultados do consumo energético e emissões do poço à bomba e do poço às rodas, relativos à simulação efectuada
Gráficos	Representação gráfica dos dados obtidos na folha de cálculo "Resultados"
Base de Dados	Base de dados, com constantes essenciais ao funcionamento do modelo

Código de Cores do Modelo MACVetOH

- Células definidas para a introdução de dados pelo utilizador, essenciais para os resultados da simulação
- Células definidas para cálculos e pressupostos secundários do modelo
- Células alteradas após seleção de dados do utilizador, na folha "Dados de Entrada"
- Células sem valor atribuído e que não necessitam de dados
- Letras** Letras a vermelho, significam um erro na introdução dos dados, na folha "Dados de Entrada"

Modelo Desenvolvido por:

Henrique Henriques
Universidade de Aveiro
Departamento de Engenharia Mecânica
n.º 38382
E-mail: henrique.henriques@ua.pt

Figura 15 - Aspeto da folha de cálculo “Apresentação” do modelo MACVetOH

Dados de Entrada

A folha “Dados de Entrada” é reservada à introdução de dados por parte do utilizador de forma a dar início à simulação no modelo. Nesta folha os dados a introduzir pelo utilizador estão divididos em quatro categorias.

No primeiro ponto (Figura 16) o utilizador poderá seleccionar se pretende efetuar a simulação com os valores do PCI ou do PCS.

1. Dados de Entrada

1.1. Seleção da quantidade de energia libertada na combustão por unidade de volume ou massa

1	1 - PCI (Poder Calorífico Inferior) 2 - PCS (Poder Calorífico Superior)
---	--

Figura 16 - Seleção da quantidade de energia libertada por unidade de massa/volume.

No segundo ponto são abordados os dados relativos à produção de bioetanol (Figura 17).

2. Produção de Bioetanol

2.1. Seleção do peso relativo das matérias-primas na produção de bioetanol

	Trigo	Árvores	Gramíneas	Resíduos Florestais	Beterraba Sacarina
Peso relativo das matérias-primas	100%	0%	0%	0%	0%

2.2. Seleção do peso relativo das matérias-primas para centrais de biomassa

	Árvores	Gramíneas	Resíduos Florestais
Peso relativo das matérias-primas	0%	0%	100%

2.3. Inclusão da energia e emissões associadas à produção de equipamentos agrícolas

2	1 - Sim 2 - Não
---	--------------------

2.4. Métodos de tratamento e pressupostos de co-produção

1	1 - Mix de produção de electricidade 2 - Central de ciclo combinado de GN 3 - Central de biomassa IGCC
---	--

2.5. Pressupostos para o bioetanol produzido a partir de trigo

2.5.1. Seleção do método para estimar os créditos dos co-produtos do bioetanol produzido a partir de trigo

1	1 - Método do Deslocamento 2 - Método Baseado na Alocação 3 - Método Baseado no Valor de Mercado
---	--

2.6. Pressupostos fundamentais sobre o etanol celulósico

Criação de Árvores	0	0 - Fermentação
Gramíneas	0	1 - Gaseificação
Resíduos Florestais	0	

2.7. Pressupostos para o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina

2.7.1. Inclusão de exportação de electricidade no processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina

2	1 - Sem exportação de electricidade 2 - Com exportação de electricidade
---	--

Figura 17 - Dados relativos à produção de bioetanol.

Inicialmente é efetuada a seleção por parte do utilizador da matéria-prima utilizada para a produção de bioetanol. O modelo permite escolher o trigo, a beterraba sacarina e biomassa (árvores, gramíneas e resíduos florestais) como matérias-primas para a produção do bioetanol.

No subponto 2, o utilizador define se pretende incluir ou não a energia e emissões associadas à produção de equipamentos agrícolas.

No subponto 3 o utilizador determina o tipo de electricidade deslocada para exportação por coprodução de electricidade nas centrais de bioetanol (Biomassa). O modelo permite seleccionar entre *mix* de produção de electricidade, central de gás natural e central de biomassa.

O subponto seguinte é referente à seleção das matérias-primas (árvores, gramíneas e resíduos florestais) para centrais de biomassa, na simulação de geração elétrica.

O subponto 5 é dedicado aos pressupostos chave para a simulação de bioetanol produzido a partir de trigo. Neste subponto é possível selecionar o método para estimar os créditos de coprodutos resultantes do trigo (por exemplo, alimentos para animais). O modelo MACVEtOH permite selecionar três métodos: método do deslocamento, método baseado na alocação e método baseado no valor de mercado.

Com o método de deslocamento, assume-se que um produto convencional é deslocado para a produção um novo produto. A energia do ciclo de vida utilizada, bem como as emissões geradas durante a produção do novo produto são contabilizados como créditos para o novo produto que é coproduzido. Esses créditos são subtraídos à energia total e emissões associadas à produção do combustível. O método baseado na alocação atribui o uso de matéria-prima, uso de energia e as emissões entre o produto primário e coprodutos em função da massa, teor de energia, ou rendimento económico. O método baseado no valor de mercado está sujeito à variação do preço dos coprodutos.

No subponto seguinte é pedido ao utilizador que selecione o processo de produção de bioetanol para os tipos de biomassa incluídos no modelo. As opções de seleção são a fermentação e gaseificação.

O processo de produção por gaseificação consiste em cinco processos: trituração, secagem, gaseificação (ou oxidação), purificação do gás e arrefecimento. No processo de produção por fermentação, o gás de síntese é convertido em bioetanol com o auxílio de bactérias.

O último subponto é referente aos pressupostos chave para a simulação de bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina. Neste subponto pode selecionar-se se existe, ou não, exportação de eletricidade na produção de bioetanol à base de beterraba sacarina.

O ponto 3 é dedicado às condições da simulação a efetuar (Figura 18). O modelo MACVEtOH realiza a simulação para veículos ligeiros de passageiros.

3. Dados da Simulação

3.1. Velocidade média da viagem a simular

108 km/h

3.2. Norma do veículo a simular

Veículo ligeiro de passageiros a gasolina

4

- 1 - Euro 1
- 2 - Euro 2
- 3 - Euro 3
- 4 - Euro 4
- 5 - Euro 5

3.3. Cilindrada do veículo a simular

2

- 1 < 1.4l
- 2 1.4l - 2.0l
- 3 > 2.0l

3.4. Fração urbana no total da simulação

2%

3.5. Distância de um percurso a simular

310 km

3.6. Conteúdo de etanol na mistura do combustível

Gasolina com baixo teor de etanol	9,5%
FFV	80,8%
Veículos Dedicados	80,8%

Figura 18 - Dados relativos à simulação.

Numa primeira fase o utilizador tem a possibilidade de introduzir a velocidade média em quilómetros por hora, dos veículos selecionados na simulação. O valor de velocidade média introduzido vai influenciar diretamente a folha “Veículos”, alterando desta forma os valores do consumo e das emissões dos veículos presentes no modelo. A velocidade média introduzida deve estar compreendida entre 10 e 130 km/h. Se o valor introduzido para a velocidade média não estiver compreendido entre os intervalos referidos anteriormente, surge uma mensagem de erro com letras a vermelho de forma a alertar o utilizador para introduzir um valor de velocidade dentro dos parâmetros requeridos. Estas restrições devem-se às características das equações utilizadas para determinação dos consumos e emissões dos veículos em questão. A origem das equações bem como as suas características serão explicadas posteriormente na secção “Veículos”.

O subponto seguinte é dedicado à seleção da norma dos veículos. O modelo MACVEtOH permite a seleção entre as cinco normas disponíveis, desde a norma EURO 1 (valor 1) à norma EURO 5 (valor 5). Na seleção da norma, a introdução de um valor fora da gama indicada no modelo MACVEtOH, gera um erro com letras vermelhas, alertando o utilizador para que este introduza um valor dentro dos disponíveis no modelo.

Posteriormente procede-se à seleção da cilindrada do veículo que se pretende simular. O modelo permite escolher entre três gamas diferentes de cilindrada (<1,4l, 1,4-2,0l e > 2,0l).

No subponto seguinte, o modelo MACVEtOH permite a seleção da fração urbana (fração do percurso total efetuado pelos veículos em zona urbana). O valor introduzido nesta célula permite que o modelo determine as emissões urbanas por parte dos veículos selecionados, tendo este influência direta na folha “Resultados”.

Seguidamente o utilizador define a distância do percurso a simular.

No último subponto, o modelo MACVEtOH permite selecionar o nível de mistura de bioetanol no combustível base, para diferentes tecnologias de veículos (Gasolina com baixo teor de bioetanol, FFV e Dedicados).

O quarto ponto (Figura 19) da presente folha de cálculo refere-se ao transporte de matérias-primas e de combustíveis. O modelo possibilita o transporte rodoviário, ferroviário, marítimo e o transporte em gasodutos de matérias-primas/combustíveis.

Os quatro primeiros subpontos são dedicados ao transporte rodoviário de matérias-primas/combustíveis. Numa fase inicial o utilizador pode selecionar a velocidade média do camião de transporte (gama limitada entre 6 e 100km/h). Nos subpontos seguintes, o utilizador pode selecionar a tara, desde inferior ou igual a 7,5 toneladas a superior a 32 toneladas, e a norma do pesado de mercadorias, desde a norma EURO 1 até à norma EURO 5. No subponto 4 é possível selecionar o fator de carga (0%, 50% ou 100%) quer na viagem de ida quer na viagem de retorno do veículo pesado de mercadorias. A alteração das características dos pesados de transporte influencia diretamente a folha “FE”, alterando nesta os fatores de emissão dos camiões de transporte de matérias-primas/combustíveis.

4. Dados sobre o transporte de matérias-primas/combustíveis

4.1. Velocidade média dos pesados de mercadorias

50 km/h

4.2. Tara dos pesados de mercadorias

7

- 1 <= 7.5t
- 2 >7.5 - 12t
- 3 >12 - 14t
- 4 >14 - 20t
- 5 >20 - 26t
- 6 >26 - 28t
- 7 >28 - 32t
- 8 > 32t

4.3. Norma dos pesados de mercadorias

4

- 1 - Euro 1
- 2 - Euro 2
- 3 - Euro 3
- 4 - Euro 4
- 5 - Euro 5

4.4. Factor de carga nas viagens de transporte de pesados de mercadorias

Viagem de ida

3

- 1 0%
- 2 50%
- 3 100%

Viagem de retorno

1

- 1 0%
- 2 50%
- 3 100%

4.5. Potência do comboio de transporte de matérias-primas/combustíveis

600 kW

4.6. Velocidade média dos navios e petroleiros de transporte

Navios

8 km/h

Petroleiros

30 km/h

4.7. Factor de carga no transporte de navios/petroleiros

Viagem de ida

80%

Viagem de retorno

60%

Figura 19 - Dados sobre o transporte de matérias-primas/combustíveis.

O subponto 5 é dedicado ao transporte ferroviário de matérias-primas/combustíveis. O modelo MACVEtOH apresenta uma célula para introdução da potência do comboio (kW). O utilizador ao introduzir o valor da potência vai proporcionar que o modelo selecione os fatores de emissão para o comboio com a potência indicada. As alterações são efetuadas diretamente na folha “FE” e na intensidade energética do comboio presente na folha “Transporte”. De salientar o fato de que se o utilizador introduzir um valor inferior a 130 kW, o modelo gera uma mensagem de erro informando com letras vermelhas que o utilizador deverá introduzir um valor superior a 130 kW. A imposição por parte do modelo

de um valor igual ou superior a 130 kW está relacionada com a fonte dos fatores de emissão do comboio, que será mencionada posteriormente na secção “FE”.

Os dois últimos subpontos dizem respeito ao transporte marítimo de matérias-primas/combustíveis. Nestes subpontos é possível selecionar a velocidade média e o fator de carga na viagem de ida e na de retorno dos petroleiros e dos navios. O valor da velocidade média e do fator de carga dos petroleiros e dos navios têm influência na intensidade energética destes, presente na folha “Transporte”.

Combustíveis

A folha de cálculo “Combustíveis” encontra-se decomposta em três pontos principais.

No primeiro ponto são abordadas as propriedades dos combustíveis gasosos, líquidos e sólidos. As propriedades referidas neste ponto são o PCI, o PCS, a massa volúmica (para o caso dos combustíveis líquidos e gasosos), a fração de carbono e a fração de enxofre, conforme apresentado nos quadros seguintes.

Quadro 7 - Propriedades dos combustíveis líquidos [4].

	Seleção	PCI	PCS	Densidade	Fracção de Carbono (C)	Fracção de Enxofre (S)
	MJ/m ³	MJ/m ³	MJ/m ³	kg/m ³	%	ppm
Crude	36141,2	36141,2	38560,4	846,7	85,3%	16000
Gasolina	32356,2	32356,2	34655,6	744,7	86,3%	10
Gasóleo	35801,1	35801,1	38290,1	836,6	86,5%	10
Fuel Óleo	39118,5	39118,5	41838,1	991,2	86,8%	5000
Fuel Óleo Pesado	39118,5	39118,5	41838,1	991,2	86,8%	28000
Etanol	21274,4	21274,4	23559,9	789,3	52,2%	5
Hidrogénio	8500,9	8500,9	10039,4	70,8	0,0%	0
GPL	23677,0	23677,0	25477,5	508,0	82,0%	0
Gás Natural	23324,7	23324,7	25098,4			0

Quadro 8 - Propriedades dos combustíveis gasosos [4].

	Seleção	PCI	PCS	Densidade	Fracção de Carbono (C)	Fracção de Enxofre (S)
	MJ/m ³	MJ/m ³	MJ/m ³	kg/m ³	%	ppm
Gás Natural	36,63	36,63	40,57	0,78	72,4%	6
Hidrogénio	10,81	10,81	12,78	0,09	0,0%	0
Dióxido de Carbono				1,98	27,3%	0

Quadro 9 - Propriedades dos combustíveis sólidos [4].

	Seleção	PCI	PCS	Fracção de Carbono (C)	Fracção de Enxofre (S)
	MJ/ton	MJ/ton	MJ/ton	%	ppm
Carvão	20622,4	20622,4	21743,2	63,7%	11100
Carvão Betuminoso	23697,2	23697,2	24736,7	75,5%	11800
Biomassa: árvores	17736,5	17736,5	18677,8	51,7%	0
Biomassa: gramíneas	15612,2	15612,2	16440,8	42,6%	0
Biomassa: resíduos florestais	13972,6	13972,6	14944,0	51,7%	0
Pet Coque	26766,8	26766,8	28402,1	79,9%	68000

O poder calorífico corresponde à quantidade de energia libertada numa combustão por unidade de volume ou massa. Como indicado nas figuras acima existem dois poderes caloríficos, o PCI e o PCS. O PCI representa a quantidade de energia libertada sob a forma de calor por unidade de volume ou massa. No PCS, acresce ao PCI a quantidade de energia dependida para vaporizar a água formada na reação de oxidação. Deste modo verifica-se

que quanto maior o poder calorífico do combustível, maior será a quantidade de energia libertada, ou por outras palavras, menor será a quantidade de combustível necessária para libertar uma determinada energia. O modelo MACVEtOH efetua a seleção entre o PCI e o PCS consoante os dados introduzidos pelo utilizador na folha de cálculo “Dados de Entrada”. Os valores das propriedades dos combustíveis foram retirados do modelo GREET 1_2011 [4] efetuando-se as respetivas conversões de unidades, com exceção da fração de enxofre da gasolina e do gasóleo - 10ppm -, valor retirado da diretiva da qualidade dos combustíveis vigente em Portugal (Diretiva 2003/17/CE) [57].

A densidade de um dado combustível representa a massa por unidade de volume do combustível. Esta propriedade está diretamente relacionada com o sistema de dosagem do combustível e com os padrões de atomização.

A fração de enxofre determina a quantidade do elemento enxofre presente no combustível. Este fator é de extrema importância, uma vez que após a combustão há produção de dióxido de enxofre (SO₂), que combinado com a água dá origem às chuvas ácidas.

Por fim, a fração de carbono corresponde à quantidade de carbono presente no combustível. Quanto maior for o teor de carbono de um combustível maior será a sua capacidade de combustão e maior será a produção de CO₂ e de CO.

No segundo ponto da presente folha de cálculo são apresentados os fatores de aquecimento global dos gases resultantes da combustão (Quadro 10).

Quadro 10 - Fatores de aquecimento global [58].

CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298
VOC	0
CO	0
NO ₂	0

Os fatores de aquecimento global são apresentados relativamente ao potencial de aquecimento global do CO₂. Esta é uma importante forma de comparação dos potenciais de aquecimento global dos gases libertados e de determinação da sua contribuição para o problema do aquecimento global. O horizonte de tempo considerado para os valores apresentados é de 100 anos. Deste modo, num horizonte de 100 anos, o CH₄ e o N₂O contribuem respetivamente 25 e 298 vezes mais para o aquecimento global que o CO₂. Sendo assim, com estes fatores de aquecimento global, o modelo MACVEtOH pode calcular a quantidade de GEE expressa em massa de CO₂ equivalente.

Por fim o ultimo ponto da folha de cálculo “Combustíveis” refere-se às frações de carbono e de enxofre dos poluentes (

Quadro 11).

Quadro 11 - Frações de carbono e enxofre dos poluentes [4].

VOC	0,85
CO	0,43
CH ₄	0,75
CO ₂	0,27
SO ₂	0,50

FE (Fatores de Emissão)

Na folha de cálculo “FE” são apresentados os fatores de emissão associados às tecnologias de combustão estacionária aplicadas aos processos de produção e transporte de matérias-primas e combustíveis. Os referidos fatores de emissão são apresentados em g por kWh. A folha de cálculo em questão encontra-se dividida em dois pontos principais.

Num ponto inicial são abordados os fatores de emissão das tecnologias de combustão estacionária utilizados no modelo MACVetOH. Estes fatores são importantes para o cálculo das emissões de poluentes de algumas folhas de cálculo seguintes, nomeadamente, “Petróleo”, “Gás Natural”, “Carvão”, “Etanol”, “Eletricidade”, e “Químicos”. Nos Quadros 12, 13 e 14 é possível observar os fatores de emissão para as tecnologias estacionárias consideradas no modelo MACVetOH.

Quadro 12 - Fatores de emissão para as tecnologias estacionárias em g/kWh (1/3) [4, 57, 58, 59, 60].

	Gás Natural					Fuel Óleo	Gasolina
	Turbina Simples	Turbina de Ciclo Combinado	Motor Estacionário	GN Queimado (Petróleo)	Caldeira Industrial	Caldeira Industrial	Motor Estacionário
VOC	0,008	0,024	0,028	0,009	0,009	0,023	0,354
CO	0,183	0,136	0,166	0,089	0,056	0,176	1,859
NO _x	0,245	0,204	0,204	0,167	0,143	0,390	1,636
PM	0,001	0,001	0,005	0,013	0,000	0,004	0,085
SO _x	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,251	0,004
CH ₄	0,007	0,010	0,012	0,167	0,004	0,011	0,018
N ₂ O	0,004	0,008	0,005	0,004	0,005	0,007	0,008
CO ₂	184,121	178,997	181,310	202,090	181,496	268,026	258,086

Quadro 13 - Fatores de emissão para as tecnologias estacionárias em g/kWh (2/3) [4, 57, 58, 59, 60].

	Gasóleo				Carvão		Biomassa: Árvores		Biomassa: Herbácea	
	Caldeira Industrial	Motor Estacionário	Turbina	Tractor Agrícola	Caldeira Industrial	Turbina IGCC	Caldeira Industrial	Turbina Gaseificação	Caldeira Industrial	Turbina Gaseificação
VOC	0,004	0,021	0,005	0,016	0,008	0,005	0,018	0,004	0,018	0,004
CO	0,057	0,706	0,030	0,543	0,329	0,042	0,262	0,036	0,262	0,036
NO _x	0,281	3,258	0,449	2,715	0,526	0,150	0,375	0,031	0,375	0,031
PM	0,145	0,272	0,058	0,217	0,065	0,022	0,043	0,019	0,043	0,019
SO _x	0,027	0,237	0,027	0,158	0,319	0,150	0,014	0,129	0,014	0,129
CH ₄	0,003	0,010	0,003	0,005	0,001	0,017	0,013	0,013	0,013	0,013
N ₂ O	0,001	0,010	0,007	0,005	0,174	0,017	0,038	0,038	0,038	0,038
CO ₂	266,691	250	266,731	250,311	324,275	370,053	348,828	349,227	326,506	326,905

Quadro 14 - Fatores de emissão para as tecnologias estacionárias em g/kWh (3/3) [4, 57, 58, 59, 60].

	Resíduos Florestais		Queima da beterraba (g/kg de palha seca queimada)	Bagaço de beterraba (g/kWh de combustível queimado)	Hidrogénio	Pet Coque	GPL
	Caldeira Industrial	Turbina Gaseificação		Caldeira Industrial		Caldeira Industrial	
VOC	0,018	0,004	7,000	0,018	0,000	0,061	0,033
CO	0,262	0,036	92,000	0,262	0,000	0,184	0,133
NO _x	0,375	0,031	2,500	0,375	0,124	0,490	0,074
PM	0,043	0,019	11,700	0,043	0,000	0,126	0,000
SO _x	0,014	0,129	0,400	0,014	0,000	2,489	0,000
CH ₄	0,013	0,013	2,700	0,013	0,000	0,031	0,017
N ₂ O	0,038	0,038	0,070	0,038	0,000	0,012	0,003
CO ₂	442,930	443,329	1659,520	442,930	0,000	319,995	211,685

Os fatores de emissão das tecnologias estacionárias assinaladas com uma pelica foram obtidos por recurso ao modelo GEMIS 4.5 [60], utilizando dados relativos a tecnologias estacionárias da UE. Devido à dificuldade em obter fontes alternativas, para as tecnologias estacionárias que não se encontram assinaladas com pelica nos Quadros 12, 13 e 14, mantiveram-se os fatores de emissão apresentados no GREET 1_2011 [4] com a respetiva conversão de unidades.

O segundo ponto da presente folha de cálculo contém os fatores de emissão, tendo como base os combustíveis convencionais, para os meios de transporte de matérias-primas e/ou combustíveis presentes no MACVEtOH. O modelo permite o transporte de matérias-primas e/ou combustíveis por petroleiro, navio, comboio, gasoduto e por pesado de mercadorias. Relativamente ao gasoduto, os fatores de emissão encontram-se no Quadro 15. Os fatores de emissão para o gasoduto a gás natural (GN) foram obtidos no modelo GEMIS 4.5 [60], para Portugal em 2010.

Quadro 15 - Fatores de emissão para o gasoduto a GN em g/kWh [60].

	Gasoduto - turbina	
	Gás Natural	
VOC	0,045	
CO	0,302	
NO _x	1,058	
PM	0,015	
SO _x	0,002	
CH ₄	0,015	
N ₂ O	0,009	
CO ₂	198,545	

No caso dos comboios de transporte os fatores de emissão variam consoante a potência deste. No quadro seguinte pode-se observar os fatores de emissão para as várias potências dos comboios de transporte, de acordo com a Agência Europeia do Ambiente [61].

Quadro 16 - Fatores de emissão para o comboio a gasóleo em g/kWh [61].

	Comboio		
	130 - 560 [kW]	560 - 2000 [kW]	> 2000 [kW]
VOC	0,40	0,40	0,40
CO	2,80	2,80	2,80
NO _x	3,50	6,00	7,40
PM	0,18	0,18	0,18
SO _x	0,00	0,00	0,00
CH ₄	0,04	0,04	0,04
N ₂ O	0,35	0,35	0,35
CO ₂	261,07	261,07	261,07
FC	241,30	241,30	241,30

A introdução por parte do utilizador da potência do comboio na folha de cálculo “Dados de Entrada” vai permitir que o modelo selecione os fatores de emissão de acordo com a potência introduzida e os valores do Quadro 16. Posteriormente o modelo calcula as emissões referentes ao transporte de mercadorias/combustíveis em comboios, processo que será abordado mais à frente na secção “Transporte”.

Para os veículos pesados de mercadorias, o modelo considera várias normas, taras e cargas. Relativamente a normas o utilizador pode selecionar na folha de cálculo “Dados de Entrada” desde a norma EURO 1 até à norma EURO 5. Na mesma folha de cálculo o utilizador também seleciona a tara, podendo esta ser desde inferior ou igual a 7,5 toneladas a superior a 32 toneladas. Estas características conjugadas com a carga do veículo que pode ser 0%, 50% ou 100%, vão permitir que o modelo selecione entre os vários fatores de emissão para veículos pesados disponíveis na folha “FE”, os que correspondem às exigências introduzidas pelo utilizador. As equações sobre as quais se regem os fatores de emissão para estes veículos encontram-se no Anexo 2, do Quadro A1 ao Quadro A15.

No caso dos petroleiros e navios de transporte (quer de mercadorias quer de combustíveis) mantiveram-se os valores apresentados no modelo GREET 1_2011 [4] com a respetiva conversão de unidades. No quadro seguinte podem ser observados os fatores de emissão dos navios e petroleiros de transporte considerados no modelo MACVetOH, que possuem como combustível base fuel óleo.

Quadro 17 - Fatores de emissão para os petroleiros e navios de transporte a fuel óleo em g/kWh [4].

	Petroleiro	Navio
	Fuel Óleo pesado	Fuel Óleo
VOC	0,219	0,219
CO	0,675	0,675
NO _x	7,936	5,199
PM	0,611	0,100
SO _x	5,108	0,912
CH ₄	0,005	0,000
N ₂ O	0,007	0,007
CO ₂	289,154	288,565

Petróleo

A folha de cálculo “Petróleo” encontra-se dividida em sete pontos principais. Entre os principais pontos são efetuados os cálculos não só para extração e refinamento do petróleo, como a produção de combustíveis derivados do petróleo. Os combustíveis considerados são o fuel óleo, a gasolina, o gasóleo e o gás de petróleo liquefeito (GPL). Existem no entanto dois fatores a salientar. O primeiro, é que embora o fuel óleo não seja considerado um combustível automóvel, é incluído nesta folha principalmente para cálculo de consumos e emissões associadas à produção elétrica e no transporte de navios e petroleiros. Em segundo lugar, é importante referir que a produção de GPL não é concluída nesta folha de cálculo. Na presente folha de cálculo são efetuados os consumos energéticos e emissões de poluentes para produção de GPL exclusivamente com Crude.

O primeiro ponto dedica-se exclusivamente à seleção da fração de GN utilizada para produção de GPL, ou seja, neste ponto o utilizador introduz a percentagem entre o crude e o GN utilizada para produção de GPL. Este ponto permite a conjugação dos valores de produção de GPL exclusivamente por GN presentes na folha de cálculo “Gás Natural” com os presentes nesta folha de cálculo. Deste modo obtêm-se os valores do consumo energético e de emissão de poluentes na produção de GPL com as frações introduzidas pelo utilizador. Na figura seguinte pode-se observar o excerto do modelo MACVetOH que contém este ponto.

	Crude	GN
Produção de GPL	40%	60%

Figura 20 – Fração de GN e crude utilizada para a produção de GPL.

A introdução, por parte do utilizador, de um valor cuja soma entre a fração de crude e de GN na produção de GPL seja diferente de 100%, gera um erro alertando o utilizador para introduzir valores cuja soma represente 100%.

No segundo ponto é apresentado o peso de cada uma das tecnologias estacionárias, cujos fatores de emissão se encontram especificados na folha de cálculo descrita anteriormente. Os pesos das tecnologias são apresentados para a extração do crude e para a produção dos derivados de petróleo incorporados no modelo MACVetOH. No quadro seguinte encontram-se precisamente os pesos relativos das tecnologias estacionárias. Neste caso, devido ao desconhecimento de fontes alternativas fidedignas, manteve-se os valores apresentados no GREET 1_2011 [4].

Quadro 18 - Peso relativos das tecnologias estacionárias na produção de combustíveis [4].

Equipamento	Extracção Petróleo	Refinação Fuel Óleo	Produção Gasolina	Produção Gasóleo	Produção GPL
Caldeira industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%	100%	100%
Caldeira industrial a Gasóleo	25%	33%	33%	33%	33%
Motor estacionário a Gasóleo	50%	33%	33%	33%	33%
Turbina a Gasóleo	25%	34%	34%	34%	34%
Motor a GN	50%	0%	0%	0%	0%
Turbina a GN	0%	25%	25%	25%	25%
Caldeira industrial a GN	50%	75%	75%	75%	75%
Caldeira industrial a Carvão	0%	100%	100%	100%	100%

O ponto seguinte encontra-se reservado à eficiência global dos processos de produção de combustíveis bem como às emissões urbanas. O valor de eficiência global é de extrema importância para o cálculo dos consumos energéticos dos processos de produção de combustíveis derivados do petróleo bem como da sua extração. Quanto menor a eficiência global, maior será a energia despendida no processo.

Quadro 19 - Valores da eficiência global e emissões urbanas para o petróleo e seus derivados [4, 60, 62].

	Petróleo	Fuel Óleo	Gasolina	Gasóleo	GPL
	Extracção	Refinação	Produção	Produção	Produção
Eficiência Global	97,6%	95,0%	92,6%	90,9%	92,9%
Emissões Urbanas	2,0%	65,0%	65,0%	65,0%	65,0%

No caso das emissões urbanas foram mantidos os valores apresentados pelo modelo GREET 1_2011 [4]. Os valores da eficiência global dividem-se entre duas fontes. A eficiência global do processo de refinação de fuel óleo e de produção de GPL foram obtidos por intermédio do modelo GEMIS 4.5 [60]. Os restantes valores da eficiência global para os restantes processos apresentados no Quadro 19 obtiveram-se por análise de um estudo WTW realizado pelo *Joint Research Centre* [62].

Posteriormente, no ponto 4 da presente folha de cálculo, são abordados os pesos relativos de cada um dos combustíveis para os processos de extração de petróleo, refinação de fuel

óleo e refinação de gasolina, gasóleo e GPL. Os referidos pesos relativos podem ser observados no quadro seguinte.

Quadro 20 - Peso relativo dos combustíveis nos processos de extração de petróleo e produção de seus derivados [4].

Combustível	Petróleo	Fuel Óleo	Gasolina	Gasóleo	GPL
	Extracção	Refinação	Produção	Produção	Produção
Perdas	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Crude	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fuel Óleo	1,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Gasóleo	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasolina	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gás Natural	61,9%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
Carvão	0,0%	13,0%	13,0%	13,0%	13,0%
Electricidade	19,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%
Hidrogénio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de processo	0,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%

Os pontos 5 e 6 correspondem ao cálculo dos consumos energéticos e emissões de poluentes associados à extração e transporte de petróleo, à refinação e transporte do fuel óleo, bem como à produção e transporte dos derivados de petróleo considerados no modelo MACVetOH.

Por fim o último ponto é um sumário, onde são apresentados os consumos energéticos e emissões de poluentes do crude como matéria-prima e dos combustíveis derivados do petróleo. O consumo energético é apresentado em J por kWh transformado, ou seja, é expresso em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado. As emissões de poluentes (poluentes totais e poluentes emitidos em zonas urbanas) são apresentadas em gramas emitidas por unidade de energia de combustível transformado, isto é, g/kWh transformado.

Como referido anteriormente os valores que afetam o consumo energético são os da eficiência global. Para o caso das emissões de poluentes, para além dos fatores de emissão das tecnologias estacionárias presentes na folha de cálculo “FE”, são importantes os valores dos Quadros 18, 19 e 20.

Gás Natural

A folha de cálculo “Gás Natural” é bastante semelhante à folha de cálculo “Petróleo”. Esta folha de cálculo é composta por sete pontos principais. Contudo na presente folha é apenas abordado o processo de extração e processamento do GN bem como o processo de produção de GPL. É nesta folha de cálculo que são apresentados os consumos energéticos finais da produção de GPL, produzido com as respetivas frações de crude e GN, introduzidas pelo utilizador.

O primeiro ponto da folha de cálculo em questão é relativo às referidas frações, no entanto, o utilizador nesta folha não efetua a introdução das frações de matéria-prima que pretende para produção de GPL, entre crude e GN. A introdução por parte do utilizador é efetuada na folha “Petróleo”, posteriormente essa folha de cálculo comunica com a presente folha.

O ponto seguinte corresponde aos pesos relativos de cada uma das tecnologias de combustão em cada combustível utilizado nos processos de extração e processamento do GN e produção do GPL (Quadro 21).

Quadro 21 - Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extração e processamento do GN e produção de GPL [4].

	Gás Natural		GPL
	Extração	Processamento	Produção
Caldeira a Fuel Óleo	100%	100%	100%
Caldeira a Gasóleo	25%	33%	33%
Motor estacionário a Gasóleo	50%	33%	33%
Turbina a gasóleo	25%	34%	34%
Motor a GN	50%	0%	0%
Turbina a GN	0%	50%	50%
Caldeira a GN	50%	50%	50%
Turbina a Carvão IGCC	0%	0%	0%

Posteriormente o modelo apresenta os valores de eficiência global e emissões urbanas (Quadro 22). Também nesta situação foram mantidos os valores das emissões urbanas considerados no modelo GREET 1_2011 [4]. O valor da eficiência global do processo de produção de GPL foi obtido com recurso ao modelo GEMIS 4.5 [60]. Por fim os valores da eficiência global para extração e processamento do GN obtiveram-se por análise de um estudo WTW realizado pelo *Joint Research Centre* [62].

Quadro 22 - Valores da eficiência global e emissões urbanas para GN e GPL [4, 60, 62].

	Gás Natural		GPL
	Extração	Processamento	Produção
Eficiência Global	97,7%	97,7%	92,9%
Emissões Urbanas	1,0%	1,0%	65,0%

No quarto ponto, são abordados os pesos relativos de cada um dos combustíveis para os processos de extração e processamento do GN, assim como de produção de GPL. Os pesos relativos dos combustíveis que integram a folha de cálculo “Gás Natural” podem ser observados no Quadro 23.

Quadro 23 - Peso relativo dos combustíveis nos processos de extração e processamento de GN e produção de GPL [4].

Combustível	Gás Natural		GPL
	Extração	Processamento	Produção
Perdas	11,4%	5,1%	0,0%
Fuel Óleo	0,9%	0,0%	0,0%
Gasóleo	9,7%	0,9%	1,0%
Gasolina	0,9%	0,0%	0,0%
Gás Natural	76,2%	91,1%	96,0%
Carvão	0,0%	0,0%	0,0%
Hidrogénio	0,0%	0,0%	0,0%
Electricidade	0,9%	2,8%	3,0%

Os pontos 5, 6 e 7 são em tudo semelhantes aos da folha de cálculo “Petróleo”, representando respetivamente o consumo energético, as emissões de poluentes e um sumário relativo ao consumo energético e emissões de poluentes.

Carvão

A folha de cálculo “Carvão” incorpora os cálculos do consumo energético e emissões de poluentes do processo de extração e processamento do carvão. Os resultados desta folha são usados nas restantes folhas do modelo como combustível ou matéria-prima. Esta folha de cálculo é semelhante às duas anteriores, no entanto a disposição dos conteúdos nos principais pontos não é a mesma, uma vez que só possui seis pontos principais.

Na fase inicial da folha de cálculo “Carvão” são especificados os pesos das tecnologias de combustão estacionária para cada um dos combustíveis utilizados no processo de extração e processamento do carvão. O quadro seguinte contém o peso de cada uma das tecnologias de combustão estacionária no processo de extração e processamento do carvão. Cada uma das frações expressas no quadro seguinte conjugadas com os respetivos fatores de emissão presentes na folha de cálculo “FE” dá origem às emissões de poluentes do processo de extração e de processamento do carvão.

Quadro 24 - Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extração e processamento do carvão [4].

Equipamento	Extração e processamento de Carvão
Caldeira industrial a Fuel óleo	100%
Caldeira industrial a Gasóleo	33%
Motor estacionário a Gasóleo	33%
Turbina a Gasóleo	34%
Motor a GN	50%
Turbina a GN	0%
Caldeira industrial a GN	50%
Caldeira industrial a Carvão	100%

No ponto posterior são apresentados os valores de emissões urbanas e de eficiência global no processo de extração e processamento do carvão. Estes valores, que podem ser observados no Quadro 25, são relevantes pois contribuem para o consumo energético e para as emissões de poluentes finais do carvão enquanto matéria-prima.

Quadro 25 - Valores da eficiência global e emissões urbanas para o carvão [4, 60].

	Extração e processamento de Carvão
Eficiência Global	97%
Emissões Urbanas	0%

O valor da eficiência global dos processos de extração e processamento do carvão presente no Quadro 25 é um valor genérico para os processos referidos e obteve-se por consulta do modelo GEMIS 4.5 [60]. No caso das emissões urbanas manteve-se o valor apresentado no modelo GREET 1_2011 [4].

Para o cálculo dos consumos energéticos inerentes ao processo de extração e processamento do carvão são essenciais os valores presentes no ponto três da presente folha de cálculo, e que podem ser observados no Quadro 26. Os valores representam a fração de utilização de cada combustível nos processos de extração e processamento do carvão. A conjugação destes valores com os fatores de emissão das tecnologias de combustão estacionária e com o peso relativo das tecnologias de combustão estacionária na extração e processamento do carvão dão origem às emissões de poluentes do carvão enquanto matéria-prima.

Quadro 26 - Peso relativo de cada um dos combustíveis nos processos de extração e processamento do carvão [4].

Combustível	Extracção e processamento de Carvão
Perdas	0%
Fuel Óleo	7%
Gasóleo	56%
Gasolina	3%
Gás Natural	1%
Carvão	9%
Electricidade	24%

Nos restantes pontos são apresentados respetivamente os consumos energéticos, as emissões de poluentes e um sumário dos consumos energéticos e emissões de poluentes. O consumo energético é apresentado em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado ($J/kWh_{\text{transformado}}$). As emissões de poluentes são apresentadas em gramas emitidas por unidade de energia de combustível transformado ($g/kWh_{\text{transformado}}$). No último ponto, ou seja, no sumário das emissões de poluentes e consumos energéticos, são apresentados os resultados correspondentes ao carvão que vai ser utilizado em centrais elétricas.

Etanol

A folha de cálculo “Etanol” incorpora os cálculos do consumo energético e as taxas de emissão na produção de bioetanol a partir de trigo, biomassa (árvores, gramíneas e resíduos florestais) e beterraba sacarina. As seguintes etapas são incluídas na presente folha de cálculo: cultivo e transporte da matéria-prima, produção de bioetanol, distribuição e armazenamento do bioetanol. Para o bioetanol à base de trigo, a energia e emissões associadas aos coprodutos do bioetanol (por exemplo, alimentos para animais) podem ser estimados utilizando o método baseado no deslocamento, na repartição ou no valor de mercado segundo a seleção do utilizador. Para a produção de bioetanol a partir de biomassa (árvores, gramíneas e resíduos florestais) é solicitado ao utilizador que selecione o processo de produção de bioetanol (fermentação ou gaseificação) para os tipos de biomassa incluídos no modelo MACVEtOH.

É importante salientar que o valor dos consumos energéticos e emissões dos diferentes tipos de biomassa disponíveis no modelo MACVEtOH são importantes posteriormente para calcular o consumo energético e emissões na produção elétrica, uma vez que 3,4% da produção de energia elétrica nacional é efetuada a partir de biomassa

A presente folha de cálculo é composta por cinco pontos principais. O primeiro ponto é referente aos parâmetros de entrada chave e cenário base. Os valores desta secção resultam principalmente de dados introduzidos pelo utilizador na folha “Dados de Entrada”. Assim,

esta secção é o elo interativo entre a folha “Dados de Entrada” e a presente folha de cálculo.

No ponto 2 são especificados os pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção de bioetanol (Quadro 27), que são usados para o cálculo das emissões.

Quadro 27 - Peso relativo das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção de bioetanol (1/2) [4].

	Trigo: Agricultura	Trigo: Produção de Etanol	Beterraba Sacarina: Agricultura	Beterraba Sacarina: Produção de Etanol
Caldeira a Fuel Óleo	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Caldeira a Gasóleo	0,0%	33,0%	0,0%	33,0%
Motor Estacionário a Gasóleo	20,0%	33,0%	0,0%	33,0%
Turbina a Gasóleo	0,0%	34,0%	0,0%	34,0%
Tractor agrícola a Gasóleo	80,0%		100,0%	
Motor a GN	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%
Turbina a GN	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Caldeira a GN	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%
Turbina a Carvão IGCC	100,0%	100,0%	100,0%	
Caldeira a Biomassa		100,0%		
Gaseificador a Biomassa		0,0%		

Quadro 28 - Peso relativo das tecnologias processos de produção de bioetanol (2/2) [4].

	Criação de árvores: Agricultura	Criação de árvores: Produção de Etanol	Biomassa Herbácea: Agricultura	Biomassa Herbácea: Produção de Etanol	Resíduos Florestais: Recolha	Resíduos Florestais: Produção de Etanol
Caldeira a Fuel Óleo	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Caldeira a Gasóleo	0,0%	33,0%	0,0%	33,0%	0,0%	33,0%
Motor Estacionário a Gasóleo	20,0%	33,0%	20,0%	33,0%	0,0%	33,0%
Turbina a Gasóleo	0,0%	34,0%	0,0%	34,0%	0,0%	34,0%
Tractor agrícola a Gasóleo	80,0%		80,0%		100,0%	
Motor a GN	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%
Turbina a GN	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Caldeira a GN	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%
Turbina a Carvão IGCC	100,0%		100,0%		100,0%	
Caldeira a Biomassa						
Gaseificador a Biomassa						

Os valores dos Quadros 27 e 28 permitem obter, conjugados com os fatores de emissão da folha de cálculo “FE” e o peso relativo de cada combustível no processo de agricultura (Quadro 29), as emissões de poluentes na fase da agricultura.

Quadro 29 - Peso relativo de cada um dos combustíveis no processo de agricultura [4].

	Agricultura de Trigo	Criação de árvores: Agricultura	Biomassa herbácea: Agricultura	Recolha de Resíduos Florestais	Beterraba Sacarina: Agricultura
Fuel óleo	0,0%				0,0%
Gasóleo	49,2%	94,3%	92,8%	100%	38,3%
Gasolina	14,7%				12,3%
Gás Natural	13,5%	0,0%	0,0%	0%	21,5%
Carvão	0,0%				0,0%
GPL	17,9%	0,0%	0,0%	0%	18,8%
Biomassa					
Electricidade	4,6%	5,7%	7,2%	0%	9,0%

Os dados do Quadro 29 localizam-se no terceiro ponto da presente folha de cálculo do modelo MACVetOH. Também no ponto 3, é calculado o consumo energético dos processos de agricultura das matérias-primas e da produção de bioetanol, sendo que no quarto ponto estão representadas as emissões de poluentes para os processos referidos anteriormente. De salientar que nos processos de agricultura são essenciais os fertilizantes e os pesticidas. Contudo o consumo energético e as emissões de poluentes deste são importados da folha de cálculo “Químicos” e portanto serão explicados posteriormente na respetiva secção. O mesmo acontece com o transporte das matérias-primas que é importado da folha de cálculo “Transporte” e que será explicado de forma sucinta na respetiva secção.

O último ponto da presente folha de cálculo corresponde a um resumo dos consumos energéticos e das emissões de poluentes inerentes à produção de bioetanol. O consumo energético é expresso em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado ($J/kWh_{\text{transformado}}$) e as emissões de poluentes são expressas em gramas por unidade de energia de combustível transformado ($g/kWh_{\text{transformado}}$).

Eletricidade

Na folha de cálculo “Eletricidade” são efetuados os cálculos dos consumos energéticos e emissões de poluentes inerentes à produção de eletricidade em Portugal. A eletricidade produzida será posteriormente utilizada noutras folhas de cálculo, nos diversos processos de produção de combustíveis. A presente folha encontra-se dividida em sete pontos principais.

Inicialmente é apresentado o *mix* energético de geração de eletricidade em Portugal. No quadro seguinte é apresentada a produção de energia elétrica por fonte de energia, incluindo o peso relativo das diversas fontes na produção de energia elétrica.

Quadro 30 - Peso relativo por fonte energética na produção de energia elétrica em Portugal [63].

Combustível	[%]	[GWh]	[tep]
Petróleo	10,4%	4870,0	1412,3
Gás Natural	28,1%	13124,0	3806,0
Carvão	26,6%	12398,0	3595,4
Biomassa	3,4%	1588,0	460,5
Nuclear	0,0%	0,0	0,0
Solar Fotovoltaica	0,1%	24,0	7,0
Eólica	8,6%	4037,0	1170,7
Outros	22,8%	10650,0	3088,5
Total	100,0%	46691,0	13540,4

Seguidamente no Quadro 31 são apresentadas as emissões urbanas. De salientar o facto de as fontes de energia renovável não apresentarem valores de emissões urbanas. Este facto deve-se a estas fontes de produção de energia elétrica não apresentarem emissões no ato de produção de energia elétrica.

Quadro 31 - Valores das emissões urbanas para cada um dos combustíveis inerentes à produção elétrica [4].

Combustível	Emissões Urbanas [%]
Petróleo	39,0%
Gás Natural	43,0%
Carvão	16,0%
Biomassa	0,0%
Nuclear	11,0%

No ponto 2, o modelo apresenta o peso e a eficiência das tecnologias de combustão estacionária inerentes à geração de eletricidade.

Quadro 32 - Pesos relativos e eficiência das tecnologias de combustão estacionária na produção elétrica [4].

Combustível	Equipamento	Peso [%]	Eficiência [%]
Petróleo	Caldeira	100,0%	34,8%
Gás Natural	Caldeira	20,0%	34,8%
	Turbina simples	36,0%	33,1%
	Turbina de ciclo combinado	44,0%	53,0%
Carvão	Caldeira	100,0%	34,1%
	IGCC	0,0%	46,0%
Biomassa	Caldeira	100,0%	32,1%
	IGCC	0,0%	40,0%

O terceiro ponto da presente folha de cálculo é reservado para a apresentação de perdas na distribuição da energia elétrica. Por análise dos dados apresentados pela Agência Internacional de Energia para o ano de 2007 [63], verifica-se que as perdas na distribuição de eletricidade em Portugal são de 6,8%.

Os valores presentes no Quadro 32 conjugados com os fatores de emissão das tecnologias de combustão estacionária presentes na folha de cálculo “FE” e com o peso relativo por fonte energética na produção de energia elétrica (Quadro 30) dão origem aos fatores de emissão na geração de eletricidade, que podem ser observados no Quadro 33. De salientar que os fatores de emissão de produção de energia elétrica são expressos em gramas por unidade de energia elétrica produzida ($\text{g/kWh}_{\text{produzido}}$). Os dados do Quadro 33 encontram-se no quarto ponto da presente folha de cálculo.

Quadro 33 - Fatores de emissão por unidade de energia elétrica produzida.

	Factor de emissão	
	Total	Urbano
CH₄	0,011	
CO	0,433	0,103
CO₂	495,995	
NO_x	0,712	0,174
N₂O	0,145	
PM	0,057	0,009
SO_x	0,326	0,070
VOC	0,025	0,008

Os pontos 5 e 6 correspondem respetivamente ao cálculo do consumo energético e emissões de poluentes. As emissões de poluentes são obtidas de acordo com os dados do Quadro 33 e com o fator de perdas na distribuição de eletricidade em Portugal. Por fim o último ponto, que corresponde ao sumário das emissões de poluentes e do consumo energético, encontra-se dividido em três subpontos, representando individualmente o consumo de energia, as emissões totais e as emissões urbanas. O consumo de energia é expresso em unidade de energia consumida por unidade de energia elétrica distribuída (J/kWh distribuído) e as emissões de poluentes em gramas por unidade de energia elétrica distribuída (g/kWh distribuído).

A presente folha de cálculo apresenta também os valores dos consumos energéticos e emissões de poluentes na produção de painéis solares fotovoltaicos (com produção de eletricidade) e na produção de torres eólicas. Os painéis fotovoltaicos são uma fonte limpa na produção de energia, contudo a produção dos painéis possui emissões e consumos energéticos. Estes valores têm relevância na produção de eletricidade. Os valores obtidos para os consumos energéticos e emissões de poluentes inerentes à produção dos painéis fotovoltaicos encontram-se nos Quadros 34 e 35, e foram obtidos por consulta do modelo GEMIS 4.5 [60] para painéis policristalinos com caixilharia de alumínio na Alemanha em 2010.

Quadro 34 - Consumos energéticos na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de eletricidade por parte destes [60].

	Solar Fotovoltaico
Energia total	1603094
Combustíveis fósseis	1096732,8
Carvão	325191,6
Gás Natural	618300
Petróleo	153241,2

Quadro 35 - Emissões de poluentes na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de eletricidade por parte destes [60].

	Solar Fotovoltaico
VOC	0,010
CO	2,125
NO _x	0,155
PM	0,068
SO _x	0,143
CH ₄	0,263
N ₂ O	0,003
CO ₂	94,703
CO ₂ com o C do VOC e CO	98,073
GEE	105,423

Na produção das torres eólicas, é de salientar uma vez mais, que apesar da produção de energia elétrica por recurso ao vento não apresentar emissões no ato de produção, a produção dos equipamentos apresenta emissões que devem ser tidas em conta numa ACV. Os valores dos dois quadros seguintes foram obtidos por consulta do modelo GEMIS 4.5 [60] e são importantes para a produção de eletricidade. Os valores são apresentados para um parque eólico de grandes dimensões na Alemanha em 2010. O modelo GEMIS apresenta valores para Portugal, contudo optou-se por selecionar os da Alemanha uma vez que os valores apresentados para Portugal correspondem ao ano de 2000 e para um parque eólico médio.

Quadro 36 - Consumos energéticos na produção de torres eólicas incluído na produção de eletricidade por parte destas [60].

	Energia Eólica
Energia total	171920,88
Combustíveis fósseis	125963,03
Carvão	82184,4
Gás Natural	103,43
Petróleo	43675,2

Quadro 37 - Emissões de poluentes na produção de torres eólicas [60].

	Energia Eólica
VOC	0,044
CO	0,087
NO _x	0,050
PM	0,012
SO _x	0,013
CH ₄	0,041
N ₂ O	0,000
CO ₂	22,552
CO ₂ com o C do VOC e CO	22,826
GEE	23,976

Químicos

Na folha de cálculo denominada “Químicos” são efetuados os cálculos relativos ao consumo energético e às emissões de poluentes dos químicos agrícolas. Os químicos agrícolas abordados são os fertilizantes, os herbicidas e os inseticidas, tendo ambos particular importância no processo de criação da biomassa. O modelo MACVetOH considera os fertilizantes NPK, ou seja o Azoto (que inclui a ureia, a amónia e o nitrato de amónia), o potássio na forma de P_2O_5 e o fosfato na forma de K_2O . O modelo considera também o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A presente folha é composta por cinco pontos principais.

No primeiro ponto são apresentados os pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção dos fertilizantes, dos herbicidas e dos inseticidas (Quadro 38). Devido à falta de fontes alternativas de informação credíveis, foram usados como base os valores do modelo GREET 1_2011 [4].

Quadro 38 - Peso relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção dos fertilizantes, herbicidas e inseticidas [4].

	Azoto Produção	P_2O_5 Produção	K_2O Produção	$CaCO_3$ Produção	Herbicidas Produção	Inseticidas Produção
Caldeira a Fuel Óleo	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Caldeira a Gasóleo	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%
Motor estacionário a Gasóleo	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%
Turbina a gasóleo	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Motor a GN	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Turbina a GN	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Caldeira a GN	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Turbina a Carvão IGCC	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

No segundo ponto são efetuados os cálculos do consumo energético e das emissões de poluentes associados aos processos de produção e de transporte dos químicos agrícolas. Os valores quer de consumos energéticos quer de emissões para o transporte dos químicos são importados da folha de cálculo “Transporte” e portanto serão explicados nessa secção. O consumo energético da produção dos químicos é obtido tendo em conta os pesos relativos dos combustíveis. No caso das emissões de poluentes, para além do peso relativo dos combustíveis, são essenciais os valores do peso relativos das tecnologias estacionárias (Quadro 38), conjuntamente com os fatores de emissão das tecnologias estacionárias presentes na folha “FE”.

O terceiro ponto apresenta-se como um resumo intermédio. Neste ponto são apresentados os consumos energéticos e as emissões da fase de produção e de transporte de cada um dos químicos.

No quarto ponto é apresentado um resumo final dos consumos energéticos e das emissões de poluentes inerentes à produção e distribuição dos químicos mencionados. Neste ponto

os valores do consumo energético são expressos em unidade energética por grama produzida ($J/g_{\text{produzido}}$) e as emissões em gramas por grama produzida ($g/g_{\text{produzido}}$).

No último ponto é apresentado a energia e emissões associadas à produção de equipamentos agrícolas. Estes valores serão ou não incluídos na energia e emissões totais associados à produção de bioetanol, de acordo com a seleção do utilizador na folha de cálculo “Dados de Entrada”.

Transportes

Na folha de cálculo “Transportes” são efetuados os cálculos relativos ao consumo energético e às emissões de poluentes associados ao transporte de todas as matérias-primas e combustíveis considerados no modelo MACVetOH. A presente folha encontra-se decomposta em dez pontos principais.

No primeiro ponto é apresentada a carga em toneladas, de cada matéria-prima e combustível, transportada em petroleiro, navio e camião. Devido à falta de dados considerou-se os valores do modelo GREET 1_2011 [4]. Com os valores deste ponto é possível obter a potência requerida pelos navios e petroleiros, sendo estes apresentados no ponto 2.

O terceiro ponto apresenta o consumo de combustível e o consumo de energia dos camiões de transporte. De acordo com o tipo e a carga de camião selecionado pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” o modelo interage com a folha “FE” e calcula o consumo de combustível do camião ($l/100km$) e o consumo energético por quilómetro (J/km).

No quarto ponto é apresentada a intensidade energética para o transporte em gasoduto, valores obtidos por intermédio do modelo GREET 1_2011 [4].

No ponto seguinte do modelo é apresentada a intensidade energética do transporte em comboio cujo valor é $199952 J/ton.km$ [64]. O modelo MACVetOH considera a viagem de ida e de retorno para os diversos meios de transporte, uma vez que os diferentes fatores de carga em cada tipo de viagem proporcionam diferentes intensidades energéticas, logo diferentes consumos energéticos e emissões.

O sexto ponto apresenta o consumo energético dos petroleiros e dos navios. Os valores são calculados de acordo com o fator de carga introduzido pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” e com as propriedades do combustível na folha “Combustíveis”.

Nos pontos seguintes são efetuados os cálculos do consumo energético e das emissões no transporte de combustíveis e matérias-primas. De salientar ainda a necessidade da introdução da distância total para cada meio de transporte, no ponto 8.

Posteriormente no último ponto é efetuado um resumo dos consumos energéticos e emissões no transporte e distribuição dos combustíveis e matérias-primas. O consumo energético é dado em unidade de energia consumida por unidade de energia transportada ($J/kWh_{transportado}$) e as emissões em gramas por unidade energética transportada ($g/kWh_{transportado}$) no caso do transporte de combustíveis. No transporte de matérias-primas, o consumo energético é dado em unidade de energia consumida por tonelada transportada ($J/ton_{transportada}$) e as emissões em gramas emitidas por tonelada transportada ($g/ton_{transportada}$).

Veículos

Na folha de cálculo “Veículos” são efetuados os cálculos dos consumos energéticos e das emissões associadas aos veículos incorporados no modelo MACVEtOH. Nos cálculos, o modelo recorre à velocidade média da viagem a simular introduzida pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” e às constantes presentes na folha “Base de Dados”.

O modelo considera a seguinte gama de veículos que o utilizador pode seleccionar para a simulação pretendida:

- Ligeiros de passageiros a gasolina cilindrada inferior a 1,4l
- Ligeiros de passageiros a gasolina cilindrada 1,4l até 2,0l
- Ligeiros de passageiros a gasolina cilindrada superior a 2,0l

A presente folha de cálculo encontra-se dividida em três pontos principais.

O primeiro ponto corresponde ao cálculo dos fatores de emissão e fator de consumo de combustível associado aos veículos ligeiros de passageiros a gasolina. O modelo MACVEtOH efetua os referidos cálculos para várias normas. Dentro de cada uma das normas mencionadas são considerados três gamas de cilindrada, ou seja, cilindrada inferior a 1,4l, de 1,4l a 2,0l e superior a 2,0l. Para o cálculo dos fatores de emissão e fator de consumo dos veículos ligeiros de passageiros a gasolina de norma EURO, o modelo utiliza a seguinte equação presente no “*Emission Inventory Guidebook*” [65]:

$$EF = \frac{a + c * V + e * V^2}{1 + b * V + d * V^2} \quad (\text{Equação 1})$$

As letras a, b, c, d e e presentes na Equação 1 correspondem às constantes que podem ser consultadas no Anexo 3 no Quadro A16. O V representa a velocidade média introduzida pelo utilizador na folha “Dados de Entrada”.

No segundo ponto apresenta-se um rácio do consumo de energia e emissões dos veículos com combustíveis alternativos relativamente aos veículos de cenário base. Os valores presentes neste ponto vão permitir que o modelo calcule emissões e consumos dos veículos alternativos de acordo com os valores apresentados no primeiro ponto da presente folha de cálculo. Para os valores de rácio de consumo de combustível e de emissões presentes neste ponto utilizou-se como fonte o modelo GREET 1_2011 [4].

No terceiro e último ponto, é apresentado o nível de mistura de bioetanol para combustíveis alternativos. Estes valores podem ser alterados pelo utilizador na folha “Dados de Entrada”. Estes valores terão influência no cálculo do consumo de energia e emissões de combustíveis alternativos.

Resultados

A folha de cálculo “Resultados” dedica-se exclusivamente à apresentação dos resultados dos cálculos efetuados nas folhas de cálculo anteriores com os dados introduzidos pelo utilizador. A folha “Resultados” encontra-se decomposta em três pontos principais de forma a apresentar os resultados WTP e WTW para os dados introduzidos inicialmente.

O primeiro ponto baseia-se numa análise dos combustíveis desde a sua produção até à sua disponibilização no ponto de abastecimento, ou seja, são apresentados os consumos energéticos e as emissões de poluentes numa análise WTP dos combustíveis considerados. Os combustíveis considerados na folha Resultados são a gasolina, o gasóleo, o GPL e o bioetanol. Embora a energia elétrica não seja considerada como um combustível no modelo, é ainda assim incluída nesta folha para fins de comparação com os combustíveis automóveis. O consumo energético neste ponto é expresso em unidade de energia por unidade de energia de combustível disponível na estação de reabastecimento (J/kWh disponível) e as emissões de poluentes são expressas em gramas por unidade de energia de combustível disponível na estação de reabastecimento (g/kWh disponível).

O segundo ponto diz respeito a uma análise desde a produção dos combustíveis até à fase em que são utilizados nos veículos, ou seja, é apresentada uma análise WTW dos combustíveis considerados aplicados aos vários veículos considerados. Neste ponto o modelo apresenta os resultados WTW não só em termos de consumos energéticos e emissões totais, como em cada uma das fases. Sendo assim o modelo apresenta os consumos energéticos e emissões na fase de produção e transporte da matéria-prima, na de produção e transporte do combustível e na de operação do veículo. Nesta fase os resultados a nível de consumos energéticos são expressos em unidade de energia consumida por quilómetro (J/km). Relativamente às emissões de poluentes são apresentados em gramas por quilómetro (g/km).

O último ponto corresponde a uma comparação percentual do veículo selecionado face ao veículo de referência (veículo a gasolina como combustível de cenário base). Neste ponto

podem ser apresentados valores percentuais positivos ou negativos. Os valores positivos significam um aumento e os valores percentuais negativos significam uma diminuição de consumo energético e emissão de poluentes relativamente ao veículo com o combustível de referência.

Gráficos

A folha de cálculo “Gráficos” diz respeito à representação gráfica de alguns dos resultados, comunicando apenas com a folha de cálculo “Resultados”. O objetivo da folha “Gráficos” é facilitar a interpretação dos resultados apresentados na folha de cálculo anterior. Na presente folha são apresentados graficamente os resultados WTP, WTW e relação percentual correspondente ao aumento ou diminuição no consumo energético e emissão de poluentes dos veículos alternativos face ao veículo de cenário base. Nesta folha de cálculo são também apresentados gráficos com o peso relativo dos consumos energéticos e emissões de cada uma das três etapas (produção e transporte da matéria-prima, produção e transporte do combustível e operação do veículo).

Base de Dados

A folha de cálculo “Base de dados” é a última folha do modelo MACVEtOH. A presente folha apresenta a particularidade de não importar valores de nenhuma das folhas anteriores, destinando-se unicamente a fornecer dados às folhas anteriores, nomeadamente à folha “FE” e à folha “Veículos”. De um modo geral a presente folha apresenta os dados essenciais para o cálculo dos fatores de emissão dos veículos rodoviários presentes no modelo.

7. Resultados e sua Discussão

Neste capítulo será apresentado um caso prático do modelo MACVetOH, analisando um percurso em termos de emissões e consumos de energia no ciclo de vida do bioetanol nas formas WTP e WTW.

Contudo numa fase inicial, efetuou-se uma calibração do modelo. Depois, por análise de dados reais analisou-se o consumo de combustível para o veículo a bioetanol através do modelo MACVetOH comparativamente com os dados existentes.

7.1. Calibração do Modelo

Nesta fase procedeu-se à comparação dos resultados obtidos pelo modelo MACVetOH para o consumo dos veículos com dados reais apresentados por marcas de veículos a bioetanol. A análise foi efetuada para veículos ligeiros de passageiros. Em qualquer uma das análises tentou-se representar as características descritas pelos fabricantes.

Relativamente aos veículos ligeiros de passageiros, foram comparados os resultados apresentados pelo modelo MACVetOH com os dados apresentados para os seguintes modelos *flexifuel* disponíveis na Europa: Ford Focus 1.8l FFV [66], Ford Escape 3.0 L FFV [67] e Ford Fiesta 1.25 *Style* 3dr [68]. No quadro seguinte são apresentadas algumas características dos modelos *flexifuel* referidos anteriormente.

Quadro 39 - Características dos modelos *flexifuel* analisados [66, 67, 68].

	Ford Focus 1.8l FFV	Ford Escape 3.0l FFV	Ford Fiesta 1.25l <i>Style</i> 3dr
Ano	2007	2010	2005
Motor	1.8l FFV	3.0l FFV	1.25l <i>Style</i> 3dr
Norma EURO	EURO IV	EURO V	EURO IV
Peso bruto do veículo [kg]	1895	1500	1520
Consumo [l/100km]	7,9*	9,4**	6,8*
Emissões de CO₂ [g/km]	167	211,2	142

* - Consumo em ciclo urbano;

** - Consumo em autoestrada.

O modelo flexível Ford Focus (FFV) foi o primeiro veículo a biocombustível a ser lançado na Grã-Bretanha e tem uma cilindrada de 1.8l. Este veículo funciona a bioetanol (E85) derivado de culturas como o trigo e beterraba sacarina, que produzem menos CO₂ e torna o FFV mais eficiente do que a variante a gasolina em que foi baseado [66]. No modelo MACVetOH selecionou-se a norma EURO IV e a cilindrada entre 1,4l e 2,0l (visto que o veículo apresenta uma cilindrada de 1,8l). Em relação à velocidade de circulação, fator relevante para o consumo, consideraram-se três cenários de velocidades possíveis em ciclo urbano.

Para o veículo Ford Escape 3.0l FFV consideraram-se três cenários com velocidades possíveis em autoestrada, pois os dados indicados pelo fabricante são relativamente ao consumo em autoestrada. As simulações foram efetuadas para um veículo norma EURO V com cilindrada superior a 2,0l.

O veículo Ford Fiesta 1.25l *Style* 3dr pode funcionar somente com gasolina ou com gasolina com baixo teor de etanol (E10). Consideraram-se novamente três gamas de velocidades para efetuar a simulação para ciclo urbano, para um veículo norma EURO IV e com uma cilindrada inferior a 1,4l.

Com a introdução dos dados referidos anteriormente obteve-se o consumo dos veículos e emissões de CO₂ para cada cenário considerado. No quadro seguinte são apresentados estes resultados juntamente com a variação percentual do consumo registado no modelo MACVEtOH, em cada um dos cenários, face ao valor real.

Quadro 40 - Comparação do consumo e emissões de CO₂ dos veículos analisados com os dados do modelo MACVEtOH.

		Consumo Real [l/100km]	Consumo MACVEtOH [l/100km]	Δ	Emissões CO ₂ Reais [g/km]	Emissões CO ₂ MACVEtOH [g/km]	Δ
Ford Focus 1.8l FFV	Cenário 1 V = 35 km/h	7,9	8,6	8,5%	167,0	197,5	18,3 %
	Cenário 2 V = 40 km/h		8,1	2,9%		178,9	7,1%
	Cenário 3 V = 45 km/h		7,8	-1,3%		164,7	-1,4%
Ford Escape 3.0l FFV	Cenário 1 V = 110 km/h	9,4	9,1	-3,2%	211,2	221,2	-9,4%
	Cenário 2 V = 115 km/h		9,3	-1,1%		230,6	-5,6%
	Cenário 3 V = 120 km/h		9,6	2,1%		242,9	-0,5%
Ford Fiesta 1.25l Style 3dr	Cenário 1 V = 35 km/h	6,8	7,1	4,4%	142,0	162,0	14,1 %
	Cenário 2 V = 40 km/h		6,7	-1,5%		151,1	6,4%
	Cenário 3 V = 45 km/h		6,4	-5,9%		143,2	0,9%

Relativamente ao veículo Ford Focus 1.8l FFV verificou-se que o valor de consumo que apresentou maior proximidade com o real foi o do cenário 3, com uma discrepância de -1,3%. No cenário 1 a variação foi de 8,5% do valor apresentado para o Ford Focus 1.8l FFV. Relativamente às emissões de CO₂ apresentadas pelo modelo MACVEtOH, o cenário

1 foi o que apresentou maior discrepância (18,3%), já o cenário 3 foi o que apresentou maior proximidade (-1,4%).

Em relação ao veículo Ford Escape 3.0l FFV verificou-se, para qualquer dos cenários analisados, uma grande proximidade em termos do consumo aos cem quilómetros com os dados apresentados pelo fabricante. Nos cenários 1 e 2 o consumo previsto pelo MACVetOH foi inferior ao do Ford Escape 3.0l FFV, registando-se a maior variação no caso do cenário 1 (-3,2%). No cenário 3 ocorreu o oposto, ou seja, o consumo dado pelo modelo foi superior ao do consumo dado para o Ford Escape 3.0l FFV (2,1%). Deste modo verificou-se uma boa proximidade do modelo aos dados reais apresentados para o consumo do veículo. Relativamente às emissões de CO₂, verificou-se que os valores apresentados pelo modelo MACVetOH para os três cenários foram inferiores aos indicados pelo fabricante. O cenário 1 foi o que apresentou maior discrepância (-9,4%), o cenário 3, pelo contrário, manteve-se muito próximo do valor indicado pelo fornecedor, com uma diferença de apenas -0,5%.

Quanto ao veículo Ford Fiesta 1.25l *Style* 3dr verificou-se, no que respeita ao consumo, que o cenário 2 foi o que apresentou maior proximidade (-1,5%) do valor avançado pelo fabricante. O cenário que apresentou maior variação relativamente ao valor de referência foi o cenário 3 (-5,9%), sendo, ainda assim, um valor aceitável devido à baixa percentagem de variação. Quanto às emissões de CO₂, verificou-se que o valor apresentado pelo modelo MACVetOH para os três cenários foi superior ao indicado pelo fabricante. O cenário 1 foi o que apresentou maior discrepância (14,1%), enquanto o cenário 3 se manteve muito próximo do valor indicado pelo fornecedor, com uma diferença de apenas 0,9%.

Tendo em conta que os fabricantes não referem a velocidade do teste, os resultados consideram-se aceitáveis pois não diferem muito dos valores indicados pelo fornecedor. Assim pela análise dos resultados de calibração apresentados anteriormente, verificou-se que o modelo MACVetOH apresenta resultados coerentes comparativamente com os dados de consumos de veículos ICE E10 e FFV E85.

7.2. Avaliação de Ciclo de Vida do Bioetanol.

Nesta secção realizou-se uma avaliação de ciclo de vida do bioetanol WTP e WTW. Nestas análises incluiu-se a produção do bioetanol por trigo, árvores, gramíneas, resíduos florestais e beterraba sacarina. Para efetuar o estudo considerou-se uma viagem com origem no oceanário de Lisboa e com destino na Universidade de Aveiro O percurso, segundo o *Google maps*, possui uma distância total de 248 km, sendo 93,4% do percurso realizado em autoestrada e os restantes 6,6% em zona urbana. A velocidade média da viagem a simular (105 km/h) corresponde assim a uma ponderação entre o percurso

efetuado em autoestrada e em zona urbana. No caso da análise WTW considerou-se um veículo ligeiro de passageiros, descrito posteriormente.

De seguida serão explicados os pressupostos para as análises de ciclo de vida do bioetanol efetuadas. Antes disso, resta salientar que o transporte de matérias-primas / combustíveis se efetua por veículos pesados de mercadorias de norma EURO IV e com uma tara entre 28t e 32t, circulando estes a uma velocidade média de 50 km/h, sendo que na viagem de ida o fator de carga é 100% e na de retorno é 0%. Os petroleiros e os navios de transporte de combustíveis e matérias-primas efetuam a viagem de ida com um fator de carga de 80%, sendo que na viagem de retorno o fator de carga é de 60%. De salientar ainda que a velocidade média dos petroleiros é de 30 km/h e dos navios é de 8 km/h. Estes dados foram inseridos na folha de cálculo “Dados de Entrada” no ponto 4.

Relativamente à extração de crude e produção de combustíveis derivados do crude mantiveram-se os pressupostos apresentados na folha de cálculo “Petróleo”. O mesmo acontece no caso da extração e processamento do GN e Carvão, cujos pressupostos se encontram nas folhas de cálculo “Gás Natural” e “Carvão”.

No caso da eletricidade os dados apresentados na secção “Eletricidade” correspondem ao sistema electroprodutor de Portugal. Sendo assim os valores apresentados foram mantidos na análise efetuada. Os consumos energéticos e fatores de emissão associados à produção de eletricidade incluindo a produção dos painéis fotovoltaicos e das torres eólicas encontram-se também presentes na secção “Eletricidade”.

Na folha de cálculo “Químicos” foram mantidos os dados apresentados na respetiva secção.

Contudo, na folha de cálculo “Transporte”, para além dos dados referidos na respetiva secção, foi necessário equacionar o local de importação de cada combustível e matéria-prima, o que será descrito de seguida com indicação das respetivas distâncias. No entanto, antes disso foi necessário definir o local de produção do bioetanol, bem como das matérias-primas para a produção do mesmo. Sendo assim considerou-se que as plantas de produção de bioetanol se encontram hipoteticamente na refinaria de Sines, e as matérias-primas utilizadas para a produção do bioetanol (trigo, árvores, gramíneas, resíduos florestais e beterraba sacarina) são produzidas no perímetro de rega do Alqueva. Considerou-se ainda necessária a importação de bioetanol dos Estados Unidos da América de forma a suprir as necessidades em Portugal.

O transporte em gasoduto com exceção do GN foi considerado em 147 km, uma vez que é o único gasoduto multiproduto existente em Portugal e liga Sines a Aveiras [69]. A importação de GN por Portugal é efetuada essencialmente da Argélia e da Nigéria [70]. Em Portugal a extensão de gasoduto a GN é de 1441 km [71]. A extensão do gasoduto de transporte de GN no exterior de Portugal é apresentada no quadro seguinte.

Quadro 41 - Extensão do gasoduto a GN no exterior de Portugal desde a Argélia [72].

	Extensão [Km]
Argélia (desde Sonatrach)	530
Marrocos	525
Estreito de Gibraltar	45
Espanha	513

Deste modo, a distribuição de GN em Portugal, considerando a importação da Argélia, é efetuada em gasoduto com extensão de 3054 km.

As importações de petróleo bruto têm origem essencialmente na Arábia Saudita, na Argélia, na Nigéria e na Líbia [70]. Nas simulações efetuadas considerou-se a importação da Arábia Saudita. No caso do carvão, as importações ocorrem essencialmente da Colômbia e da África do Sul [70]. Para efeitos de simulação considerou-se a importação de carvão da Colômbia. No quadro seguinte são apresentadas as distâncias percorridas pelos navios e petroleiros de importação. De salientar que as distâncias mencionadas foram obtidas com recurso ao *software* NETPAS 2.5 [73].

Quadro 42 - Distância e meio de importação do petróleo bruto e do carvão.

	Meio de Transporte	Origem	Distância [km]
Petróleo	Petroleiro	Arábia Saudita	9884
Carvão	Navio	Colômbia	8471

Contudo a produção de derivados do crude por parte da Galp, não é suficiente para suprir as necessidades em Portugal. Deste modo existe a necessidade de recorrer à importação de derivados do crude, como o caso da gasolina, do gasóleo, do GPL, bem como do bioetanol. As importações são efetuadas dos Estados Unidos da América através de petroleiro, sendo que o refinado com maior necessidade de importação é a gasolina [74]. Segundo o *software* NETPAS 2.5 [73] o porto de Houston (EUA) dista de 8467 km do porto petrolífero de Sines.

Para o transporte de fertilizantes, tomou-se como referência a empresa “Deiba”. A empresa que comercializa fertilizantes localiza-se junto ao porto de Setúbal e efetua importações dos maiores exportadores mundiais de fertilizantes [75]. Deste modo, com recurso ao “FAOSAT” procuraram-se os países que exportam em maior quantidade cada um dos fertilizantes, herbicidas e inseticidas [76]. Os países dos quais ocorrem a importação encontram-se descritos no Quadro 43. Nesse quadro é descrita também a distância que o navio de transporte percorre até ao porto de Setúbal, valores obtidos por recurso ao *software* NETPAS 2.5 [73].

Posteriormente, o restante transporte dos fertilizantes, herbicidas e inseticidas efetua-se por camião. O transporte é efetuado num percurso de 158 km, uma vez que é a distância que liga Setúbal ao perímetro de rega do Alqueva, de acordo com o *Google maps*. As matérias-primas utilizadas para a produção de bioetanol serão depois transportadas num percurso de

154 km, correspondente à ligação do perímetro de rega do Alqueva e a refinaria de Sines. Os restantes combustíveis e matérias-primas transportados por camião percorrem 160 km. Esta distância corresponde ao percurso que liga a refinaria de Sines e a estação de reabastecimento junto ao Oceanário de Lisboa. A extensão do percurso foi obtida por recurso ao *Google maps*.

Quadro 43 - Locais de importação de fertilizantes, herbicidas e inseticidas [73, 75, 76].

	País de origem	Distância [km]
Amónia	Brasil	9314
Ureia	China	16118
Ácido Nítrico	Rússia	19009
Nitrato de Amónia	Rússia	19009
Ácido sulfúrico	Estados Unidos da América	8467
Rocha fosfórica	Brasil	9314
Ácido fosfórico	Estados Unidos da América	8467
K₂O	Canadá	5476
CaCO₃	Malásia	13016
Herbicidas	França	1704
Inseticidas	Estados Unidos da América	8467

Análise WTP

Neste ponto efetuou-se uma análise do consumo energético e das emissões de poluentes (compostos orgânicos voláteis [VOC], CO, PM, NO_x e GEE) desde a produção dos combustíveis até à sua disponibilização no posto de reabastecimento. É de salientar que os resultados obtidos nesta secção foram obtidos relativamente ao PCI dos combustíveis (seleção na folha “Dados de Entrada”). A figura seguinte apresenta o consumo energético total, comparando deste modo, os combustíveis convencionais com os vários tipos de bioetanol considerados.

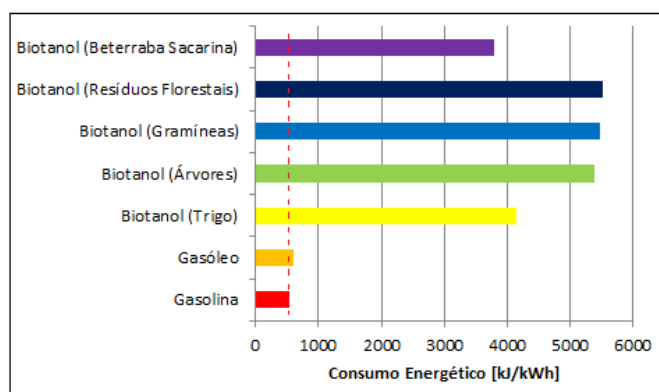


Figura 21 - Comparação dos consumos energéticos totais WTP.

Na Figura 21 pode-se observar a grande diferença entre o consumo energético essencial para a produção e distribuição dos combustíveis convencionais (gasolina e gásóleo) e do bioetanol produzido pelas diversas formas consideradas. A linha tracejada a vermelho representa o consumo energético para a produção e distribuição da gasolina, marcando, desta forma, o cenário de referência. Verificou-se que o bioetanol produzido por resíduos florestais é o que apresenta maior consumo energético total, sendo este cerca de 10,2 vezes superior ao consumo energético requerido para a produção de gasolina. Também o bioetanol produzido a partir de gramíneas e árvores apresenta valores na mesma ordem de grandeza, sendo respetivamente 10,1 e 9,9 vezes o consumo energético da gasolina. Os recursos de biomassa apresentam maior consumo energético, em parte devido a estarem ainda numa fase de desenvolvimento, o que se reflete numa baixa eficiência tecnológica. O bioetanol produzido a partir de trigo apresenta um consumo energético total cerca de 7,6 vezes o consumo da gasolina. O bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina é o que apresenta menor consumo energético, ainda assim 6,9 vezes superior ao consumo da gasolina. O processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina é o processo que consome menos energia, pois a beterraba sacarina é uma cultura de alto rendimento que produz hidratos de carbono já sob a forma de açúcar, que é facilmente esmagado e amassado durante a fermentação o que torna o processo de produção de bioetanol menos dispendioso energeticamente.

Da análise da Figura 21 retirou-se que todos os tipos de bioetanol exigem maior consumo de energia desde a sua produção à disponibilização no posto de reabastecimento, embora existam algumas diferenças entre as diversas matérias-primas. É de referir que grande parte da energia consumida é referente à produção de bioetanol. Já a produção agrícola representa uma menor parte de energia (grande parte dessa energia resulta do uso de fertilizantes).

Seguidamente procedeu-se a uma análise do consumo de energia fóssil na produção dos combustíveis convencionais e dos vários tipos de bioetanol. A figura seguinte apresenta o consumo de energia fóssil, comparando deste modo, os combustíveis convencionais com os vários tipos de bioetanol considerados.

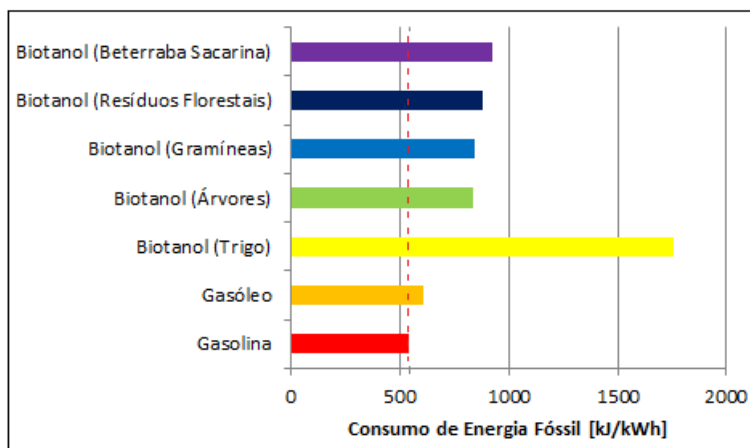


Figura 22 - Comparação dos consumos energia fóssil WTP.

Analisando o consumo de energia fóssil (Figura 22), em vez do consumo de energia total, verificou-se uma grande redução do consumo energético para todas as formas de produção de bioetanol, particularmente para os recursos provenientes de biomassa. Relativamente aos recursos de biomassa, o consumo de energia fóssil corresponde apenas a um valor de 15% a 16% (15,3% para gramíneas, 15,5% para árvores e 15,9% para resíduos florestais) do valor do consumo energético total. No que respeita à beterraba sacarina, o consumo de energia fóssil corresponde a 24,4% do valor do consumo energético total. Já para o trigo, o valor do consumo de energia fóssil é um pouco superior, representando cerca de 42,5% do valor do consumo energético total.

Analisando as Figuras 21 e 22 verificou-se uma grande diferença entre o consumo de energia total e o consumo de energia fóssil de todos os tipos de matérias-primas disponíveis no modelo MACVEtOH para a produção de bioetanol. Esta grande diferença explica-se, em parte, devido ao facto de nos processos de produção de bioetanol serem usados subprodutos para fins energéticos. Relativamente aos recursos de biomassa, os processos de produção de bioetanol usam também a biomassa como fonte de calor para o processo, substituindo assim grande parte os derivados do petróleo. Já para o caso do trigo, os DDGS resultantes do processo de produção de bioetanol podem ser também usados como combustível.

Da análise da Figura 22, observou-se ainda que o bioetanol produzido a partir de trigo é o que apresenta maior consumo de energia fóssil (3,3 vezes o valor da gasolina). O bioetanol produzido a partir de árvores é o que apresenta menor consumo de energia fóssil, contudo, este consumo é cerca de 1,6 vezes o consumo da gasolina.

Na análise da produção dos combustíveis até à sua disponibilização no posto de reabastecimento, pode incluir-se ou não a energia e emissões associadas à produção de equipamentos agrícolas (seleção do utilizador na secção “Dados de Entrada”). De seguida procedeu-se a uma análise da energia associada aos equipamentos agrícolas.

Quadro 44 - Análise da energia associada à produção de equipamentos agrícolas relativamente ao consumo energético total WTP [kJ/kWh].

Inclusão da energia associada à produção de equipamentos agrícolas	Trigo	Árvores	Gramíneas	Resíduos Florestais	Beterraba Sacarina
Não	4145,9	5377,4	5718,8	5523,7	3782,4
Sim	4258,5	5457,1	5798,6	5631,1	3984,3
Δ	2,7%	1,5%	1,4%	1,9%	5,3%

Pela análise do Quadro 44 pode concluir-se que a energia associada à produção de equipamentos agrícolas tem uma pequena influência no que diz respeito ao consumo energético total na produção de bioetanol. A beterraba sacarina foi a matéria-prima que maior variação apresentou relativamente ao cenário em que não se considerou a energia associada à produção de equipamentos agrícolas (5,3%). Em contrapartida, os recursos de biomassa foram os que apresentam menor variação, uma vez que na maioria dos casos se utilizam os mesmos equipamentos que em culturas alimentares. Dos recursos de biomassa, os resíduos florestais foram os que apresentaram maior desvio relativamente ao cenário de não inclusão da energia associada aos equipamentos agrícolas (1,9%). O bioetanol de trigo apresentou uma variação de 2,7%.

De seguida procedeu-se a uma análise dos métodos para estimar os créditos dos coprodutos do bioetanol a partir de trigo. O modelo MACVETOH permite a seleção de três métodos na folha “Dados de Entrada”: método do deslocamento, método baseado na alocação e método baseado no valor de mercado. Analisou-se a influência destes métodos na energia total consumida na produção de bioetanol a partir de trigo. O valor do método do deslocamento serviu como cenário de comparação, uma vez que é o modelo padrão utilizado no modelo GREET.

Quadro 45 - Influência dos métodos para estimar os coprodutos do bioetanol a partir de trigo no consumo energético total WTP.

	Método do Deslocamento	Método Baseado na Alocação	Método Baseado no Valor de Mercado
Energia Total [kJ/kWh]	4145,9	3760,2	3778,1
Δ	-	-9,3%	-8,9%

Observando o Quadro 45, verificou-se que o método do deslocamento é o método que apresenta uma abordagem mais conservadora, uma vez que atribui menos créditos para os produtos coproduzidos, subtraindo assim menos energia à energia total associada à produção do combustível. Assim sendo, o valor de energia total estimado para a produção de bioetanol produzido a partir de trigo é superior quando estimado com o método do deslocamento. O método baseado na alocação e o método baseado no valor de mercado

apresentaram resultados idênticos (-9,3% e -8,9% respectivamente) no que diz respeito à energia total consumida quando comparados com o método do deslocamento.

É de salientar que a maior dificuldade relativamente ao método do deslocamento envolve a determinação, com precisão, dos produtos deslocados e identificação da abordagem para obter a energia do ciclo de vida e as emissões. Além disso, se a quantidade de coprodutos for relativamente grande, quando comparada com a quantidade de produtos primários, podem ser gerados resultados distorcidos para o produto principal. O método da alocação é mais fácil de implementar do que o método do deslocamento. No entanto, pode originar resultados imprecisos se os valores dos produtos e coprodutos não poderem ser medidos numa única base (por exemplo massa ou conteúdo energético).

De seguida, analisaram-se os processos de produção de bioetanol para os tipos de biomassa incluídos no modelo MACVEtOH. O modelo MACVEtOH permite a seleção entre fermentação e gaseificação. No quadro seguinte pode-se comparar os dois processos para os vários tipos de biomassa.

Quadro 46 - Comparação dos processos de produção de bioetanol para os tipos de biomassa incluídos no modelo MACVEtOH.

Consumo Energético Total WTP [kJ/kWh]			
	Árvores	Gramíneas	Resíduos Florestais
Fermentação	5377,4	5484,1	5523,7
Gaseificação	5389,2	5681,5	5523,7
Δ	0,2%	3,6%	0,0%

Através do Quadro 46, verificou-se que o consumo energético total apresenta valores idênticos para os dois processos de produção de bioetanol para os tipos de biomassa incluídos no modelo MACVEtOH. As gramíneas são a matéria-prima que apresenta maior variação comparando os dois processos (3,6%), ainda assim uma variação relativamente pequena. No caso dos resíduos florestais, o valor do consumo energético total chega mesmo a ser igual para os dois processos de produção de bioetanol, não se registando assim qualquer variação. Verificou-se a tendência para um consumo energético superior quando utilizado o processo de gaseificação, como se pode constatar no caso das árvores e gramíneas. Contudo esta tendência não é geral, pois no caso específico dos resíduos florestais os valores de consumo energético registados são iguais para os dois processos.

O modelo MACVEtOH permite também a seleção, por parte do utilizador, da possibilidade de inclusão de exportação de eletricidade no processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina. Desta forma analisou-se a influência da inclusão da exportação de

eletricidade no processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina no consumo energético total (Quadro 47).

Quadro 47 - Análise da inclusão da exportação de eletricidade no processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina.

Inclusão da exportação de eletricidade	Consumo Energético Total WTP [kJ/kWh]
Sim	3782,4
Não	4178,6
Δ	10,5%

Analisando o Quadro 47 concluiu-se que a inclusão da exportação de eletricidade no processo de produção de bioetanol a partir de beterraba sacarina tem uma grande influência no consumo energético total. A não inclusão da exportação de eletricidade leva a um aumento de 10,5% no consumo energético total comparando com o cenário de inclusão da exportação de eletricidade. Esta diferença justifica-se pelo facto de, no cenário de inclusão de exportação de eletricidade, o excesso de energia gerada na produção de bioetanol ser aproveitada e exportada para a rede, o que se reflete numa diminuição do consumo energético. No cenário de não inclusão de exportação de eletricidade, a energia gerada em excesso na produção do bioetanol é desperdiçada, o que leva a um aumento do consumo energético.

De seguida apresentam-se os resultados WTP no que diz respeito às emissões de poluentes. Inicialmente serão apresentados os poluentes locais (VOC, CO, PM e NO_x) e de seguida os GEE para a produção e distribuição de bioetanol até ao posto de reabastecimento. Na figura seguinte pode observar-se os resultados referentes às emissões de VOC para a gasolina, gasóleo e para os vários tipos de bioetanol incluídos no modelo MACVetOH.

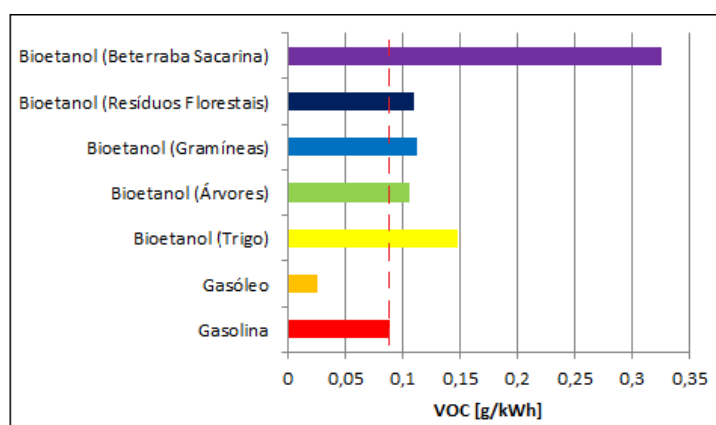


Figura 23 - Comparação das emissões de VOC numa análise WTP.

Verificou-se que todos os tipos de bioetanol incluídos no modelo MACVetOH apresentam maiores emissões de VOC do que a gasolina numa análise WTP. Os recursos de biomassa

são, de entre as matérias-primas utilizadas para a produção de bioetanol, os que apresentam menores emissões de VOC: as árvores e os resíduos florestais apresentam emissões de VOC cerca de 1,2 vezes o valor da gasolina, e as gramíneas 1,3 vezes. O bioetanol produzido a partir de trigo apresenta emissões de VOC cerca de 1,7 vezes o valor da gasolina. A beterraba sacarina revelou ser a pior matéria-prima no que diz respeito às emissões de VOC, pois apresenta emissões de VOC 3,7 vezes do valor verificado para a gasolina.

A produção de bioetanol apresenta maior consumo de energia fóssil que a gasolina, o que leva consequentemente a maiores emissões de VOC, pois esta está associada à combustão incompleta de combustíveis, principalmente na queima de combustíveis derivados de petróleo. Os VOC são basicamente compostos por moléculas de carbono e os principais são aldeídos, cetonas e outros hidrocarbonetos.

Na Figura 24, apresentam-se os resultados relativamente às emissões de CO numa análise WTP para a gasolina, gasóleo e para os vários tipos de bioetanol considerados no modelo MACVetOH.

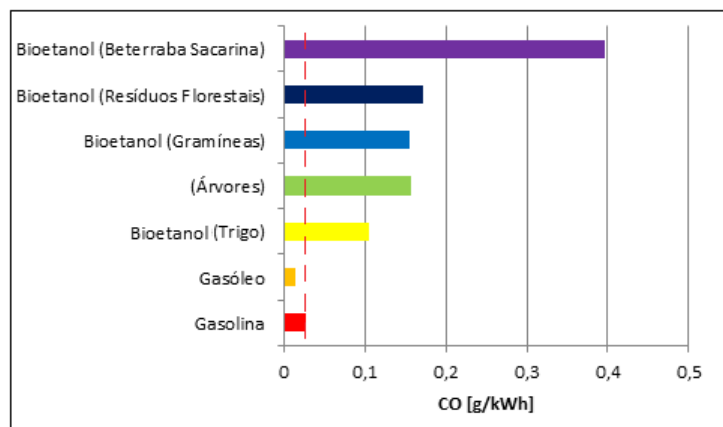


Figura 24 - Comparação das emissões de CO numa análise WTP.

Constatou-se que, na análise WTP, a gasolina emite menos CO que os diferentes tipos de bioetanol considerados no modelo MACVetOH. Das matérias-primas utilizadas para a produção de bioetanol o trigo é o que apresenta menores emissões de CO sendo, ainda assim, 3,2 vezes o valor da gasolina. Os recursos de biomassa têm emissões de CO ligeiramente superiores às do bioetanol de trigo: as gramíneas 4,7 vezes, as árvores 4,8 e os resíduos florestais 5,2. A beterraba sacarina revelou-se, também neste caso, a pior matéria-prima para a produção de bioetanol, no que respeita às emissões de CO, com emissões cerca de 12 vezes as emissões da gasolina.

Na figura seguinte é possível comparar as emissões do poluente local NO_x , para a gasolina, gasóleo e para os vários tipos de bioetanol presente no modelo MACVetOH numa análise WTP.

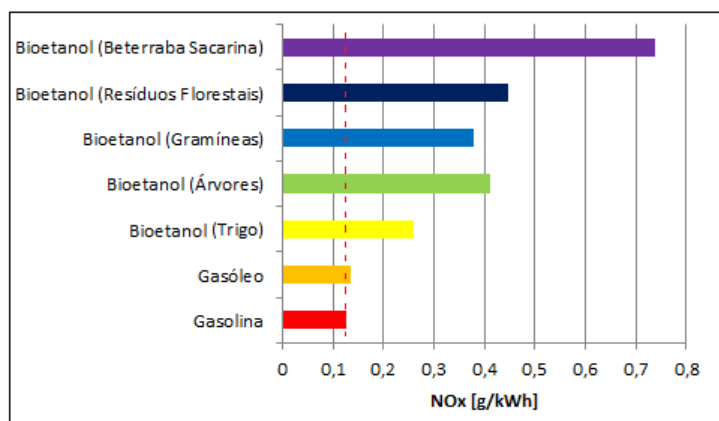


Figura 25 - Comparação das emissões de NO_x numa análise WTP.

Apurou-se que a gasolina, tal como acontece para os poluentes locais VOC e CO, é o combustível com menos emissões de NO_x por unidade de energia disponível, ou seja, todas as formas de produção de bioetanol estudadas implicam emissões superiores deste poluente local do que a gasolina. O bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina é o que apresenta maiores emissões deste poluente, sendo estas 5,8 vezes o valor das emissões da gasolina. A produção de bioetanol a partir de trigo é o que apresenta menores emissões de NO_x , ainda assim, os valores apresentados são cerca de 2,1 vezes as emissões da gasolina. Para os recursos de biomassa verificou-se as seguintes emissões de NO_x : cerca de 3,5 vezes as emissões da gasolina para os resíduos florestais, cerca de 3,3 vezes para as árvores e cerca de 3 vezes para as gramíneas.

O NO_x tem como principais fontes a combustão a altas temperaturas de gás natural e a combustão de carvão que é um combustível com alto teor de azoto. Desta forma, como a produção de bioetanol envolve maiores consumos de energia fóssil que a gasolina, também as emissões de NO_x são superiores às da gasolina.

Seguidamente analisaram-se as PM (Figura 26), comparando as suas emissões, numa análise WTP, para a gasolina, gasóleo e para os vários tipos de bioetanol considerados no modelo MACVetOH.

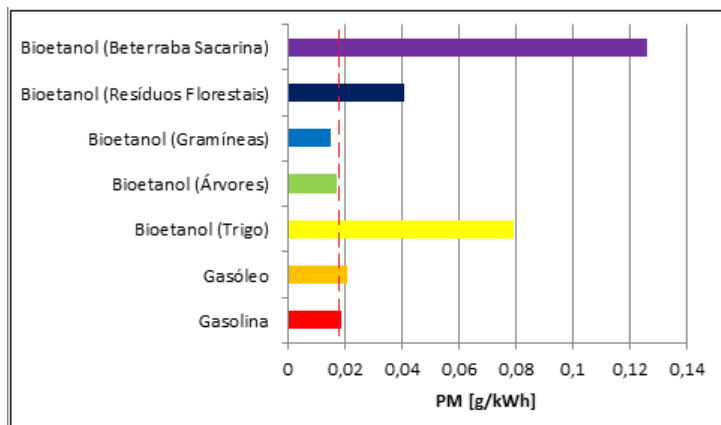


Figura 26 - Comparação das emissões de PM numa análise WTP.

Nesta análise encontrou-se uma diferença relativamente aos poluentes locais já analisados, pois a gasolina não é, dos combustíveis considerados, a que apresenta menores emissões mas sim o bioetanol produzido a partir de gramíneas (cerca de 0,8 vezes o valor da gasolina). Também o bioetanol produzido a partir de árvores apresenta emissões de PM inferiores às da gasolina (cerca de 0,9 vezes). Dos recursos de biomassa, os resíduos florestais são a matéria-prima que leva a maiores emissões de PM na produção de bioetanol (2,2 vezes o valor da gasolina). O bioetanol produzido a partir de trigo apresenta emissões de PM 4,2 vezes superior às emissões da gasolina. A beterraba sacarina é das matérias-primas consideradas no modelo MACVEtOH para produção de bioetanol, a que apresenta maiores emissões de PM (6,6 vezes o valor da gasolina).

As emissões de PM são mais relevantes principalmente na combustão de gasóleo e carvão, o que explica as maiores emissões do bioetanol relativamente à gasolina, pois os processos de produção de bioetanol envolvem mais energia fóssil que a gasolina. No entanto, as gramíneas e as árvores chegam mesmo a apresentar emissões de PM inferiores às registadas para a gasolina, pois envolvem menos energia fóssil nos processos de produção de bioetanol que as restantes matérias-primas analisadas (utiliza-se biomassa na produção de calor, substituindo desta forma grande parte dos derivados do petróleo).

De seguida analisaram-se os poluentes globais, recorrendo-se a uma análise de GEE uma vez que, para além do CO₂, são abrangidos outros poluentes globais como o CH₄ e o N₂O, de acordo com o potencial de aquecimento global referido no Quadro 10. A Figura 27 compara as emissões de GEE, numa análise WTP, para os seguintes combustíveis: gasolina, gasóleo e os vários tipos de bioetanol considerados no modelo MACVEtOH.

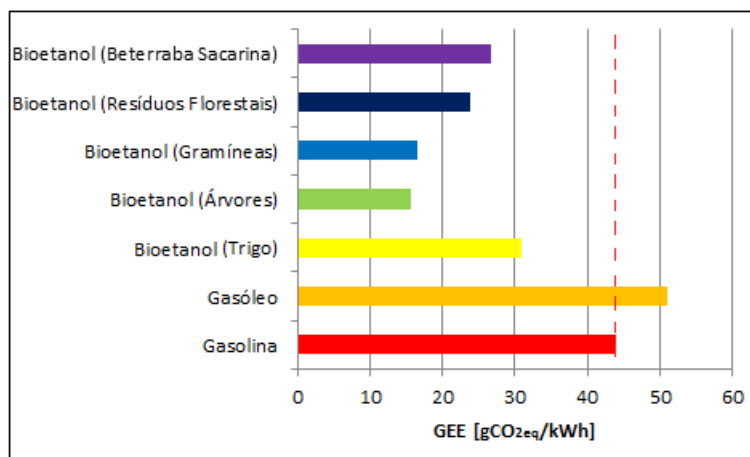


Figura 27 - Comparação das emissões de GEE numa análise WTP.

Dos combustíveis analisados, o gasóleo é o que apresenta maiores emissões de GEE por unidade de energia disponível na estação de reabastecimento (51 gCO₂eq./kWh), sendo que a gasolina apresenta um valor próximo do gasóleo (44 gCO₂eq./kWh). Todos os tipos de bioetanol considerados no modelo MACVetOH apresentam menores emissões de GEE que a gasolina com valores que variam entre os 15 gCO₂eq./kWh, no caso de serem utilizadas árvores como matéria-prima e os 31 gCO₂eq./kWh no caso da utilização do trigo.

Verificou-se que o bioetanol apresenta menores emissões de GEE que a gasolina. O bioetanol produzido a partir de recursos de biomassa é o que apresenta maior redução das emissões de GEE. Dos recursos de biomassa, as árvores são a matéria-prima estudada a que apresenta menores emissões de GEE (cerca de 0,35 vezes o valor da gasolina), seguido das gramíneas (cerca de 0,37 vezes) e dos resíduos florestais (cerca de 0,54 vezes). O bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina apresenta emissões de GEE cerca de 0,6 vezes o valor de referência. O trigo é das matérias-primas consideradas a que mais GEE emite. Contudo o bioetanol de trigo apresenta ainda uma considerável redução de GEE relativamente à gasolina (cerca de 0,7 vezes o valor da gasolina).

As culturas a partir das quais se produz o bioetanol dependem tradicionalmente de "culturas alimentares", normalmente produzidas através de agricultura intensiva, que é responsável por uma grande parte das emissões de GEE provenientes destas vias. Há essencialmente duas fontes: produção de fertilizantes à base de azoto e emissões de N₂O a partir do campo. Devido ao elevado potencial de aquecimento deste gás (298 vezes o do CO₂), as emissões, ainda que relativamente pequenas, podem ter um impacto significativo no equilíbrio global de GEE. As emissões de N₂O provenientes da fase de agricultura revelam-se assim um fator relevante nas emissões de GEE.

Os resultados obtidos para as emissões de GEE podem então ser explicados pelas razões apresentadas acima, pois a produção de trigo requer mais azoto que a beterraba sacarina resultando em maiores emissões de campo. Os recursos de biomassa requerem ainda menos azoto que a beterraba sacarina.

Os recursos de biomassa utilizados para a produção de biomassa produzem um balanço muito favorável de GEE, também devido à menor energia fóssil envolvida no processo.

De seguida efetuou-se um breve resumo da análise WTP do bioetanol comparativamente com a gasolina. O quadro seguinte demonstra de forma qualitativa a análise efetuada.

Quadro 48 - Resumo da análise WTP do bioetanol relativamente à gasolina.

	Bioetanol (Trigo)	Bioetanol (Árvores)	Bioetanol (Gramíneas)	Bioetanol (Resíduos Florestais)	Bioetanol (Beterraba Sacarina)
Consumo Energético	⊖	⊖	⊖	X	***
VOC	⊖	***	⊖	⊖	X
CO	***	⊖	⊖	⊖	X
NO_x	***	⊖	⊖	⊖	X
PM	⊖	☺	*****	⊖	X
GEE	*	*****	☺	☺	☺

***** – Melhor de todos;

☺ – Melhor que a gasolina;

* – Pior processo de produção de bioetanol (mas melhor que a gasolina);

*** – Pior que a gasolina, mas melhor de todos os tipos de bioetanol;

⊖ – Pior que a gasolina, mas entre o melhor e o pior dos tipos de bioetanol;

X – Pior de todos (inclusive que a gasolina).

Pela análise do Quadro 48 verificou-se que, em geral, a produção e distribuição de bioetanol até ao posto de reabastecimento apresenta piores resultados, em termos de consumos energéticos e emissões de poluentes locais, que o combustível em comparação – a gasolina. Apenas no caso particular de PM se verificou que o bioetanol produzido a partir de gramíneas e árvores apresenta emissões ligeiramente inferiores às da gasolina.

O bioetanol produzido a partir de resíduos florestais apresentou o pior resultado no que respeita ao consumo energético, enquanto o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina apresentou o resultado mais favorável, ainda assim consideravelmente superior ao da gasolina.

Relativamente aos poluentes locais, verificou-se que o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina é o que apresenta resultados mais desfavoráveis para todos os poluentes analisados. De entre os vários tipos de bioetanol analisados, o produzido a partir de árvores foi o que apresentou resultados mais favoráveis no que respeita às emissões do poluente local VOC enquanto o bioetanol produzido a partir de trigo apresentou os resultados mais favoráveis para as emissões de CO e NO_x (ainda assim superiores às emissões da gasolina). Relativamente às emissões de PM, o bioetanol produzido a partir de gramíneas é o combustível que menores emissões apresenta, incluindo a gasolina.

Relativamente às emissões de GEE verificou-se que todos os tipos de bioetanol considerados no modelo MACVEtOH apresentam emissões inferiores às da gasolina, sendo o produzido a partir de beterraba sacarina o que apresenta valores mais baixos, e o produzido a partir de trigo os valores mais altos.

Após a análise do bioetanol enquanto combustível disponível no posto de reabastecimento, efetuou-se uma análise aplicando o bioetanol ao setor dos transportes, ou seja, uma análise WTW.

Análise WTW

Nesta análise será acrescentada a fase de utilização do combustível no setor dos transportes (ou seja, a fase PTW) à análise WTP. Para além das considerações tomadas para a análise WTP, considerou-se que o combustível é utilizado num veículo de ligeiros no referido percurso do oceanário (Lisboa) à Universidade de Aveiro. O veículo ligeiro, de norma EURO IV, possui uma cilindrada entre 1,4l e os 2,0l. A velocidade média, como referido anteriormente, é igual para todos os cenários (105 km/h). Compararam-se os consumos energéticos e emissões WTW de um veículo ICE a gasolina com os de veículos a bioetanol. Analisaram-se dois veículos a bioetanol diferentes (um veículo ICE a gasolina com baixo teor de bioetanol [E10] e um veículo FFV E85) de forma a verificar a variação de consumo energético e emissões dentro dos próprios veículos a bioetanol.

Inicialmente abordou-se a análise em termos de consumos energéticos e posteriormente em termos de emissões de poluentes locais e de GEE. Na Figura 28 encontram-se os consumos energéticos totais WTW dos veículos considerados. A linha tracejada a vermelho representa o veículo referente ao cenário base, ou seja, o veículo ICE a gasolina.

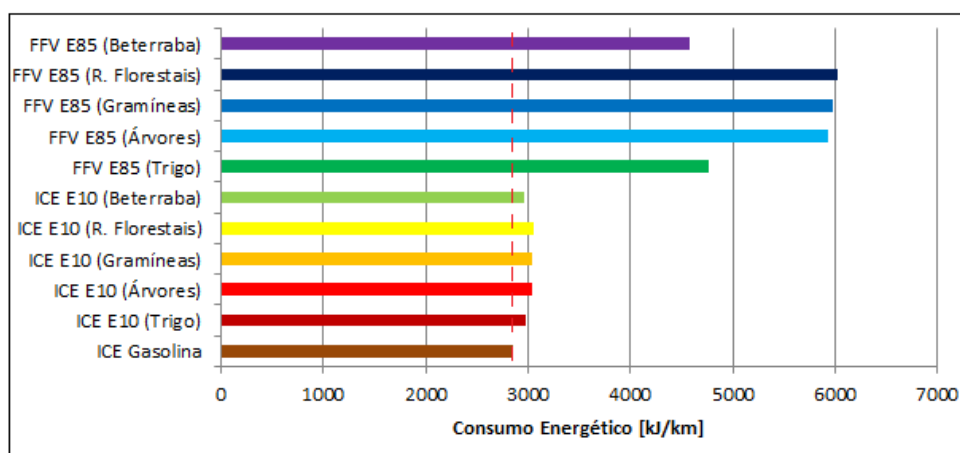


Figura 28 – Comparação dos consumos energéticos numa análise WTW.

Analisando estes resultados, constatou-se que o veículo ICE a gasolina é o que apresenta menor consumo energético por quilómetro percorrido (2859 kJ/km), apresentando o

veículo ICE E10 resultados praticamente iguais (entre 1,04 vezes e 1,06 vezes o do veículo de referência) e que variam consoante a matéria-prima utilizada para a produção de bioetanol, sendo a beterraba sacarina a que apresenta melhores resultados ao nível do consumo energético por quilómetro e os recursos de biomassa os que se revelam como o pior cenário. O veículo ICE E10 apresenta um consumo energético por quilómetro ligeiramente superior ao veículo ICE a gasolina, pois usa uma mistura com cerca de 90% de gasolina e 10% de bioetanol, e o bioetanol apresenta um consumo energético superior ao da gasolina na fase de produção. Como o veículo ICE E10 usa apenas 10% de bioetanol, o seu consumo energético por quilómetro apenas é superior ao do veículo de referência por uma pequena margem.

Relativamente ao veículo FFV E85, os consumos apresentados são consideravelmente superiores ao do veículo ICE a gasolina, variando estes de 1,6 a 2,1 vezes o valor do veículo de referência. Isto verifica-se, pois o veículo FFV E85 usa uma mistura de 85% de bioetanol e 15% de gasolina, e como mencionado anteriormente o bioetanol apresenta um consumo energético superior ao da gasolina na fase de produção. A percentagem de bioetanol na mistura do veículo é muito superior à percentagem de gasolina, o que leva a um consumo energético consideravelmente superior ao do veículo ICE a gasolina. De entre as matérias-primas utilizadas para a produção de bioetanol, a beterraba sacarina é, de novo, a que apresenta o melhor cenário no que respeita ao consumo energético por quilómetro, ainda assim com um consumo 1,6 vezes o do veículo ICE a gasolina. Com a produção de bioetanol a partir de trigo obtém-se um consumo energético ligeiramente superior (1,7 vezes o do veículo ICE a gasolina) e se o bioetanol tiver origem nos recursos de biomassa esse consumo aumenta para 2,1 vezes o consumo do veículo de referência.

De entre as diferentes fontes de bioetanol analisadas, verificou-se tanto para o veículo ICE E10 como para o veículo FFV E85 que a beterraba sacarina é a que leva a um consumo energético mais baixo, o que pode ser explicado pelo facto da beterraba sacarina ser uma cultura de alto rendimento que produz hidratos de carbono já sob a forma de açúcar, que é facilmente esmagado e amassado durante a fermentação o que torna o processo de produção de bioetanol menos dispendioso energeticamente. Por outro lado, os recursos de biomassa revelam-se como a fonte de bioetanol que leva a um maior consumo energético, pois as tecnologias de produção utilizadas na produção de bioetanol a partir destes recursos ainda se encontram numa fase de desenvolvimento, o que se reflete numa baixa eficiência tecnológica, levando desta forma a maiores consumos energéticos.

Desta forma retirou-se que, ao nível do consumo energético por quilómetro percorrido, os veículos que funcionam a bioetanol apresentam piores resultados que os veículos movidos a gasolina.

Seguidamente procedeu-se à análise do consumo de energia fóssil para os mesmos veículos. Os resultados podem ser visualizados na figura seguinte.

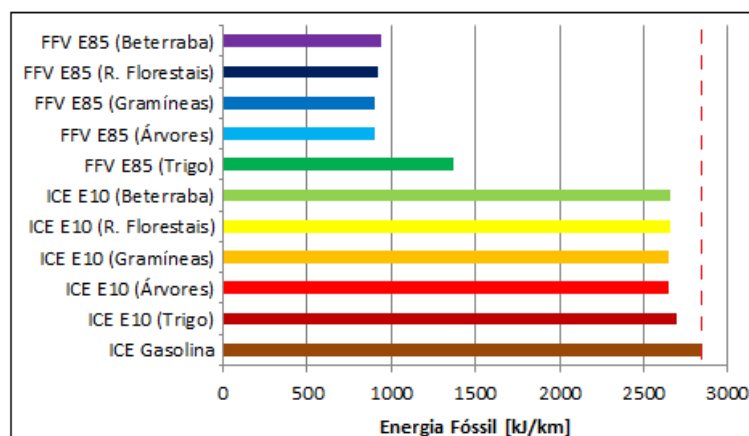


Figura 29 - Comparação dos consumos de energia fóssil numa análise WTW.

Relativamente ao consumo de energia fóssil por quilómetro percorrido, ao contrário do consumo energético total, verificou-se que o veículo ICE a gasolina é o que apresenta piores resultados, com um consumo de energia fóssil de 2849 kJ/km.

O veículo ICE E10 apresenta resultados ligeiramente inferiores aos do veículo ICE a gasolina, dependendo o valor obtido da matéria-prima utilizada para a produção de bioetanol, sendo os recursos de biomassa os que levam a melhores resultados, com um consumo de cerca de 0,93 vezes o consumo do veículo ICE a gasolina; a beterraba sacarina apresenta resultados idênticos aos recursos de biomassa e o trigo revela-se como o pior cenário, com um consumo de 0,95 vezes o consumo do veículo ICE a gasolina. Apesar de o bioetanol apresentar maior consumo de energia fóssil que a gasolina na fase de produção, o veículo ICE E10 apresenta na análise WTW menor consumo de energia fóssil que o veículo ICE a gasolina. Estes resultados estão associados ao elevado consumo do veículo ICE a gasolina na fase de operação. Contudo, como o veículo ICE E10 usa uma mistura com apenas 10% de bioetanol, a diferença no consumo de energia fóssil por quilómetro para o veículo ICE a gasolina é mínima (varia entre 0,93 e 0,95 vezes o valor do veículo de referência).

O veículo FFV E85 é claramente, no que diz respeito ao consumo de energia fóssil por quilómetro percorrido, o que apresenta melhores resultados. De entre as várias fontes de bioetanol, os recursos de biomassa são os que levam a resultados mais favoráveis com um consumo de energia fóssil de cerca de 0,32 vezes o valor do veículo ICE a gasolina, o que se aplica aos três tipos de biomassa estudados. Para o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina, o consumo energético é ligeiramente superior, cerca de 0,33 vezes o valor do veículo ICE a gasolina e o trigo é, de entre as matérias-primas consideradas, o que apresenta um consumo de energia fóssil maior que, ainda assim, é apenas 0,48 vezes o valor registado para o veículo ICE a gasolina. Como explicado anteriormente, a gasolina

quando aplicada a veículos leva a elevados consumos na fase de operação o que se reflete num maior consumo de energia fóssil do veículo ICE a gasolina numa análise WTW. Como o veículo FFV E85 usa uma mistura com cerca de 85% de bioetanol, a diminuição no consumo de energia fóssil por quilómetro relativamente ao veículo de referência é superior à registada para o veículo ICE E10.

No que respeita às fontes de bioetanol verificou-se que, para os dois veículos a bioetanol analisados, os recursos de biomassa são os que apresentam menor consumo de energia fóssil. Isto pode ser explicado pelo fato de nos processos de produção de bioetanol a partir de biomassa usar-se também a biomassa como fonte de calor para o processo, substituindo assim em grande parte os derivados do petróleo e levando conseqüentemente a menores consumos de energia fóssil. O trigo é das matérias-primas utilizadas na produção de bioetanol a que leva a maior consumo de energia fóssil, pois os processos de moagem e destilação são processos energeticamente muito dispendiosos.

Verificou-se assim que o bioetanol é uma boa solução no que respeita à substituição de energia fóssil. Os resultados apresentados foram de encontro ao esperado, segundo bibliografia consultada [50 e 77].

De seguida efetuou-se, para os mesmos veículos, uma análise WTW em termos de emissões de poluentes locais (VOC, CO, NO_x e PM). Na Figura 30 são apresentados os resultados obtidos.

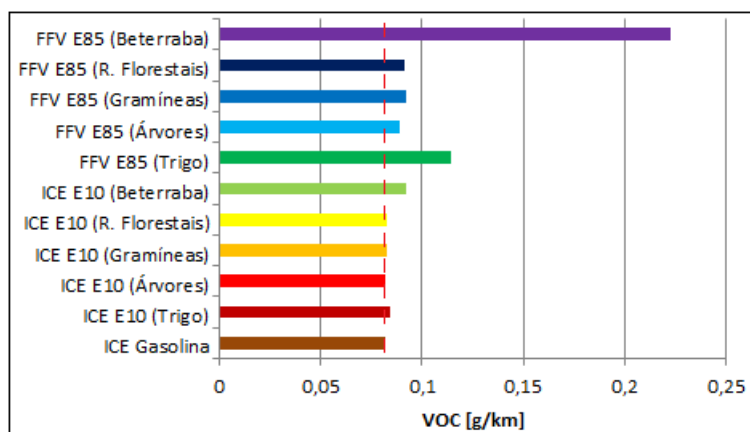


Figura 30 – Comparação das emissões de VOC numa análise WTW.

Verificou-se que o veículo ICE a gasolina apresenta emissões de VOC, por quilómetro percorrido, inferiores aos veículos a bioetanol com um valor de 0,082 g/km.

As emissões de VOC no veículo ICE E10 são muito próximas das registadas para o veículo ICE a gasolina, chegando mesmo a registar-se o mesmo nível de emissões quando o bioetanol é produzido a partir de recursos de biomassa (1,01 vezes as emissões do veículo ICE a gasolina). O bioetanol de trigo leva a emissões também muito idênticas, cerca de

1,02 vezes o do valor registado para o veículo ICE a gasolina. A beterraba sacarina revela-se neste campo o cenário menos favorável, ainda assim apresenta emissões de VOC de apenas 1,12 vezes o valor do veículo de referência

O veículo FFV E85 é o que apresenta emissões de VOC superiores, particularmente para o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina com emissões 2,7 vezes as emissões do veículo ICE a gasolina. Para o bioetanol produzido a partir de trigo registaram-se emissões de VOC de cerca de 1,4 vezes o valor do veículo ICE a gasolina. Os recursos de biomassa revelaram-se, neste caso, o cenário mais favorável, correspondendo a uma emissão de VOC de cerca de 1,1 vezes o valor do veículo padrão.

Os VOC são altamente reativos na atmosfera, e são fontes significativas na formação de ozono ao nível do solo. Relativamente à fase de operação dos veículos, a presença de oxigénio no bioetanol permite uma melhor combustão e conseqüentemente menores emissões de VOC comparativamente com a gasolina (cerca de 7% no caso do veículo ICE E10 e cerca de 30% no caso do veículo FFV E85). Contudo, a principal contribuição para as emissões de VOC reside nas etapas de produção dos combustíveis, onde a produção de bioetanol apresenta maiores níveis de emissões que a gasolina levando conseqüentemente a maiores emissões de VOC, numa análise WTW, dos veículos a bioetanol quando comparados com o veículo de referência. O maior nível de emissões de VOC na produção do bioetanol está diretamente relacionado com o maior consumo de energia fóssil envolvido nos processos de produção de bioetanol.

Posteriormente procedeu-se a uma análise WTW das emissões de CO (Figura 31).

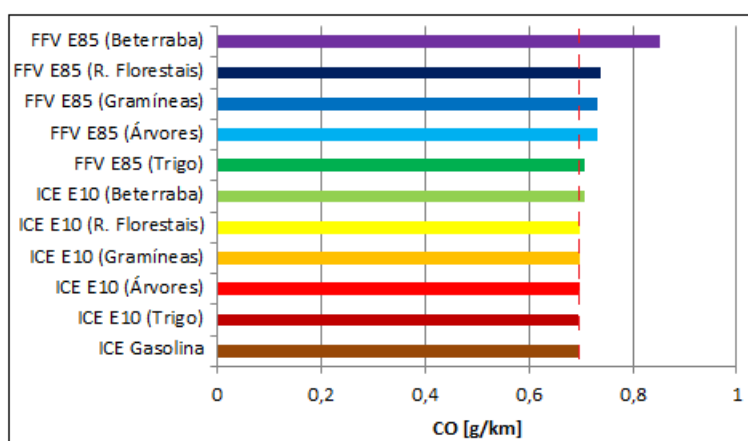


Figura 31 – Comparação das emissões de CO numa análise WTW.

Relativamente às emissões de CO por quilómetro percorrido, tal como nas emissões de VOC, verificou-se que o veículo ICE a gasolina é o que apresenta menor emissão (0,694g/km).

O veículo ICE E10 apresenta valores muito próximos dos registados para o veículo ICE a gasolina. Para o bioetanol produzido a partir do trigo e recursos de biomassa, a diferença é mínima (1,01 vezes o valor do veículo ICE a gasolina). No caso de utilização de bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina, registaram-se emissões de cerca de 1,02 vezes o valor do veículo ICE a gasolina.

O veículo FFV E85 é o que apresenta maiores emissões de CO. Das matérias-primas utilizadas na produção de bioetanol, o trigo é a que leva a resultados mais favoráveis, enquanto a beterraba sacarina é a que leva a emissões superiores. O mesmo veículo apresenta emissões de 1,02 vezes para o bioetanol de trigo; 1,05 para o de gramíneas; 1,06 vezes para o de árvores; 1,07 vezes para o de resíduos florestais e 1,23 vezes para o de beterraba sacarina relativamente às emissões de CO registado para o veículo ICE a gasolina.

Verificou-se uma redução nas emissões de CO na fase de operação dos veículos a bioetanol comparativamente com o veículo de referência (25% a 30%), pois ocorre uma combustão mais completa do combustível. Contudo, na análise WTW, os veículos a bioetanol apresentam maiores emissões por quilómetro percorrido que o veículo a gasolina, pois na fase de produção, o bioetanol apresenta maiores emissões de CO que a gasolina, pois os processos de produção envolvem maior consumo de energia fóssil.

A seguir analisaram-se as emissões de NO_x por quilómetro percorrido, numa análise WTW, para os veículos anteriormente referidos (Figura 32).

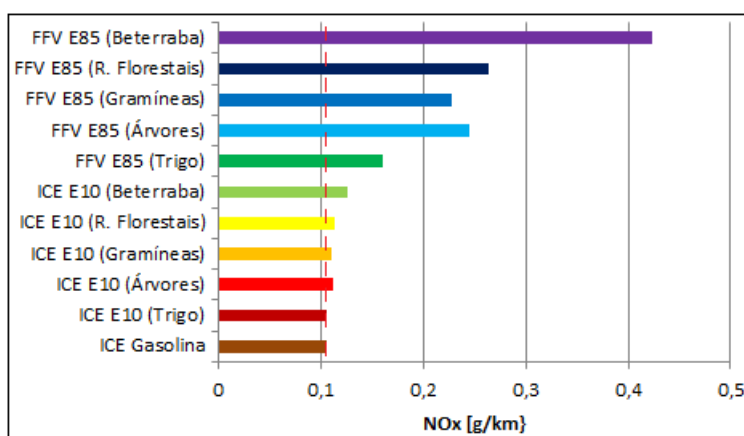


Figura 32 – comparação das emissões de NO_x numa análise WTW.

Verificou-se a mesma tendência dos poluentes locais analisados anteriormente. O veículo ICE a gasolina é o que apresenta menores emissões de NO_x (0,105g/km), enquanto o veículo FFV E85 é o que apresenta os piores resultados.

O veículo ICE E10 apresenta emissões de NO_x idênticas às do veículo ICE a gasolina, contudo ligeiramente superiores. Das matérias-primas utilizadas para a produção de bioetanol, o trigo é a que leva a menores emissões de NO_x, enquanto a beterraba sacarina é a que leva a maiores emissões. Os valores registados pelo veículo ICE E10 comparativamente com os valores do veículo ICE a gasolina por tipo de bioetanol são os seguintes: 1,01 vezes para o trigo, 1,06 vezes para as gramíneas, 1,07 vezes para as árvores, 1,09 vezes para os resíduos florestais e 1,2 vezes para a beterraba sacarina.

O veículo FFV E85 apresenta a mesma tendência ao nível das emissões de NO_x, por tipo de bioetanol utilizado, mas com valores superiores. Registaram-se as seguintes emissões de NO_x por tipo de bioetanol: 1,5 vezes a emissão do veículo ICE a gasolina para o trigo; 2,2 vezes para as gramíneas; 2,3 vezes para as árvores; 2,5 vezes para os resíduos florestais e 4,0 vezes para a beterraba sacarina.

Verificou-se uma pequena diferença na quantidade de NO_x provenientes dos veículos a bioetanol em relação aos veículos com combustíveis convencionais: uma diminuição de cerca de 5% para o veículo ICE E10 e uma redução de cerca de 20% para o veículo FFV E85, na fase de operação dos veículos. Contudo, na análise WTW, verificou-se que os veículos a bioetanol apresentam maiores emissões de NO_x que o veículo de referência, pois a produção de bioetanol envolve maiores consumos de energia fóssil que a gasolina. As maiores emissões de NO_x na produção de bioetanol estão também associadas às culturas utilizadas na produção de bioetanol, que geram um ligeiro aumento de N₂O resultantes do uso de fertilizantes pesados relativamente às culturas comuns.

Posteriormente realizou-se uma análise WTW para as PM, cujos resultados se encontram na figura seguinte.

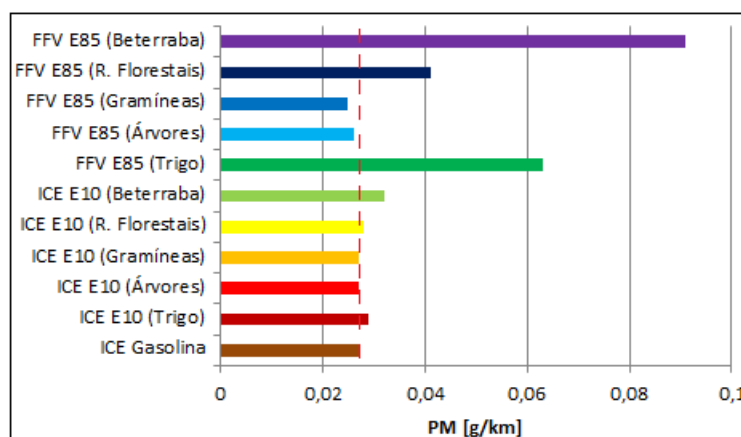


Figura 33 – Comparação das emissões de PM numa análise WTW.

Quanto às emissões de PM verificou-se que os resultados foram um pouco diferentes dos registados para os outros poluentes locais. Neste caso, o veículo FFV E85 demonstrou

melhores resultados do que o veículo ICE a gasolina, quando é utilizado o bioetanol produzido a partir de gramíneas e árvores. Contudo, considerando valores médios, o veículo ICE a gasolina é o que apresenta menores emissões de PM e o veículo FFV E85 é o que apresenta maiores emissões.

Constatou-se que as emissões registadas pelo veículo ICE E10, usando bioetanol produzido a partir de gramíneas e árvores, são iguais às registadas para o veículo ICE a gasolina (0,027g/km). As emissões verificadas para as restantes matérias-primas do bioetanol são as seguintes: 1,04 vezes o valor do veículo ICE a gasolina para o bioetanol produzido a partir de resíduos florestais, 1,07 vezes para o bioetanol produzido a partir de trigo e 1,19 vezes para o de beterraba sacarina.

Quanto ao veículo FFV E85 verificou-se as seguintes emissões de PM por tipo de bioetanol utilizado comparativamente com as emissões do veículo de referência (0,93 vezes para as gramíneas; 0,97 para as árvores; 1,5 vezes para os resíduos florestais; 2,3 vezes para o trigo e 3,4 vezes para o de beterraba sacarina).

O conteúdo de oxigénio presente no bioetanol permite uma melhor combustão e conseqüentemente reduções nos níveis de PM não queimadas emitidas para a atmosfera, na fase de operação do veículo. Contudo, na análise WTW, o bioetanol apresenta no geral maiores emissões de PM que a gasolina face à maior energia fóssil envolvida nos processos de produção quando comparado com a gasolina. No entanto, as gramíneas e as árvores chegam mesmo a apresentar emissões de PM inferiores às registadas para a gasolina, pois envolvem menos energia fóssil nos processos de produção de bioetanol que as restantes matérias-primas analisadas (utiliza-se biomassa na produção de calor, substituindo desta forma grande parte dos derivados do petróleo).

Relativamente às emissões dos poluentes locais analisados os resultados também foram de acordo ao esperado segundo bibliografia consultada [48].

Por fim, realizou-se uma análise WTW para as emissões de GEE (Figura 34).

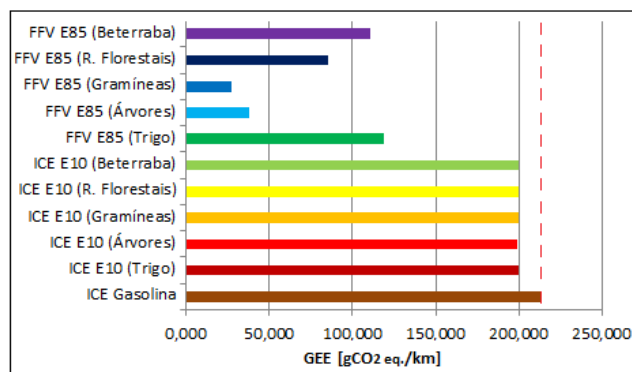


Figura 34 – Comparação das emissões de GEE numa análise WTW.

Dos veículos analisados verificou-se que o veículo ICE a gasolina é o que apresenta maiores emissões de GEE (213,1 gCO₂eq./km).

O veículo ICE E10 apresenta emissões de GEE relativamente inferiores (varia entre 0,936 e 0,938 vezes o valor do veículo de referência) às registradas para o veículo ICE a gasolina. De entre as matérias-primas utilizadas na produção do bioetanol, os recursos de biomassa são as que levam a menores emissões (verificou-se emissões de 0,936 vezes o valor do veículo de referência para o bioetanol de gramíneas; 0,936 para as árvores; e 0,938 para os resíduos florestais). O bioetanol produzido a partir do trigo e beterraba sacarina leva a emissões na mesma ordem de grandeza (0,938 vezes o valor do veículo ICE a gasolina). O bioetanol na fase de produção apresenta emissões de GEE inferiores às registradas para a gasolina, como se constatou na análise WTP. Como o veículo ICE E10 usa uma mistura com apenas 10% de bioetanol, a diferença nas emissões de GEE por quilômetro para o veículo ICE a gasolina é pequena.

O veículo FFV E85 é o que apresenta menores emissões de GEE. Relativamente à matéria-prima utilizada na produção de bioetanol manteve-se a tendência registrada para o veículo ICE E10, isto é, os recursos de biomassa são os que levam a menores emissões de GEE enquanto o trigo é o que leva a emissões superiores. As emissões obtidas para o veículo FFV E85 por tipo de bioetanol produzido foram as seguintes: 0,13 vezes o do veículo de referência quando utilizado bioetanol de gramíneas, 0,18 vezes para o bioetanol de árvores, 0,40 vezes para o de resíduos florestais, 0,52 para o de beterraba sacarina e 0,56 para o de trigo. Como explicado anteriormente a gasolina, na fase de produção, leva a maiores emissões de GEE que os vários tipos de bioetanol. Como o veículo FFV E85 usa uma mistura com cerca de 85% de bioetanol, a diferença na emissão de GEE por quilômetro é superior à registrada para o veículo ICE E10.

As menores emissões de GEE verificadas para o bioetanol produzido a partir de biomassa (gramíneas, árvores e resíduos florestais) podem ser explicadas pela menor energia fóssil envolvida no processo, pois parte da biomassa é também usada como combustível nos processos de produção de bioetanol. As maiores emissões de GEE para o bioetanol produzido a partir de trigo estão ligadas à maior quantidade de azoto utilizada na fase de agricultura relativamente às outras matérias-primas estudadas para a produção de bioetanol.

Os resultados referentes às emissões de GEE também foram de encontro ao registrado em bibliografia consultada [50].

Numa análise WTP, verificou-se que o bioetanol possui um consumo energético por kWh disponível no posto de reabastecimento consideravelmente superior ao da gasolina. Contudo, após a aplicação em veículos, o bioetanol minimiza esta diferença para a gasolina

devido ao elevado consumo energético do veículo a gasolina na fase de operação (ainda assim verificou-se que os veículos a bioetanol continuam a apresentar um maior consumo energético total que os veículos a gasolina). Já no caso do consumo de energia fóssil verificou-se que, na análise WTP, o bioetanol apresenta consumos superiores aos da gasolina, contudo após a aplicação em veículos o mesmo já não se sucede, apresentado o bioetanol menores consumos de energia fóssil que a gasolina. Novamente, este facto está relacionado com o elevado consumo energético do veículo a gasolina na fase de operação. Na Figura 35 encontra-se ilustrado de forma percentual, o consumo energético total WTW em cada fase, comparando os veículos ICE a gasolina, ICE E10 e FFV E85.

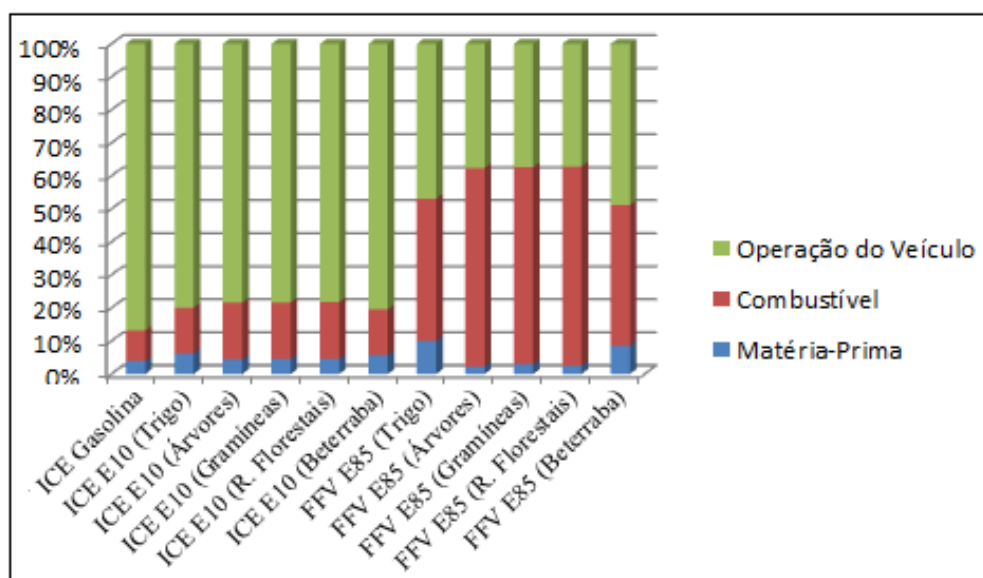


Figura 35 – Distribuição do consumo de energia total WTW nas várias etapas.

Apurou-se que, num veículo ICE a gasolina, 87% do consumo energético corresponde à fase de operação do veículo. Nos veículos a bioetanol analisados, a fase de operação corresponde a aproximadamente 80% do consumo de energia total no caso do ICE E10 e 40% no caso do FFV E85. Estes valores variam um pouco, podendo ser superiores ou inferiores dependendo da matéria-prima usada para a produção de bioetanol. O restante consumo energético é repartido pelas etapas de produção do combustível e da matéria-prima. No veículo a gasolina estas etapas possuem um consumo energético baixo relativamente à fase de operação.

Em relação aos GEE (Figura 36), verificou-se que 86% das emissões totais no veículo ICE a gasolina ocorrem na fase de operação do veículo. Para os veículos a bioetanol em estudo, aproximadamente 85% das emissões totais correspondem à fase de operação, no caso do veículo ICE E10, e 70% no caso do FFV E85. Estes valores variam um pouco consoante a matéria-prima utilizada na produção de bioetanol. As restantes emissões de GEE são repartidas pelas etapas de produção do combustível e da matéria-prima. É também de referir, que na etapa de produção de matéria-prima se verificaram valores negativos para as emissões de GEE no caso do veículo FFV E85 o que pode ser explicado pela alta taxa de

absorção de CO₂ das culturas utilizadas para a produção de bioetanol na fase de agricultura.

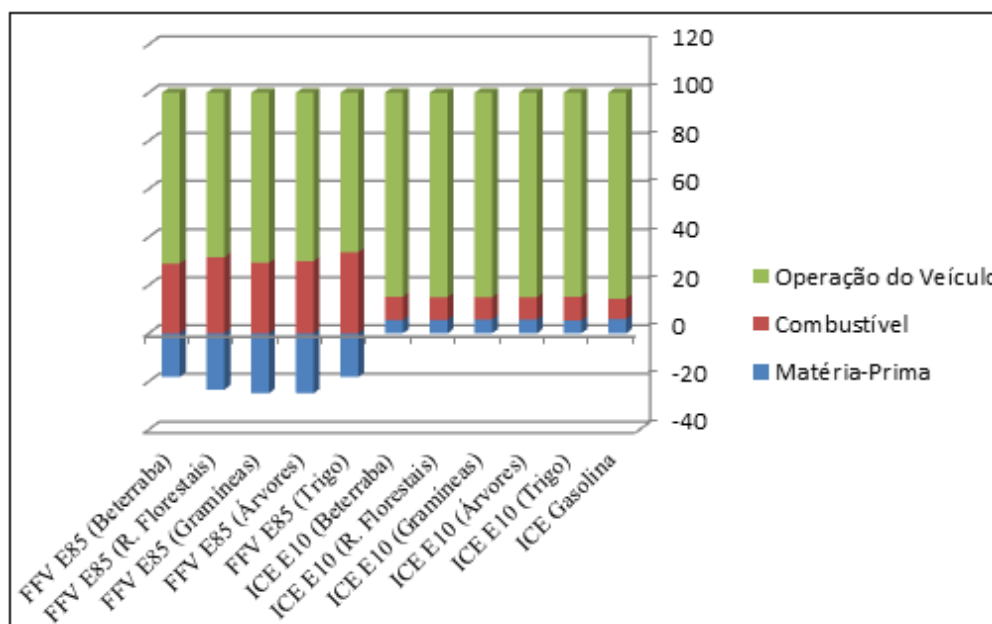


Figura 36 – Distribuição das emissões de GEE WTW nas várias etapas.

No caso do poluente local VOC verificou-se que tanto para o veículo ICE a gasolina, como para os veículos ICE E10 e FFV E85 a maior parte das emissões ocorre nas fases de produção de combustível e operação do veículo. A parte de produção de matéria-prima representa apenas cerca de 10% das emissões totais.

Relativamente ao CO verificou-se, para os três veículos analisados, que as emissões ocorrem quase totalmente na fase de operação do veículo (cerca de 97% para o veículo ICE a gasolina, cerca de 96% para o veículo ICE E10 e cerca de 92% para o FFV E85).

Para o NO_x verificou-se que as emissões ocorrem sobretudo nas fases de produção de matéria-prima e produção de combustível. A operação do veículo representa apenas cerca de 17% do valor total para o veículo ICE a gasolina, 16% para o veículo ICE E10 e 12% para o FFV E85.

No caso das PM verificou-se que para os veículos ICE a gasolina e ICE E10 a maior parte das emissões ocorre na operação do veículo (cerca de 50% do valor total). Contudo para o FFV E85 a maior parte das emissões ocorre na produção do combustível (cerca de 60%).

De seguida apresenta-se um resumo com a mesma codificação descrita na análise WTP. O resumo é apresentado relativamente aos dois veículos a bioetanol estudados, pois apresentam resultados idênticos no que diz respeito ao consumo energético e emissões de poluentes por tipo de bioetanol produzido.

Quadro 49 - Resumo WTW para os veículos a bioetanol comparativamente ao veículo ICE a gasolina.

	Bioetanol (Trigo)	Bioetanol (Árvores)	Bioetanol (Gramíneas)	Bioetanol (Resíduos Florestais)	Bioetanol (Beterraba Sacarina)
Consumo Energético Total	☹	☹	☹	X	***
Energia Fóssil	*	*****	☺	☺	☺
VOC	☹	***	☹	☹	X
CO	***	☹	☹	☹	X
NO_x	***	☹	☹	☹	X
PM	☹	☺	*****	☹	X
GEE	*	☺	*****	☺	☺

***** – Melhor de todos;

☺ – Melhor que o veículo a gasolina;

* – Pior processo de produção de bioetanol (mas melhor que o veículo a gasolina);

*** – Pior que o veículo a gasolina, mas melhor de todos os tipos de bioetanol;

☹ – Pior que o veículo a gasolina, mas entre o melhor e o pior dos tipos de bioetanol;

X – Pior de todos (inclusive que o veículo a gasolina).

Pela análise do Quadro 49 verificou-se que, no geral, os veículos a bioetanol apresentam piores resultados, em termos de consumos energéticos e emissões de poluentes locais, que o veículo ICE a gasolina, não se aplicando apenas no caso particular de PM, pois o bioetanol produzido a partir de gramíneas e árvores apresenta emissões de PM ligeiramente inferiores às da gasolina.

A utilização de bioetanol produzido a partir de resíduos florestais leva ao pior resultado no que respeita ao consumo energético, enquanto que o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina leva ao resultado mais favorável, para ambos os veículos a bioetanol.

Relativamente à energia fóssil verificou-se que o bioetanol é um bom substituto da gasolina, pois tanto o veículo ICE E10 como o veículo FFV E85 apresentam menor consumo de energia fóssil por quilómetro percorrido que o veículo ICE a gasolina. De entre os vários tipos de bioetanol analisados, o produzido a partir de árvores é o que leva a um menor consumo de energia fóssil, enquanto o trigo é o que leva a um maior consumo.

Relativamente aos poluentes locais, verificou-se que o bioetanol produzido a partir de beterraba sacarina é o que leva a resultados mais desfavoráveis para todos os poluentes analisados. De entre os vários tipos de bioetanol analisados, o produzido a partir de árvores é o que leva a resultados mais favoráveis no que respeita às emissões do poluente local VOC enquanto o bioetanol produzido a partir de trigo leva aos resultados mais favoráveis para as emissões de CO e NO_x (ainda assim superiores às emissões da gasolina). Relativamente às emissões de PM, o bioetanol produzido a partir de gramíneas é o que apresenta menores emissões.

Relativamente às emissões de GEE verificou-se que os dois veículos a bioetanol apresentam menores emissões que o veículo ICE a gasolina. De entre os vários tipos de

bioetanol analisados, o produzido a partir de árvores é o que leva a menores emissões de GEE, enquanto que o produzido a partir de trigo é o que leva a maiores emissões, ainda assim inferiores às emissões registradas para o veículo ICE a gasolina.

Comparando os dois veículos a bioetanol analisados, verificou-se que o veículo FFV E85 é mais favorável em termos de energia fóssil e emissões de GEE que o veículo ICE E10. Contudo relativamente ao consumo energético total e emissões de poluentes locais o veículo ICE E10 apresenta resultados mais favoráveis que o FFV E85.

8. Conclusões e Trabalho Futuro

Na presente dissertação foi desenvolvida uma ferramenta numérica de ACV do bioetanol contemplando a realidade europeia, mas baseada no modelo GREET, resultando num novo modelo denominado MACV_{EtOH}. Concluiu-se que o modelo MACV_{EtOH} representa com boa precisão a realidade dos veículos ligeiros de passageiros a bioetanol, pois efetuou-se uma análise para um veículo ICE E10 e para dois veículos FFV E85 de acordo com os dados indicados pelos fabricantes, relativamente ao consumo do veículo e emissões de GEE, diferindo estes pouco (entre 1,1% e 1,5% para os consumos e entre 0,5% e 1,4% para as emissões de GEE) dos valores apresentados pelo modelo MACV_{EtOH} para os cenários mais favoráveis.

Neste trabalho realizou-se uma análise WTP, comparando o bioetanol produzido a partir de cinco matérias-primas diferentes com o combustível convencional gasolina. Realizou-se também uma análise WTW, comparando dois veículos movidos a bioetanol (ICE E10 e FFV E85) com um veículo ICE a gasolina.

Na análise WTP concluiu-se que o bioetanol, independentemente da origem deste, apresenta maior consumo energético total (de 6,9 a 10,2 vezes o consumo da gasolina) e de energia fóssil (1,6 a 3,3 vezes o valor de referência) do que a gasolina. Considerando apenas as emissões locais, concluiu-se que a gasolina é o combustível menos poluente, com exceção nas emissões de PM para as quais é possível obter-se emissões mais reduzidas utilizando bioetanol com origem em gramíneas ou árvores. Contudo, concluiu-se que o bioetanol apresenta emissões de GEE inferiores à gasolina, para todas as matérias-primas estudadas (entre 0,3 a 0,65 vezes o valor da gasolina).

Na análise WTW, relativamente ao consumo energético total por quilómetro percorrido, concluiu-se que o veículo FFV E85 apresenta um consumo energético total superior ao do veículo ICE a gasolina (1,6 a 2,1 vezes relativamente ao consumo do veículo padrão), enquanto o veículo ICE E10 apresenta praticamente o mesmo consumo do veículo a gasolina (1,04 a 1,06 vezes o do veículo de referência). Considerando apenas o bioetanol, o proveniente de resíduos florestais é o que leva a consumos energéticos totais superiores e o de beterraba sacarina é o que leva a consumos mais reduzidos. Quanto ao consumo de energia fóssil por quilómetro percorrido, o veículo FFV E 85 é o que apresenta valores inferiores (0,32 a 0,48 vezes relativamente ao veículo de referência), enquanto o veículo ICE E10 apresenta consumos ligeiramente inferiores ao do veículo a gasolina (0,93 a 0,95 vezes relativamente ao veículo de referência), sendo que o bioetanol de gramíneas, resíduos florestais e árvores são os que consomem menos energia fóssil. Quanto aos poluentes locais concluiu-se que o veículo FFV E85 é o que apresenta maiores emissões enquanto o veículo ICE E10 apresenta emissões praticamente iguais às do veículo ICE a gasolina. O trigo é das fontes de bioetanol a que leva a menores emissões de CO e NO_x, as árvores a que leva a menores emissões de VOC e as gramíneas a que leva a menores

emissões de PM. Ambos os veículos a bioetanol apresentam emissões de GEE inferiores ao veículo a gasolina, sendo o veículo FFV E85 o melhor neste âmbito. De entre as várias fontes de bioetanol, as gramíneas são as que levam a menores emissões de GEE (0,936 vezes para o veículo ICE E10 e 0,13 vezes para o veículo FFV E85 relativamente ao veículo a gasolina) e o trigo a que leva a emissões superiores (0,938 vezes para o veículo ICE E10 e 0,56 vezes para o veículo FFV E85 relativamente ao veículo de referência).

No que respeita aos veículos analisados concluiu-se que o veículo FFV E85 é o melhor no que respeita ao consumo de energia fóssil e emissões de GEE. No que diz respeito ao consumo energético total e emissões de poluentes locais, o veículo ICE a gasolina é o que apresenta melhores resultados.

As principais limitações do trabalho são especificadas de seguida:

- Os dados referentes ao peso relativo das tecnologias de combustão estacionária nos diversos processos de produção apresentam algumas limitações, pois foram mantidos os valores do GREET, não espelhando assim com total precisão os processos aplicados em Portugal / Europa;
- Os dados referentes ao peso relativo de cada um dos combustíveis utilizados na extração ou produção de combustíveis apresentam a mesma limitação referida anteriormente, pois foram mantidos os valores do GREET por falta de dados fidedignos para a realidade Portuguesa / Europeia;
- A base de dados relativa à produção de químicos agrícolas apresenta também algumas limitações, uma vez que foram encontradas muitas dificuldades na obtenção de dados credíveis sobre a sua produção;
- O modelo MACVEtOH não foi calibrado para veículos dedicados e para veículos híbridos elétricos com motor a combustão interna a bioetanol (embora estes veículos existam, são pouco comuns em Portugal e existem poucos dados disponíveis sobre eles, o que dificultou a calibração do modelo para estes mesmos veículos).

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Melhorar a base de dados do MACVEtOH, alterando os dados onde não foi possível a recolha da realidade Portuguesa / Europeia;
- Incluir no modelo uma análise económica, permitindo desta forma comparar não só a diferença em consumos energéticos e emissões de poluentes como em custos;

- Calibrar o modelo MACVEtOH para veículos dedicados e veículos híbridos elétricos com motor a combustão interna a bioetanol;

9. Referências Bibliográficas

1. EEA, *Transport at a crossroads*. European Environment Agency, 2009.
2. EEA, *Term 2008*. European Environment Agency, 2009.
3. EEA, *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2008 – Tracking progress towards Kyoto targets*. European Environment Agency, 2008.
4. GREET, version 1_2011, Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation, 2011.
5. BP, *The global ethanol industry is going through a period of rapid growth*. 2006.
6. ESMAP, *Potential for biofuels for transport in developing countries*. 2005.
7. Hazzel, P. and R.K. Pachauri, *Bioenergy and agriculture: promises and challenges*. International Food Policy Research Institute, 2006.
8. IEA, *Medium term oil market report*. International Energy Agency, 2006.
9. Romm, J., *The car and fuel of the future*. Energy Police, 2006. **34**: p. 2609–2614.
10. WSDA, *Bioenergy: frequent asked questions*. Washington State Department of Agriculture, 2008.
11. Hansen, A.C., Q. Zhang, and P.W.L. Lyne, *Ethanol– diesel fuel blends – a review*. Bioresource Technol, 2005. **96**: p. 277–285.
12. Pimentel, D., *Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts are Negative*. Natural Resources Research, 2003. **12**: p. 127-134.
13. Balat, M., *Global bio-fuel processing and production trends*. Energy Explor Exploit, 2007. **25**: p. 195–218.
14. MacLean, H.L. and L.B. Lave, *Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies*. Progress in Energy and Combustion Science, 2003. **29**: p. 1-69.
15. EUBIA, *Bioethanol*. European Biomass Industry Association, 2007.
16. Balat, M., H. Balat, and C. Oz, *Progress in bioethanol processing*. Progress in Energy and Combustion Science, 2008. **34**: p. 551–573.
17. Oliveira, M.E.D.d., B.E. Vaughan, and E.J.R. Jr., *Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint*. BioScience, 2005. **55**: p. 593–602.
18. Walter, A., et al., *Perspectives on fuel ethanol consumption and trade*. Biomass and Bioenergy, 2008. **32**(8): p. 730-748.
19. REN21, *Renewables - global status report*. Renewable energy policy network for the 21st century, 2010.
20. Brasil, *Balanco Energético Nacional*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2006.
21. RFA, *Renewable Fuels Association*. Statistics data, 2006.

22. RFA, *From niche to nation-ethanol industry outlook 2006*. Renewable Fuels Association, 2006.
23. EIA, *Annual energy outlook*. Energy Information Administration, 2007.
24. DOE, *Biomass multi-year program plan*. US Department of Energy, 2007.
25. Institute, W., *Biofuels for transportation*. Renewable energy policy network for the 21st century, 2006.
26. Macedo, I.d.C., M.R.L.V. Leal, and J.E.A.R.d. Silva, *Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil*. São Paulo: Secretariat of the Environment, 2004.
27. Wang, M., M. Wu, and H. Huo, *Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types*. Environmental Research Letters, 2007. **2**: p. 1–13.
28. Flavell, R., *Biotechnology options for bioenergy crops: prospects for 2nd generation feedstock technologies*. USDA Global Conference on Biofuels, 2007.
29. EBIO, *Bioethanol fuel in numbers*. European Biofuel Association, 2007.
30. USDA, *The economics of bioethanol production in the EU*. Washington: United States Department of Agriculture, 2006.
31. Faaij, A.P.C., *Bio-energy in Europe: changing technology choices*. Energy Policy, 2006. **34**(3): p. 322-342.
32. Piacente, E.A., *Perspective for Brazil in the bio-ethanol international market*. MSc dissertation, State University of Campinas, 2006.
33. DSD., *Feasibility study on an effective and sustainable bioethanol production program by least developed countries as alternative to cane sugar export*. Dutch Sustainable Development Group, 2005.
34. Martinot, E., *Biofuels global market and policy overview*. International Conference on Biofuel, 2006.
35. Zhenhong, Y., *Bio-fuels industry in China: utilization of ethanol and biodiesel today and future*. International Conference on Biofuel, 2006.
36. LIU, D., *Chinese development status of bioethanol and biodiesel*. Department of Chemical Engineering Tsinghua University, 2005.
37. Rosillo-Calle, F. and A. Walter, *Global market for bioethanol: historical trends and future prospects*. Energy for Sustainable Development, 2006. **10**(1): p. 20-32.
38. Beltran, B., *Structural and environmental aspects of bioethanol production in Colombia*. International Sugar Journal, 2007. **109**: p. 5-41.
39. Malça, J. and F. Freire, *Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation*. Energy, 2006. **31**: p. 3362–3380.
40. PETROBRAS, *Oportunidades de Negócio para a PETROBRAS no Mercado Externo de Álcool*. Petróleo Brasileiro SA, 2005.
41. REAADI, *History of Ethanol Production*. Rural Enterprise and Alternative Agricultural Development Initiative, 2002.

42. RFA, *Homegrown for the Homeland Ethanol Industry Outlook*. Renewable Fuel Association, 2005.
43. Rosillo-Calle, F., *Global overview of fuel ethanol*. Industry and Climate Protection, 2002.
44. DOE, *The DOE Bioethanol Pilot Plant*. Department of Energy, 2000.
45. Kim, S. and B.E. Dale, *Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues*. Biomass and Bioenergy, 2004. **26**(4): p. 361-375.
46. Pimentel, D., *Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative*. Natural Resources Research, 2003. **12**(2): p. 127-134.
47. Niven, R.K., *Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005. **9**(6): p. 535-555.
48. von Blottnitz, H. and M.A. Curran, *A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective*. Journal of Cleaner Production, 2007. **15**(7): p. 607-619.
49. Pimentel, D., *The limits of biomass utilization*. Encyclopedia of physical science and technology, 2001(3): p. 159-171.
50. JRC, *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Joint Research Centre, 2007.
51. Cherubini, F. and A. H. Strømman, *Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges*. Bioresource Technology, 2011. **102**: p. 437-451.
52. Shapouri, H., J.A. Duffield, and M. Wang, *The energy balance of corn ethanol: an update*. United States Department of Agriculture (USDA), 2002.
53. Ferreira, J.V.R., *Análise de ciclo de vida dos produtos*,. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.
54. USDOE, *Life-Cycle Thinking for the Oil and Gas Exploration and Production Industry*. U.S. Department of Energy, 2007.
55. USDOE, *GREET*. U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, 2011.
56. Wang, M., *Overview of GREET Model Development at Argonne*. U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, 2007.
57. Jornal Oficial da União Europeia, Directiva 2003/17/CE, Parlamento Europeu, 2003, consultado em Dezembro de 2011.
58. Forster P., Ramaswamy, V., *Climate Change - The Physical Science Basis, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, 1ª ed. Published for the Intergovernmental Panel, 987, 2007.
59. IUPAC, *Periodic Table of the Elements*, International Union of Pure and Applied Chemistry, 2005.
60. GEMIS, version 4.5, Global Emission Model Integrated Systems, 2010, [consultado em Dezembro de 2011]
61. EEA, *Other Mobile Sources & Machinery*, European Environment Agency, Emission Inventory Guidebook, 2007.
62. EC, Well-to-Wheels, European Commission, 2010, [consultado em Dezembro de 2011].

63. IEA, International Energy Agency, 2010, [consultado em Novembro de 2011].
64. U.S. DOE, *Transportation Energy Data Book*, U.S. Department of Energy, Cap.2, 2010.
65. EEA, *Road Transport*, European Environment Agency, Emission Inventory Guidebook, 2007.
66. Buyacar, Ford Focus 1.8 FFV Style 5dr hatchback, 2008, [consultado em setembro de 2012]. Disponível na internet: http://www.buyacar.co.uk/ford_focus_hatchback/car_18_ffv_style_5dr_3251.jhtml.
67. The Oficial U.S. Government Source For Fuel Economy Information, 2010 Ford Escape FWD FFV, 2010, [consultado em setembro de 2012]. Disponível na internet: <http://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=29441&#tab2>.
68. Buyacar, Ford Fiesta 1.25 Style 3dr [Climate] hatchback, 2005, [consultado em Setembro de 2012]. Disponível na internet: http://www.buyacar.co.uk/ford_fiesta_hatchback/car_125_style_3dr_climate_441.jhtml.
69. Galp Energia, Investidor, *Refinação & Distribuição*, 2010, [consultado em Setembro de 2012], Disponível na Internet: <http://www.galpennergia.com>.
70. EC, *Portugal - Folha de dados de diversificação de energias*, European Commission, 2007.
71. DGEG, *Transporte de Gás Natural em Portugal*, Direcção Geral de Energia e Geologia, 2006.
72. Galp Energia, Investidor, Pipelines internacionais, 2010, [consultado em Setembro de 2012], Disponível na Internet: <http://www.galpennergia.com>.
73. NETPAS, version Distance 2.5, Smart Maritime Business, 2010, [consultado em Setembro de 2012], Disponível na Internet: <http://www.netpas.net>.
74. Galp Energia, Investidor, A Galp Energia num relance, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.galpennergia.com>.
75. deiba, Adubos Deiba, Comercialização de Adubos Lda., [consultado em Setembro de 2012], Disponível na Internet: <http://www.adubosdeiba.com>.
76. FAOSAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, [consultado em Setembro de 2012], Disponível na Internet: <http://www.faosat.fao.org>.
77. Rilett, J., *Ethanol Vehicle Fuel: Energy Balance, GHG Reductions, Supply and Economic Overview*, Climate Change Central. 2003.

10. Anexos

Anexo 1 – Descrição do funcionamento do *software* GREET

O *software* GREET [4] é desenvolvido sobre a plataforma Microsoft Excel, o qual é composto por 29 folhas de cálculo com as células codificadas por cores. O modelo apresenta a codificação das células em sete cores, sendo elas o branco, amarelo, cor-de-rosa, verde, azul, cinzento e células com triângulo vermelho no canto superior direito [4].

Células brancas - São essencialmente para cálculos e suposições secundárias.

Células amarelas - Representam pressupostos essenciais para o modelo funcionar (que os utilizadores podem modificar nas suas próprias simulações).

Células cor-de-rosa - São opções fundamentais que os utilizadores podem selecionar no menu (contêm diferentes opções, cabendo ao utilizador selecionar a mais indicada para a sua simulação).

Células verdes - Representam hipóteses de entrada chave baseadas em funções de distribuição de probabilidade.

Células azuis - São previsões assumidas pelo modelo GREET [4] para que as simulações estocásticas possam correr.

Células cinzentas - Correspondem a espaços reservados. Embora as simulações desses espaços sejam concluídas no GREET [4], nenhuma pesquisa foi efetuada para os comprovar.

Células com um triângulo vermelho no canto superior - Possuem comentários de forma a orientar o utilizador do modelo GREET [4].

Seguidamente será apresentado uma breve descrição das folhas de cálculo presentes no modelo GREET [4]:

- **Overview** – Introdução ao modelo, codificações das cores das células, descrição das folhas de cálculo e declaração de direitos de autor.
- **Inputs** – Introdução de dados de entrada pelo utilizador para a simulação correr.
- **EF_TS** – Inclui quadros com os fatores de emissão ao longo dos anos incluindo projeções da evolução dos fatores de emissão para as tecnologias de combustão abrangidas.

- **EF** – Contém fatores de emissão das tecnologias de combustão por tipo de combustível. Esta folha está sujeita às projeções realizadas na folha anterior.
- **Fuel_Specs** – Apresenta as características dos combustíveis e potenciais de aquecimento global de GEE.
- **T&D_Flowcharts** – Contém diagramas relativos ao transporte e distribuição de matérias-primas e combustíveis.
- **T&D** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas ao transporte e distribuição de matérias-primas e combustíveis.
- **Urban_Shares** – Cálculo das frações urbanas das emissões totais de gases poluentes associadas às atividades contempladas na simulação.
- **Fuel_Prod_TS** – Inclui projeções para as suposições paramétricas relativas aos processos de produção de combustíveis. Esta folha interage com as folhas de produção de outros combustíveis.
- **Petroleum** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às atividades de extração e refinamento de petróleo bem como da produção dos combustíveis derivados do petróleo. Esta folha também inclui a produção de aditivos
- **NG** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às atividades de extração de gás natural.
- **Hydrogen** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas à produção de hidrogénio como combustível automóvel.
- **Ag_Inputs** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas à produção agrícola e suas matérias-primas, incluindo fertilizantes, herbicidas, inseticidas e fabricação de máquinas agrícolas.
- **EtOH** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas à produção de etanol através de milho, cana-de-açúcar e biomassa celulósica e produção de butanol a partir do milho.
- **E-D_Additives** – Cálculo do consumo de energia e missões associadas à aditivação de *diesel* com etanol.
- **BD** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas à produção de biodiesel de soja.
- **Coal** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às atividades de mineração do carvão.

- **Uranium** – Cálculo do consumo de energia e emissões associadas às atividades de mineração e produção de combustível urânio.
- **LF_Gas** – Cálculo do consumo e emissões associadas ao aproveitamento do gás metano proveniente de aterros.
- **Electric** – Cálculo do consumo e emissões associadas à produção de energia elétrica.
- **Compression** – Consumo de energia e da eficiência do processo de compressão do gás natural e do hidrogénio.
- **Car_TS** – Projeções para a economia de combustível e taxas de emissão de poluentes associadas ao funcionamento de veículos de passageiros.
- **LDT1_TS** – Projeções para a economia de combustível e taxas de emissão de poluentes associadas ao funcionamento de veículos ligeiros de 1.
- **LDT2_TS** – Projeções para a economia de combustível e taxas de emissão de poluentes associadas ao funcionamento de veículos ligeiros de mercadorias 2.
- **Vehicles** – Cálculo de consumo de energia e emissões associadas ao funcionamento dos veículos.
- **Results** – Resultados da simulação realizada através de análises de WTP ou WTW para diversas combinações de veículos e combustíveis.
- **Dist_Specs** – Especificações detalhadas dos parâmetros de entrada a partir de funções de distribuição.
- **Forecast_Specs** – Informação detalhada relativa às previsões para o desenvolvimento da simulação estocástica.
- **Forecast_Deleted** – Lista de previsões apagadas da folha *Forecast_Specs*.

Anexo 2 - Equações sobre as quais se regem os fatores de emissão e de consumo dos veículos pesados de mercadorias

Quadro A1 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7,5t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	5,07895	0,0505	5,90538	0,35284	1,2267
RT <=7,5t Euro-1	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	2,63943	0,00191	-0,1337	0,0577	
RT <=7,5t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,28251	0,05962	-0,0004		
RT <=7,5t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	1,75313	0,0488	1,40627	0,22705	0,34513
RT <=7,5t Euro-4	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,02862	0,52805	-0,0108	0,48348	0,03642
RT <=7,5t Euro-5	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,02834	0,53402	-0,0007	0,48997	0,03549
RT >7,5-12t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,8864	0,05422	9,12835	0,20833	1,31276
RT >7,5-12t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,26462	0,05477	3,1376	0,22761	0,59083
RT >7,5-12t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	2,47276	0,06589	2,76986	0,28119	0,58818
RT >7,5-12t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,34221	0,05488	2,87353	0,19195	0,56273
RT >7,5-12t Euro-CO	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,4557	-0,0003	-0,0324	0,08358	
RT >7,5-12t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04007	0,36338	3,84683	1,53537	0,01117
RT >12-14t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	7,1706	0,0552	10,426	0,19902	1,46874
RT >12-14t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,54284	0,0558	3,96132	0,22886	0,67178
RT >12-14t Euro-CO	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,12107	0,03531	-0,0002		
RT >12-14t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,57796	0,05765	4,32114	0,19465	0,65083
RT >12-14t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03332	0,38204	4,73828	1,98869	-0,0131
RT >12-14t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03312	0,38988	4,74378	1,98872	-0,0132
RT >14-20t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	9,81719	0,05348	14,5535	0,17944	1,99129
RT >14-20t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,73026	0,05443	5,07901	0,18891	0,90816
RT >14-20t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,39124	0,06067	4,02589	0,22014	0,79598
RT >14-20t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,56864	0,05373	6,3848	0,17066	0,84305
RT >14-20t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,02941	0,60189	4,38449	1,86872	-0,0143
RT >14-20t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,02926	0,61455	4,37288	1,86496	-0,0143
RT >20-26t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	8,56888	0,05895	9,48991	0,22802	1,42704
RT >20-26t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,10475	0,05494	8,21634	0,22211	1,07452
RT >20-26t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,28116	0,06107	5,46936	0,25349	0,95537
RT >20-26t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,06374	0,05531	9,0625	0,19356	1,0146
RT >20-26t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03516	0,79207	3,97207	1,74836	-0,0111
RT >20-26t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03626	0,8069	3,94802	1,73719	-0,0104
RT >26-28t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	7,64914	0,05254	11,3585	0,22163	1,44694
RT >26-28t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	5,66317	0,05196	9,03523	0,22325	1,09749
RT >26-28t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,18646	0,05855	5,69614	0,26177	0,96648
RT >26-28t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	5,37492	0,04924	9,97344	0,18612	1,01956
RT >26-28t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	0,26382	0,03378	0,77672	0,14015	0,06497
RT >26-28t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	0,26899	0,03352	0,79387	0,14036	0,06507
RT >28-32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	8,51605	0,05495	8,77159	0,26401	1,578
RT >28-32t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,25104	0,05378	6,41148	0,24564	1,20869
RT >28-32t Euro-CO	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,09168	0,01827	-0,0001		
RT >28-32t Euro-CO	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,24893	0,0535	5,82256	0,20571	1,14523
RT >28-32t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04045	0,66993	4,0167	1,64275	-0,0086
RT >28-32t Euro-CO	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03942	0,68092	4,04984	1,65043	-0,0089
RT >32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	9,38794	0,05874	12,8881	0,25577	1,60286
RT >32t Euro-1	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,5806	0,05422	9,83422	0,22486	1,21881
RT >32t Euro-2	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,61511	0,06021	6,69628	0,26458	1,1022
RT >32t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,88171	0,05603	9,81591	0,20158	1,16593
RT >32t Euro-4	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04257	0,87357	3,90889	1,72435	-0,0101
RT >32t Euro-5	CO	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04587	0,89064	3,88159	1,71161	-0,0087

Quadro A2 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,03569	0,02849	4,55404	0,14723	0,34408
RT <=7.5t Euro-1	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,64972	0,03936	0,61099	0,18774	0,12544
RT <=7.5t Euro-2	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,41415	0,03804	0,44015	0,18554	0,07651
RT <=7.5t Euro-3	THC	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	1,2483	0,11465	1,03883		
RT <=7.5t Euro-4	THC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))-a)$	21,0762	2,30198	0,00887		
RT <=7.5t Euro-5	THC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))-a)$	20,8929	2,26648	0,00882		
RT >7,5-12t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,9638	0,02755	5,27117	0,12721	0,29753
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,12673	1,9928	3,69961	1,52368	-0,002
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,58542	0,03826	0,93044	0,1248	0,12491
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,05123	1,20898	4,06501	1,63748	-0,0065
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00294	0,07214	3,76397	1,55254	-0,0009
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00354	0,07405	3,64636	1,50572	0,00225
RT >12-14t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,99183	0,03077	6,32561	0,13024	0,42458
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,12122	2,30821	3,88887	1,65952	-0,0089
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,05207	1,59465	3,63577	1,59115	-0,0102
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,07925	1,3534	4,48072	1,86966	-0,0107
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00298	0,07875	4,31421	1,83636	-0,0114
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00294	0,08035	4,32761	1,84209	-0,0119
RT >14-20t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,22508	0,0365	9,02434	0,13857	0,75357
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,20228	3,41299	3,7188	1,61202	-0,006
RT >14-20t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,01147	0,04351	1,77943	0,15314	0,21395
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,10014	2,14541	3,99899	1,72254	-0,0088
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00323	0,12585	3,89855	1,71769	-0,0111
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00323	0,12853	3,88482	1,71369	-0,0112
RT >20-26t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,67866	0,03082	4,8589	0,12283	0,34364
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,18236	5,0723	3,06832	1,44841	-0,0045
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,10417	3,34384	2,87546	1,38764	-0,0038
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,11115	3,04674	3,45368	1,58036	-0,0053
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00411	0,17133	3,49309	1,60665	-0,0071
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00419	0,17439	3,49088	1,60446	-0,007
RT >26-28t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,65924	0,02497	5,10885	0,1238	0,27824
RT >26-28t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,45828	0,03131	4,10391	0,13475	0,33435
RT >26-28t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,95943	0,03019	2,55942	0,13544	0,20122
RT >26-28t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,8184	0,02544	2,81899	0,12906	0,14817
RT >26-28t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04835	0,02915	0,16147	0,13764	0,00806
RT >26-28t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04955	0,02927	0,16446	0,13806	0,00825
RT >28-32t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,40058	8,83578	1,22852	0,8348	0,02123
RT >28-32t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,39006	6,18444	1,57636	0,9135	0,02066
RT >28-32t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,23289	3,65289	1,80793	0,96805	0,01737
RT >28-32t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,05327	2,68125	3,50254	1,49183	-0,0081
RT >28-32t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,06269	0,04	0,10826	0,13515	0,01131
RT >28-32t Euro	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0644	0,04018	0,10969	0,13509	0,01162
RT >32t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,23392	7,06359	2,93541	1,39362	-0,0006
RT >32t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,17269	5,77763	3,03406	1,44228	-0,0054
RT >32t Euro-2	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,09179	3,77586	2,84239	1,37855	-0,0049
RT >32t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,11442	3,36936	3,48362	1,58737	-0,0059
RT >32t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00606	0,18846	3,44543	1,58057	-0,0036
RT >32t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00619	0,19158	3,45924	1,58312	-0,0037

Quadro A3 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de NO_x para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,31327	-0,0231	6,70588	0,06688	2,70589
RT <=7.5t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	8,16597	0,02716	-0,4538	0,06911	
RT <=7.5t Euro-2	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,44038	-0,0161	6,94773	0,08294	1,85299
RT <=7.5t Euro-3	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	40,4812	1,01902	-0,9828		
RT <=7.5t Euro-4	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	17,3497	1,01969	-0,8989		
RT <=7.5t Euro-5	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	13,8773	1,02107	-0,9968		
RT >7,5-12t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	20,4177	0,04627	-0,9784	0,06154	
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	14,3564	0,02141	-0,8568	0,07565	
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	15,8946	0,01587	-0,9857	0,07966	
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	11,9674	0,09591	32,0018	0,41519	3,29935
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	26,3037	1,01497	-0,8441		
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	20,3406	1,01629	-0,9306		
RT >12-14t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	24,0658	0,03565	-1,2165	0,06516	
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	16,4689	0,01487	-0,9857	0,07647	
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	18,383	0,00812	-1,1512	0,08104	
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	9,80994	0,07081	33,3337	0,33879	3,49563
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6,17224	0,0824	43,284	0,58405	2,15636
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,58959	0,07765	19,3887	0,45944	1,266
RT >14-20t 80ties	NOx	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,02254	0,00291	-2E-05		
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,2043	0,07965	33,2222	0,49571	5,11254
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,0165	0,07298	29,1865	0,38627	5,45992
RT >14-20t Euro	NOx	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)-(d*\ln(x))))+(e*x))))$	3,91192	320,177	-1,1798	0,90231	0,02485
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,2094	0,06739	30,9544	0,40283	2,49333
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,3467	0,06496	20,2862	0,37018	1,46306
RT >20-26t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	23,1192	0,06659	52,5959	0,43526	8,21215
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,3563	0,06764	60,5322	0,46978	5,88266
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,9851	0,06386	41,9028	0,37147	6,28129
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,0807	0,05982	46,3436	0,29624	4,89189
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,75702	0,06164	35,3057	0,39462	2,92091
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,74967	0,06102	23,7085	0,37709	1,72448
RT >26-28t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	22,4266	0,06405	60,3414	0,46237	8,55374
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,0983	0,06397	61,805	0,47723	6,09781
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	17,1405	0,06211	43,8877	0,39072	6,45553
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	15,4387	0,06269	48,613	0,31791	4,91261
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,26754	0,0626	41,5792	0,44087	2,97708
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,20452	0,06336	27,9063	0,42219	1,74867
RT >28-32t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	20,9009	0,06465	2003,56	1,10464	9,72859
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,4695	0,06578	89,1268	0,54964	7,04736
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	17,3641	0,06258	66,8659	0,47938	7,41207
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	13,0259	0,05391	41,9952	0,24574	5,48505
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,898	0,05981	29,2828	0,34968	3,4185
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,6655	0,05729	17,3233	0,29059	1,99386
RT >32t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	23,2768	0,06311	148,04	0,59709	9,22383
RT >32t Euro-1	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	17,205	0,0638	63,6241	0,44799	6,71571
RT >32t Euro-2	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	17,9507	0,06035	44,5834	0,35754	7,12354
RT >32t Euro-3	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,8143	0,05725	48,2183	0,28109	5,5666
RT >32t Euro-4	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,0949	0,05825	36,1582	0,37606	3,3388
RT >32t Euro-5	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,91642	0,05753	23,8518	0,35486	1,97296

Quadro A4 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de PM para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,91703	0,05362	1,2436	0,24443	0,22957
RT <=7.5t Euro-1	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,08914	3,64462	-1,4533	0,268	0,05242
RT <=7.5t Euro-2	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	5,84008	0,47161	-0,004		
RT <=7.5t Euro-3	PM	$y=((a+(b*x)))-(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,21102	-0,0001	-0,0094	0,05746	
RT <=7.5t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,02547	0,0377	0,07225	0,16732	0,00573
RT <=7.5t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,02571	0,03753	0,07306	0,16698	0,00574
RT >7,5-12t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,98164	0,05178	1,54093	0,18733	0,21104
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,75654	0,06137	0,52561	0,16212	0,12886
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))-(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,2847	0,00065	-0,0135	0,05414	
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))-(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,50035	-0,0002	-0,0312	0,07315	
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04845	0,0475	0,12857	0,16575	0,00995
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,05079	0,04831	0,13079	0,16793	0,01014
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,0154	0,05288	1,77668	0,18948	0,23469
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00948	1,17162	4,59514	1,93301	-0,0234
RT >12-14t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	2,17307	0,34439	-0,0028		
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04048	0,41702	5,93416	2,3778	-0,023
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00716	0,14308	3,62619	1,74328	-0,0086
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00716	0,14551	3,64316	1,74828	-0,0088
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,34656	0,05015	2,54908	0,17035	0,31044
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,08529	1,63035	4,91961	2,06182	-0,018
RT >14-20t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	1,29841	0,28167	-0,0021		
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,06007	0,65147	5,54523	2,24659	-0,0164
RT >14-20t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,07045	0,04581	0,21503	0,1708	0,01446
RT >14-20t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,07159	0,04567	0,21963	0,17089	0,01459
RT >20-26t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,50002	0,05648	1,74563	0,19873	0,3073
RT >20-26t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00214	2,80412	3,71362	1,71058	-0,0164
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))-(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,55123	0,00052	-0,0289	0,06077	
RT >20-26t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,05935	0,93355	4,72775	1,97253	-0,0111
RT >20-26t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09352	0,04696	0,24085	0,17055	0,01669
RT >20-26t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09521	0,04681	0,24543	0,17057	0,01682
RT >26-28t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,30583	0,0488	2,08732	0,19138	0,3092
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,95694	0,0426	2,68929	0,16453	0,19738
RT >26-28t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	1,29096	0,19061	-0,0012		
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,26707	0,02464	1,06112	0,12302	0,06837
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,07875	0,03998	0,26614	0,16548	0,01617
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08042	0,03996	0,27168	0,16588	0,01633
RT >28-32t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,49009	0,05208	1,68268	0,22511	0,34556
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,24869	0,05118	2,00146	0,18504	0,23535
RT >28-32t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	1,50427	0,16509	-0,0011		
RT >28-32t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,05779	0,77752	4,54648	1,79844	-0,011
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08615	0,04178	0,27402	0,16982	0,01824
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08816	0,04184	0,27872	0,16958	0,01849
RT >32t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,68921	0,05646	2,40719	0,22614	0,34562
RT >32t Euro-1	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,37294	0,0521	2,65221	0,17883	0,22767
RT >32t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x)))-(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,60017	0,00071	-0,0297	0,05727	
RT >32t Euro-3	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,06177	1,0299	4,65034	1,93806	-0,0115
RT >32t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10181	0,04623	0,26779	0,16998	0,01861
RT >32t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10338	0,046	0,27308	0,16931	0,01877

Quadro A5 - Fórmulas para cálculo do consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	FC	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	0,00024	2,73653	676,067	-0,4997	
RT <=7.5t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,39847	-0,0509	195,75	0,08151	78,0794
RT <=7.5t Euro-2	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,70709	-0,0448	169,398	0,07961	72,6177
RT <=7.5t Euro-3	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,01459	-0,0412	187,457	0,07727	75,3424
RT <=7.5t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,65428	-0,0444	190,756	0,08176	73,0598
RT <=7.5t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,59829	-0,0453	196,341	0,08187	74,4052
RT >7,5-12t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00114	0,00019	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	9,5E-05	2,99461	963,465	-0,5511	
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00181	0,00024	-2E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00157	0,00023	-2E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00157	0,00024	-2E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,0015	0,00024	-2E-06		
RT >12-14t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,0009	0,00018	-1E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00124	0,00022	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00149	0,00022	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00127	0,00021	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,0013	0,00023	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00125	0,00022	-2E-06		
RT >14-20t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00058	0,00014	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	0,00012	2,93531	1720,38	-0,6302	
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00097	0,00018	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,0008	0,00017	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00082	0,00019	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00078	0,00018	-1E-06		
RT >20-26t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	740,23	0,06512	4881,34	0,5663	195,824
RT >20-26t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	569,115	0,0654	16111,8	0,818	165,909
RT >20-26t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00092	0,00014	-1E-06		
RT >20-26t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00077	0,00014	-9E-07		
RT >20-26t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	517,625	0,06375	2785,13	0,52478	155,315
RT >20-26t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	530,707	0,06339	2704,53	0,51186	157,588
RT >26-28t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	701,12	0,06101	4934,45	0,5557	205,272
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	536,314	0,06086	13293,3	0,76727	174,178
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	470,238	0,05977	11125,4	0,76524	168,284
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	504,972	0,05822	1754,76	0,43175	173,078
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	482,887	0,05893	2406,69	0,48319	162,265
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	494,902	0,05851	2363,01	0,47114	164,543
RT >28-32t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00078	9,2E-05	-6E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00095	0,00011	-8E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00113	0,00011	-8E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,001	0,00011	-7E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	489,318	0,06056	10612,1	0,78005	186,747
RT >28-32t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	502,355	0,06005	8992,98	0,74323	189,488
RT >32t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	753,53	0,06236	10477,2	0,69442	218,344
RT >32t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	606,817	0,06267	15645,7	0,78659	187,437
RT >32t Euro-2	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00088	0,00012	-8E-07		
RT >32t Euro-3	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00075	0,00012	-8E-07		
RT >32t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	544,051	0,06072	3022,9	0,51681	174,447
RT >32t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	558,076	0,06036	2946,19	0,50365	176,943

Quadro A6 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	1,331007267	21,845	-0,505	0,3128217	0,04756
RT <=7.5t Euro-1	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp(((-1)^d*x))))/d)$	2,762608227	0,00422	-0,1388	0,0554389	
RT <=7.5t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,251138399	0,05609	-0,0004		
RT <=7.5t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	1,848048637	0,05096	1,93686	0,2697384	0,38418
RT <=7.5t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,031240863	0,57335	-0,0393	0,4988833	0,0384
RT <=7.5t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,031000113	0,56606	0,0033	0,5071256	0,03752
RT >7,5-12t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	7,476983188	0,05866	10,5658	0,2455278	1,49597
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,709894073	48,0006	-1,6843	0,3733619	0,04759
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,134471625	0,03394	-0,0002		
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	3,589775856	0,05639	3,83629	0,2423465	0,63569
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,039322261	0,38014	3,78075	1,5795827	0,00423
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,041175668	0,38981	3,65981	1,526029	0,00752
RT >12-14t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	7,537075258	0,05691	11,8122	0,2276825	1,6408
RT >12-14t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	3,611931597	0,0569	5,46378	0,2737815	0,79032
RT >12-14t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,133525099	0,03011	-0,0002		
RT >12-14t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	3,664578531	0,05637	5,23029	0,2294067	0,73169
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,035959181	0,4141	3,95028	1,7284427	-0,0081
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,036137448	0,42082	3,97191	1,7345749	-0,0082
RT >14-20t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	10,65592222	0,05571	17,3777	0,2196783	2,12159
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	4,985290563	0,05579	7,55125	0,2516974	1,00263
RT >14-20t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,08694066	0,02341	-0,0001		
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	5,148456463	0,05646	6,88089	0,2111557	0,95765
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,043321527	0,61727	3,94062	1,724114	-0,008
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,041379916	0,62307	4,02779	1,7532224	-0,0095
RT >20-26t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	8,636838345	0,05844	14,19	0,2779354	1,59755
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	6,023257241	0,05386	13,072	0,2733165	1,26708
RT >20-26t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,074600778	0,01815	-0,0001		
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	6,675657237	0,05741	10,9768	0,2478646	1,22359
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,051787253	0,79559	3,60568	1,6282649	-0,0067
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,051528029	0,80977	3,61686	1,6317085	-0,0068
RT >26-28t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	8,134118834	0,05421	15,8644	0,2753205	1,6431
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	5,735352711	0,05148	13,7292	0,2770043	1,3437
RT >26-28t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,077921721	0,01741	-0,0001		
RT >26-28t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	1,245883584	103,701	-1,3906	0,5434518	0,03901
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	0,265667112	0,03436	0,75271	0,1459044	0,07453
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	0,270049299	0,03419	0,76972	0,1457958	0,07469
RT >28-32t 80ties	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	1,751127164	72,0217	-0,9773	0,4358463	0,04036
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	6,13895076	0,05084	15,2922	0,3360729	1,547
RT >28-32t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,084180871	0,01433	-9E-05		
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	1,412765399	69,1648	-1,3697	0,347118	0,04601
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,055754738	0,7425	3,34929	1,4384895	-0,003
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	0,056675727	0,74836	3,3875	1,448786	-0,0031
RT >32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	9,648937019	0,05755	19,6156	0,3096687	1,86986
RT >32t Euro-1	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	6,644875473	0,05192	16,4253	0,2909037	1,56108
RT >32t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,069949582	0,01478	-1E-04		
RT >32t Euro-3	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c+(d*\ln(x))+(e*x))))))$	1,465666998	64,6249	-0,7873	0,5178107	0,04277
RT >32t Euro-4	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	0,392265481	0,04621	0,69537	0,1656874	0,0941
RT >32t Euro-5	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)^b*x)))+(c*\exp(((-1)^d*x))))$	0,398609082	0,04596	0,71449	0,1655906	0,09451

Quadro A7 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	THC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,11191229	0,01586	2,6E-05		
RT <=7.5t Euro-1	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,655681829	0,04141	0,5799	0,1798819	0,13036
RT <=7.5t Euro-2	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,408108803	0,03907	0,41562	0,1701774	0,07849
RT <=7.5t Euro-3	THC	$y=exp((a+(b/x))-(c*ln(x)))$	1,617969791	-3,956	-0,9286		
RT <=7.5t Euro-4	THC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	20,14111884	2,49039	0,00763		
RT <=7.5t Euro-5	THC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	19,96931791	2,45266	0,0076		
RT >7,5-12t 80ties	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	2,050217388	0,03302	5,18612	0,129912	0,35351
RT >7,5-12t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,165814916	1,91236	3,80261	1,5382812	0,00347
RT >7,5-12t Euro-2	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,108682277	1,35815	3,23091	1,3559732	0,00903
RT >7,5-12t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,087634986	1,15561	4,03415	1,6117658	0,00185
RT >7,5-12t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,004256574	0,07125	3,59781	1,484271	0,00742
RT >7,5-12t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,004573121	0,07398	3,44238	1,426175	0,0101
RT >12-14t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,243760788	7,10826	3,51237	1,609276	-0,0067
RT >12-14t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,178064013	2,23782	3,89161	1,6498336	-0,0026
RT >12-14t Euro-2	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,124965177	1,62341	3,17356	1,4162658	0,00676
RT >12-14t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,083736033	1,32104	4,53135	1,8934873	-0,0104
RT >12-14t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,002967847	0,07675	4,43356	1,8897666	-0,0126
RT >12-14t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,002950649	0,07819	4,44761	1,8942502	-0,013
RT >14-20t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,445045383	10,3743	3,47843	1,6020816	-0,005
RT >14-20t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,204570948	3,41239	3,73786	1,6219017	-0,0055
RT >14-20t Euro-2	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,938046534	0,04167	1,83848	0,1446644	0,20511
RT >14-20t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,101638837	2,05915	4,20389	1,7977908	-0,0102
RT >14-20t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,003222203	0,12024	4,14338	1,8096038	-0,0131
RT >14-20t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,003082806	0,12247	4,14849	1,8106704	-0,0135
RT >20-26t 80ties	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	1,561301739	0,03024	5,11689	0,1227295	0,30866
RT >20-26t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,186871672	4,97887	3,15416	1,4722586	-0,0043
RT >20-26t Euro-2	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,818490372	0,02884	2,58536	0,1225967	0,1881
RT >20-26t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,121488681	2,91411	3,5694	1,6195267	-0,0048
RT >20-26t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,00453156	0,16182	3,71452	1,6882421	-0,008
RT >20-26t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,00479675	0,16504	3,69837	1,6815444	-0,0075
RT >26-28t 80ties	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	1,531679942	0,02452	5,36992	0,1240068	0,24634
RT >26-28t Euro-1	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	1,369133419	0,03008	4,16528	0,1308148	0,32133
RT >26-28t Euro-2	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,82800979	0,02481	2,67001	0,1248829	0,16291
RT >26-28t Euro-3	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,715880748	0,02347	2,79878	0,1234598	0,13594
RT >26-28t Euro-4	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,047332518	0,03283	0,15821	0,139438	0,00885
RT >26-28t Euro-5	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,048568395	0,03298	0,16126	0,1399317	0,00905
RT >28-32t 80ties	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	2,206595337	0,03868	4,09862	0,137648	0,39389
RT >28-32t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,342428022	4,82997	2,55422	1,1950602	0,01039
RT >28-32t Euro-2	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,12325609	2,99558	2,92821	1,3278666	-0,0015
RT >28-32t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,116548595	2,51652	3,60443	1,5381579	-0,0048
RT >28-32t Euro-4	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,063201466	0,04343	0,1079	0,1420279	0,01125
RT >28-32t Euro-5	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,065194189	0,04366	0,10942	0,1425262	0,01152
RT >32t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,166741218	7,07255	3,11503	1,4839578	-0,0042
RT >32t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,205228623	5,70159	3,04378	1,4408028	-0,0037
RT >32t Euro-2	THC	$y=((e+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,892970186	0,02705	2,90373	0,1219375	0,19423
RT >32t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,117502782	3,23588	3,53367	1,6097921	-0,0061
RT >32t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,004949973	0,17955	3,65568	1,672056	-0,0076
RT >32t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+exp(((1)*c)+(d*ln(x))))+(e*x))))$	0,005359925	0,18334	3,64831	1,6689269	-0,007

Quadro A8 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de NO_x para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	9,468632772	0,0443	-0,327	0,0444311	
RT <=7.5t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	8,131803541	0,02422	-0,4072	0,0658736	
RT <=7.5t Euro-2	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	8,952916843	0,0195	-0,4607	0,0688711	
RT <=7.5t Euro-3	NOx	$y=((a*(x^b))+((c*(x^d))))$	0,007370392	1,21572	31,1926	-0,770236	
RT <=7.5t Euro-4	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	15,28321578	1,01661	-0,8039		
RT <=7.5t Euro-5	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	12,22728665	1,01808	-0,9035		
RT >7,5-12t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	20,38627574	0,0399	-0,8202	0,0549328	
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	14,09512728	0,01438	-0,7275	0,0707128	
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	15,66328192	0,00906	-0,8539	0,0747953	
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	9,445678225	0,07774	29,691	0,3539661	3,5665
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	21,92758623	1,01107	-0,7141		
RT >7,5-12t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,440993649	0,08476	20,4435	0,4993579	1,32613
RT >12-14t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	23,96352103	0,02477	-1,0104	0,0586067	
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	16,14980498	0,00592	-0,8254	0,0711531	
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	12,01627632	0,07187	1472,97	1,2228117	5,03805
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,839918673	0,05821	32,8119	0,3246556	3,75961
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,26904752	0,06495	41,2442	0,5456369	2,39225
RT >12-14t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,095614495	0,06121	19,9267	0,4440804	1,3948
RT >14-20t 80ties	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	22,00346113	0,06262	60,7552	0,5674418	9,56284
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,0156843	0,06408	57,135	0,5426382	5,68547
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,67839938	0,06019	36,2684	0,4174634	5,93888
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	78,96459415	1,00751	-0,7841		
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6,70093565	0,05572	33,8551	0,4144631	2,78059
RT >14-20t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,053639943	0,05396	21,2354	0,3742901	1,62695
RT >20-26t 80ties	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	20,50277185	0,04892	70,711	0,4696047	9,4897
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,67988792	0,0501	96,6622	0,5445608	6,71862
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,19957685	0,04965	53,9017	0,426027	7,00624
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	13,83097156	0,04967	45,2534	0,2996162	5,50025
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,581157613	0,04874	44,2456	0,4422265	3,39253
RT >20-26t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,645473547	0,04899	27,4547	0,4092217	2,00405
RT >26-28t 80ties	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	20,11845202	0,04617	94,2835	0,5378817	9,89341
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,76494302	0,04714	93,3693	0,5507392	6,93778
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,40013568	0,04782	55,7003	0,4446735	7,20537
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,57249962	0,05104	45,6519	0,3092401	5,58301
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,880339249	0,04837	53,3788	0,485456	3,47072
RT >26-28t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,946527157	0,04984	32,5113	0,4492059	2,04096
RT >28-32t 80ties	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	18,30891173	0,04044	282,954	0,8038698	11,2495
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	14,73772506	0,04399	219,819	0,6931457	8,03342
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	30,68896555	-0,0381	-1,467	0,0747006	
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	82,27058003	1,00501	-0,6651		
RT >28-32t Euro	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	32,99505658	1,00276	-0,5221		
RT >28-32t Euro	NOx	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	-0,221447546	0,214	0,24853		
RT >32t 80ties	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	21,21694955	0,03982	346,82	0,7410774	10,8629
RT >32t Euro-1	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	15,73609825	0,04159	112,895	0,5556916	7,75728
RT >32t Euro-2	NOx	$y=(a*(b*(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	7,350238493	214,628	-1,4099	0,457996	0,02224
RT >32t Euro-3	NOx	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	78,78815667	1,00396	-0,6328		
RT >32t Euro-4	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,34487524	0,04237	55,4712	0,4654128	3,95866
RT >32t Euro-5	NOx	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,15201122	0,04314	32,2626	0,422801	2,33204

Quadro A9 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de PM para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,98445	0,05739	1,3575285	0,2675	0,24668
RT <=7.5t Euro-1	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,09642	3,4378	-1,419391	0,24971	0,05487
RT <=7.5t Euro-2	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	5,35203	0,43012	-0,003546		
RT <=7.5t Euro-3	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,13963	0,04368	0,0425858	0,13884	0,03679
RT <=7.5t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0261	0,03907	0,0723451	0,16834	0,00594
RT <=7.5t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,02637	0,03894	0,0730533	0,16799	0,00596
RT >7,5-12t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,13577	0,05691	1,774217	0,23427	0,23576
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,80556	0,06327	0,566807	0,21039	0,14279
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,28766	0,00139	-0,010701	0,03718	
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,3062	0,05639	0,1420784	0,12602	0,06099
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00422	0,15204	3,1902798	1,6079	-0,0101
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00401	0,15498	3,2040837	1,61172	-0,0106
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,12883	0,05529	2,0727212	0,23151	0,25746
RT >12-14t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,75056	0,05956	0,7847505	0,19012	0,15621
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,29584	0,00221	-0,009872	0,02931	
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00753	0,48178	4,5774146	1,88064	-0,0224
RT >12-14t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0449	0,04294	0,1405163	0,16423	0,01084
RT >12-14t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04573	0,04299	0,1430869	0,16398	0,01097
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,53191	0,05278	2,8920911	0,20794	0,32964
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,08591	1,69826	4,4015769	1,89117	-0,0163
RT >14-20t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	1,49932	0,22171	-0,001617		
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04084	0,67112	4,9484664	2,03451	-0,0188
RT >14-20t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,06761	0,04368	0,2114309	0,16777	0,01458
RT >14-20t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,06895	0,04376	0,2148245	0,16766	0,01475
RT >20-26t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,50777	0,05366	2,1996304	0,23917	0,3472
RT >20-26t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,32375	0,05359	2,5394632	0,21281	0,23447
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,52883	0,00354	-0,017986	0,02954	
RT >20-26t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	-0,008	1,08042	3,6817374	1,62126	-0,0167
RT >20-26t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09418	0,04668	0,2337904	0,17345	0,01756
RT >20-26t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09476	0,04625	0,238333	0,17204	0,01768
RT >26-28t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,43156	0,04901	2,5973197	0,24736	0,35539
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,19643	0,04966	2,7976392	0,2111	0,24625
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,52247	0,00449	-0,016281	0,02492	
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,42445	0,04164	0,864328	0,15995	0,10082
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08035	0,04039	0,2567803	0,16703	0,01699
RT >26-28t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0818	0,04029	0,2625674	0,16738	0,01715
RT >28-32t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,52281	0,04778	2,7254459	0,29569	0,39238
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,33066	0,05147	2,562516	0,24955	0,28399
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a*(x^2)))+(b*x))+c$	9E-05	-0,0111	0,5034456		
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,53572	0,04894	0,4039991	0,1771	0,11918
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08604	0,04025	0,2723259	0,1702	0,01849
RT >28-32t Euro	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08774	0,04029	0,2773739	0,17005	0,01878
RT >32t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,70276	0,05206	3,3034496	0,2811	0,40597
RT >32t Euro-1	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,49111	0,05235	3,0547266	0,23479	0,28408
RT >32t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,58827	0,01331	-0,015953	0,01295	
RT >32t Euro-3	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,58941	0,05018	0,8253222	0,18235	0,11801
RT >32t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10723	0,04656	0,2598185	0,17946	0,01967
RT >32t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10895	0,04643	0,2663945	0,17947	0,01989

Quadro A10 - Fórmulas para cálculo do consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00231	0,00023	-0,000002		
RT <=7.5t Euro-1	FC	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,00030	2,68877	465,253	-0,4399	
RT <=7.5t Euro-2	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,69127	-0,04430	160,750	0,0711	79,292
RT <=7.5t Euro-3	FC	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,00052	2,55885	437,509	-0,4216	
RT <=7.5t Euro-4	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,44418	-0,04752	179,623	0,0753	80,775
RT <=7.5t Euro-5	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	0,40527	-0,04843	184,930	0,0754	82,132
RT >7,5-12t 80ties	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00122	0,00016	-0,000001		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00167	0,00018	-0,000001		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00196	0,00018	-0,000002		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00175	0,00018	-0,000001		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00177	0,00019	-0,000002		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00170	0,00019	-0,000002		
RT >12-14t 80ties	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00101	0,00015	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00142	0,00017	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00167	0,00017	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00147	0,00016	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00152	0,00018	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00147	0,00017	-0,000001		
RT >14-20t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	692,850	0,06587	13057,78	0,7850	194,462
RT >14-20t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00096	0,00014	-0,000001		
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,00000	3,80778	1352,049	-0,5268	
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,00001	3,42037	1550,258	-0,5524	
RT >14-20t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00101	0,00015	-0,000001		
RT >14-20t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00097	0,00014	-0,000001		
RT >20-26t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	694,902	0,05466	4400,705	0,5358	220,496
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	541,947	0,05305	20605,005	0,8490	192,506
RT >20-26t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,0011	0,00010	-0,000001		
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	520,710	0,05095	3644,251	0,5807	190,853
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	492,958	0,05133	5083,974	0,6286	178,212
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	505,770	0,05113	4762,796	0,6088	180,436
RT >26-28t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	666,989	0,05105	5141,671	0,5570	230,899
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	523,536	0,04942	17421,48	0,8099	201,805
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	464,244	0,04717	22777,72	0,8842	195,476
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	496,038	0,04662	3798,311	0,5737	199,101
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	468,860	0,04676	4328,608	0,5870	185,205
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	481,369	0,04656	4106,159	0,5694	187,436
RT >28-32t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	628,891	0,04813	68219,94	1,0523	262,117
RT >28-32t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00106	0,00007	-0,0000004		
RT >28-32t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00122	0,00007	-0,0000004		
RT >28-32t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,00113	0,00007	-0,0000004		
RT >28-32t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	468,053	0,04492	48602,61	1,0385	215,078
RT >28-32t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	482,568	0,04489	38612,12	0,9921	217,947
RT >32t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	704,489	0,04757	7979,550	0,6336	254,064
RT >32t Euro-1	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	580,517	0,04648	25294,46	0,8585	224,846
RT >32t Euro-2	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	520,396	0,04429	37089,48	0,9553	218,915
RT >32t Euro-3	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	558,802	0,04449	6143,313	0,6488	221,729
RT >32t Euro-4	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	525,170	0,04465	7791,271	0,6797	206,137
RT >32t Euro-5	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b)*x)))+(c*exp((-1)*d)*x))$	539,708	0,04465	7150,305	0,6576	208,815

Quadro A11 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,47468744	24,6676	-0,6393	0,2965395	0,05159
RT <=7.5t Euro-1	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,199370203	0,04113	-0,0003		
RT <=7.5t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,241128505	0,0498	-0,0004		
RT <=7.5t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,920257351	0,05108	2,54839	0,3027996	0,42195
RT <=7.5t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03126581	0,37707	1,087	0,7847498	0,02569
RT <=7.5t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,030784585	0,30601	1,68849	0,9201481	0,02181
RT >7,5-12t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,345005679	0,05723	13,293	0,2723856	1,67796
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,337158826	0,05558	6,35648	0,3127231	0,82821
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,136363715	0,02895	-0,0002		
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,693605912	51,3335	-1,6196	0,395682	0,04345
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,040652261	0,49333	2,50163	1,2088945	0,0109
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03601319	0,44219	3,22779	1,438307	0,00142
RT >12-14t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,253260468	0,05356	15,053	0,2546598	1,8318
RT >12-14t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,086719762	0,02185	-0,0001		
RT >12-14t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,140168023	0,02528	-0,0002		
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,806336654	26,5385	-0,6053	0,4879375	0,04336
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03481291	0,42058	3,75516	1,6377851	-0,0071
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,034460389	0,43126	3,71309	1,6252717	-0,0071
RT >14-20t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	10,27222364	0,05295	18,972	0,2283578	2,28777
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,935220568	0,05365	9,50603	0,2805728	1,13622
RT >14-20t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,091259378	0,02033	-0,0001		
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,063163547	78,9491	-1,4732	0,457285	0,0444
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04171891	0,64527	3,58765	1,6029326	-0,0072
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04227383	0,65855	3,56576	1,5958032	-0,0068
RT >20-26t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	8,937698035	0,05715	18,4718	0,3160904	1,77301
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	6,23070179	0,05173	17,5587	0,3179321	1,52044
RT >20-26t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,079078811	0,01476	-9E-05		
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,399722527	59,2539	-0,8435	0,4841098	0,04398
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,36981995	0,04737	0,57368	0,1628438	0,08717
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,067760755	0,80023	3,26641	1,4674428	0,00219
RT >26-28t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	8,539809321	0,05325	22,5512	0,318587	1,83096
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	6,002561136	0,04845	20,2144	0,3331555	1,60324
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(b*x)))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	7,412474441	0,02525	-0,3106	0,0418176	
RT >26-28t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,038916816	0,0126	-6E-05		
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,348632567	0,04158	0,68772	0,173009	0,08501
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,355183428	0,04173	0,70422	0,1741246	0,08615
RT >28-32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	9,974371088	0,05404	26,2098	0,4058	2,03638
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	6,85089492	0,0476	20,218	0,3947689	1,84591
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(b*x)))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	8,110079783	0,04559	-0,2971	0,0322856	
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(b*x)))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	10,91426892	0,0244	-0,5017	0,0472151	
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,07792862	0,72805	3,21584	1,2937297	0,00951
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,08184864	0,77712	2,90291	1,2000082	0,01269
RT >32t 80ties	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	2,092988621	124,318	-1,2811	0,4813888	0,04115
RT >32t Euro-1	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,414842897	0,04952	22,14	0,3447755	1,91279
RT >32t Euro-2	CO	$y=((a+(b*x)))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	8,555801366	0,04441	-0,3262	0,0345336	
RT >32t Euro-3	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,746672747	64,589	-0,899	0,4262465	0,0455
RT >32t Euro-4	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,451876802	0,04886	0,57382	0,1731096	0,10063
RT >32t Euro-5	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,449406198	0,0481	0,59077	0,1692891	0,10132

Quadro A12 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	THC	$y = \exp((a+(b/x))-(c*\ln(x)))$	3,975182827	-3,7559	-0,9963		
RT <=7.5t Euro-1	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,661618754	0,04424	0,52187	0,1670244	0,13921
RT <=7.5t Euro-2	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,388635334	0,03913	0,40557	0,1512066	0,07987
RT <=7.5t Euro-3	THC	$y = \exp((a+(b/x))-(c*\ln(x)))$	1,53065071	-3,6285	-0,9125		
RT <=7.5t Euro-4	THC	$y = \exp((a+(b/x))-(c*\ln(x)))$	-0,965837929	-4,5228	-1,0412		
RT <=7.5t Euro-5	THC	$y = \exp((a+(b/x))-(c*\ln(x)))$	-0,942889004	-4,5676	-1,0436		
RT >7,5-12t 80ties	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,161804535	6,20985	3,55225	1,5814809	-0,0064
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,136490796	0,05121	1,09148	0,1283036	0,23398
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,116943876	1,3027	3,42996	1,413736	0,00978
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,083020521	1,09987	4,44788	1,7652138	-0,0031
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,029228575	0,04264	0,05387	0,1185655	0,00535
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,030315172	0,04284	0,05467	0,1193336	0,00548
RT >12-14t 80ties	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,231110428	6,65898	3,9195	1,7494231	-0,0102
RT >12-14t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,00093789	0,04497	1,73697	0,1345439	0,25186
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,089966816	1,56092	3,62118	1,5927437	-0,0055
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,088387867	1,30513	4,43873	1,8633607	-0,0089
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,002995944	0,07587	4,42082	1,8954569	-0,013
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003083011	0,07709	4,44608	1,9028511	-0,013
RT >14-20t 80ties	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,362110699	9,9571	3,77701	1,708304	-0,009
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,193581912	3,39888	3,77525	1,6387836	-0,0068
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,108604082	2,4625	3,2621	1,4968859	-0,0047
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,107847132	2,02723	4,17073	1,7895705	-0,0092
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003813624	0,11677	4,23579	1,847866	-0,0129
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003435716	0,11946	4,23196	1,848316	-0,0138
RT >20-26t 80ties	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,56499268	0,03152	5,22799	0,1278202	0,30813
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,348521331	0,03048	4,00936	0,1263751	0,31392
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,75007463	0,02316	2,65632	0,1185085	0,14834
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,634326075	0,02464	2,67228	0,1177826	0,14538
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,004209673	0,15764	3,74079	1,7041756	-0,0092
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,004232183	0,15955	3,7825	1,7160542	-0,0095
RT >26-28t 80ties	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,457671957	0,02627	5,5342	0,1279776	0,27741
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,293626637	0,0286	4,17863	0,1293817	0,32337
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,786694383	0,02118	2,72688	0,122882	0,13097
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,666107706	0,02048	2,77536	0,1215758	0,11063
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,047255531	0,03483	0,15599	0,1433512	0,00912
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,047583237	0,03435	0,15919	0,1424306	0,00919
RT >28-32t 80ties	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	2,817720906	0,05048	4,27044	0,1854839	0,46381
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	2,221231634	0,04743	2,81122	0,1704278	0,4694
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,780022578	0,02406	2,23442	0,1114873	0,19032
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,601190608	0,02203	2,14547	0,1035237	0,16022
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,065496465	0,04644	0,10692	0,1535602	0,01156
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,066875156	0,04624	0,10906	0,1531497	0,01174
RT >32t 80ties	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	2,420733941	0,04377	5,64056	0,1557837	0,42116
RT >32t Euro-1	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,213067494	5,59326	3,06238	1,4435939	-0,0046
RT >32t Euro-2	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,87535383	0,02376	2,91443	0,1219051	0,16999
RT >32t Euro-3	THC	$y = ((a+(a*\exp((-1)*b)*x))-(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,716814119	0,02499	2,8834	0,1187235	0,16394
RT >32t Euro-4	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003784761	0,17737	3,59607	1,664963	-0,0099
RT >32t Euro-5	THC	$y = (a+(b*(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,004046907	0,18099	3,5959	1,663641	-0,0095

Quadro A13 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de NO_x para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	9,529228861	0,048	-0,2824	0,0380751	
RT <=7.5t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	8,073684895	0,02131	-0,3551	0,0613538	
RT <=7.5t Euro-2	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	8,906431384	0,01703	-0,4088	0,0643522	
RT <=7.5t Euro-3	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	33,83691583	1,01465	-0,8426		
RT <=7.5t Euro-4	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	13,64921649	1,0137	-0,7155		
RT <=7.5t Euro-5	NOx	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,004325147	1,11931	9,70113	-0,708213	
RT >7,5-12t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	20,26148519	0,03739	-0,6621	0,0466604	
RT >7,5-12t Euro-	NOx	$y=c+(a*\exp(b*x))$	9,145067817	-0,0723	4,94411		
RT >7,5-12t Euro-	NOx	$y=c+(a*\exp(b*x))$	10,48779517	-0,0716	5,05096		
RT >7,5-12t Euro-	NOx	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,2842982	0,45471	50,433	-0,770489	
RT >7,5-12t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,587890832	0,06678	40,543	0,5657618	2,44041
RT >7,5-12t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2,74996268	0,06394	16,5352	0,4263455	1,41524
RT >12-14t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	23,77926799	0,01796	-0,8036	0,0498002	
RT >12-14t Euro-	NOx	$y=c+(a*\exp(b*x))$	10,42185822	-0,0612	5,24096		
RT >12-14t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	10,90986127	0,05793	987,565	1,1140548	5,32255
RT >12-14t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,780338249	0,04985	35,7287	0,340996	3,9479
RT >12-14t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,108219564	0,0533	60,7957	0,6101234	2,55196
RT >12-14t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,124035465	0,05162	24,7149	0,4866456	1,47458
RT >14-20t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	20,79706029	0,05022	75,1899	0,5972301	10,173
RT >14-20t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	12,90598887	0,05067	71,19	0,5680486	6,04269
RT >14-20t Euro-	NOx	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	5,973693645	58,4143	-0,0982	0,5234914	0,03019
RT >14-20t Euro-	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	69,14188285	1,00495	-0,6917		
RT >14-20t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6,677169771	0,04656	42,0785	0,4556787	2,96307
RT >14-20t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,100128984	0,04572	24,9616	0,4067139	1,72418
RT >20-26t 80ties	NOx	$y=1(((c*(x^2))+b*x)+a)$	0,027099565	0,0012	-5E-06		
RT >20-26t Euro-	NOx	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	0,000691474	0,00018	2,06976		
RT >20-26t Euro-	NOx	$y=\exp((a+(b*x))-(c*\ln(x)))$	4,188733602	-0,9674	-0,4831		
RT >20-26t Euro-	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	66,1603334	1,00231	-0,5795		
RT >20-26t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,054057757	0,03967	80,26	0,5579728	3,64917
RT >20-26t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,01874224	0,04125	42,4383	0,4987096	2,15064
RT >26-28t 80ties	NOx	$y=1(((c*(x^2))+b*x)+a)$	0,027811641	0,00104	-4E-06		
RT >26-28t Euro-	NOx	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	0,001598439	0,00023	1,89285		
RT >26-28t Euro-	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	29,90350744	-0,0513	-1,2761	0,0690831	
RT >26-28t Euro-	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	65,35027344	1,00186	-0,564		
RT >26-28t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,421827761	0,03899	94,2446	0,604839	3,74111
RT >26-28t Euro-	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,382603796	0,04213	57,0136	0,5639418	2,21001
RT >28-32t 80ties	NOx	$y=c+(a*\exp(b*x))$	20,88630588	-0,0271	11,4459		
RT >28-32t Euro-	NOx	$y((((a*(x^3))+b*(x^2))+c*x)+d)$	-4,68688E-05	0,00868	-0,6066	26,094278	
RT >28-32t Euro-	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x)))d)$	30,1453	-0,0589	-1,0509	0,0615404	
RT >28-32t Euro-	NOx	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	-0,000204588	0,00017	2,15576		
RT >28-32t Euro-	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	27,65393414	0,9982	-0,3728		
RT >28-32t Euro-	NOx	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	-0,00022989	0,0015	2,1215		
RT >32t 80ties	NOx	$y=1(((c*(x^2))+b*x)+a)$	0,026687431	0,00067	-1E-06		
RT >32t Euro-1	NOx	$y((((a*(x^3))+b*(x^2))+c*x)+d)$	-5,01698E-05	0,00931	-0,6566	27,755556	
RT >32t Euro-2	NOx	$y=1/(a+(b*(x^c)))$	0,024364934	0,00356	0,71319		
RT >32t Euro-3	NOx	$y=((a*(b^x))*x^c)$	63,90463853	0,99963	-0,4798		
RT >32t Euro-4	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	9,520816395	0,03256	175,76	0,6852938	4,14277
RT >32t Euro-5	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,971503781	0,03579	62,4669	0,5654429	2,47667

Quadro A14 - Fórmulas para cálculo do fator de emissão de PM para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,00835291	0,05861	1,68686	0,2962992	0,26451
RT <=7.5t Euro-1	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	1,050804598	0,19649	-0,0012		
RT <=7.5t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,151572927	0,00232	-0,0038	0,0166081	
RT <=7.5t Euro-3	PM	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0,161608235	-0,0495	0,03978		
RT <=7.5t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,025183835	0,03706	0,07341	0,1644904	0,00585
RT <=7.5t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,025468522	0,03709	0,07407	0,1642246	0,00589
RT >7,5-12t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,158064081	0,0565	2,18141	0,2664623	0,26092
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,161256604	9,12237	-1,6182	0,2928651	0,05652
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,298367273	0,004	-0,0088	0,0197044	
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,328711299	0,05683	0,14267	0,1746892	0,06369
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,005093945	0,16079	2,9176	1,5209141	-0,0063
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,005264317	0,16207	2,96527	1,5337443	-0,0063
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,102448199	0,05246	2,50198	0,2533148	0,28303
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,742743288	0,05711	0,88568	0,2145328	0,17563
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a*(x^2))+(b*x))+c)$	5,61559E-05	-0,0067	0,29627		
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,309264467	0,05528	0,27082	0,1774527	0,07091
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,047058541	0,04293	0,13724	0,1661669	0,01083
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,047946144	0,04291	0,13993	0,1663673	0,01096
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,55318784	0,05117	3,27295	0,2308386	0,35153
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,994276583	0,05335	1,45942	0,1989929	0,21298
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,440381507	0,00389	-0,0141	0,0255439	
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	-0,024534016	0,8359	3,58623	1,5441202	-0,0179
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,069341319	0,04326	0,20846	0,1701537	0,01468
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,070873923	0,04339	0,21253	0,1708442	0,01485
RT >20-26t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,544985563	0,05028	2,92221	0,2894354	0,38335
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,327774127	0,05042	2,91496	0,2464196	0,2703
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,000101588	-0,0125	0,54128		
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,529815342	0,04917	0,72958	0,1885074	0,11007
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,098749081	0,04703	0,2233	0,1779092	0,0179
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,099827868	0,04683	0,22764	0,1769841	0,01809
RT >26-28t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,49380745	0,04631	3,47267	0,2938084	0,39578
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,249155714	0,04879	3,30676	0,2515881	0,29391
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a*(x^2))+(b*x))+c)$	0,000101948	-0,0125	0,55638		
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,479913988	0,04361	0,8822	0,1955647	0,11298
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,089166871	0,04281	0,24834	0,1758209	0,01758
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,089408326	0,04228	0,2537	0,1745718	0,0177
RT >28-32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,632576	0,04558	4,04846	0,3625149	0,44739
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,369503006	0,04987	2,88001	0,2882986	0,34935
RT >28-32t Euro	PM	$y((((a*(x^3)))+(b*(x^2)))+(c*x))+d)$	5,39204E-07	3,6E-05	-0,0106	0,5894047	
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,554605883	0,04771	0,46614	0,2357446	0,13417
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,096808665	0,04284	0,26362	0,176838	0,01912
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,099206786	0,04271	0,2717	0,1789417	0,01929
RT >32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,753998858	0,04726	4,55682	0,3290898	0,45863
RT >32t Euro-1	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,524085362	0,04866	3,73583	0,2802118	0,34696
RT >32t Euro-2	PM	$y((((a*(x^3)))+(b*(x^2)))+(c*x))+d)$	4,51206E-07	6,4E-05	-0,0131	0,6598195	
RT >32t Euro-3	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,6149295	0,04799	0,9235	0,2341633	0,1342
RT >32t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,113680323	0,0473	0,24483	0,1836616	0,02004
RT >32t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,114785698	0,04695	0,24997	0,1823429	0,02023

Quadro A15 - Fórmulas para cálculo do consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [65].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,002349551	0,00021	-2E-06		
RT <=7.5t Euro-1	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,003361162	0,00023	-2E-06		
RT <=7.5t Euro-2	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,003899021	0,00023	-2E-06		
RT <=7.5t Euro-3	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,003613833	0,00022	-2E-06		
RT <=7.5t Euro-4	FC	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,000203497	2,73071	423,641	-0,39928	
RT <=7.5t Euro-5	FC	$y=((a*(x^b))+c*(x^d))$	0,000206429	2,72726	436,637	-0,403141	
RT >7,5-12t 80ties	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001302799	0,00014	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001774137	0,00015	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,002051904	0,00015	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001854937	0,00014	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001896074	0,00015	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001822986	0,00015	-1E-06		
RT >12-14t 80ties	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001120183	0,00012	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001545651	0,00013	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001784084	0,00013	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001613703	0,00013	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001673851	0,00014	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001613387	0,00014	-9E-07		
RT >14-20t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	648,2777108	0,05778	7543,45	0,6775638	207,227
RT >14-20t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,001072173	0,00011	-7E-07		
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	412,8574809	0,05165	21568,4	0,9093457	172,137
RT >14-20t Euro	FC	$y=1/(((c*(x^2))+(b*x))-a)$	0,001113395	0,00011	-7E-07		
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	424,9577003	0,05175	4214,69	0,6272166	164,669
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	437,3499351	0,05171	4781,66	0,6367169	166,844
RT >20-26t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	669,4407279	0,04458	5412,19	0,5671526	238,811
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	538,8539156	0,04245	37865,7	0,9526323	210,266
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	486,564695	0,04013	58850,8	1,0543077	203,861
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	523,3909305	0,0408	12217,5	0,7879533	207,725
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	489,6918331	0,04071	11992,6	0,7751039	192,686
RT >20-26t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	502,9405776	0,04077	9343,09	0,729214	195,202
RT >26-28t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	655,594637	0,04223	7208,35	0,6116711	252,02
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	532,8736169	0,03981	44924	0,9750603	220,471
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	480,1977477	0,03682	63618,1	1,0629106	211,538
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	515,0354208	0,03733	12509,7	0,7899696	214,904
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	482,4628077	0,03719	10045,5	0,7447796	198,68
RT >26-28t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	495,7317828	0,03726	9982,97	0,7324955	201,187
RT >28-32t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	634,0139173	0,03863	351656	1,3317899	290,232
RT >28-32t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	538,1441722	0,03592	1841399	1,6355558	252,851
RT >28-32t Euro	FC	$y=(c+(a*exp(b*x)))$	514,9198841	-0,0359	250,502		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(c+(a*exp((-1)*b*x)))$	550,4293797	0,03703	255,782		
RT >28-32t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	491,0320442	0,03341	861522	1,5365767	227,246
RT >28-32t Euro	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	500,1444118	0,0328	18756	0,9258784	228,023
RT >32t 80ties	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	721,6678587	0,03676	20235,5	0,8044963	276,597
RT >32t Euro-1	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	616,92898	0,03551	154561	1,1806705	244,387
RT >32t Euro-2	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	564,1391862	0,03221	441222	1,3888034	232,172
RT >32t Euro-3	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	601,6323071	0,03355	89962,5	1,1210943	237,525
RT >32t Euro-4	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	557,7146101	0,0328	48115,4	1,0074391	216,551
RT >32t Euro-5	FC	$y=((a+(a*exp((-1)*b*x)))+(c*exp((-1)*d*x)))$	572,030071	0,03293	37047,2	0,9542699	219,369

Anexo 3 – Constantes para o cálculo dos fatores de emissão e fator de consumo dos veículos ligeiros de passageiros a gasolina de norma EURO

Quadro A16 - Constantes para o cálculo dos fatores de emissão e do fator de consumo dos veículos ligeiros de passageiros a gasolina com normas EURO de acordo com a Equação 1 [65].

Pollutant	Emission Standard	Engine capacity	Speed Range (km/h)	R ²	a	b	c	d	e
CO	Euro 1	All capacities	10-130	0.87	1.12E+01	1.29E-01	-1.02E-01	-9.47E-04	6.77E-04
	Euro 2	All capacities	10-130	0.97	6.05E+01	3.50E+00	1.52E-01	-2.52E-02	-1.68E-04
	Euro 3	All capacities	10-130	0.97	7.17E+01	3.54E+01	1.14E+01	-2.48E-01	
	Euro 4	All capacities	10-130	0.93	1.36E-01	-1.41E-02	-8.91E-04	4.99E-05	
HC	Euro 1	All capacities	10-130	0.82	1.35E+00	1.78E-01	-6.77E-03	-1.27E-03	
	Euro 2	All capacities	10-130	0.95	4.11E+06	1.66E+06	-1.45E+04	-1.03E+04	
	Euro 3	All capacities	10-130	0.88	5.57E-02	3.65E-02	-1.10E-03	-1.88E-04	1.25E-05
	Euro 4	All capacities	10-130	0.10	1.18E-02		-3.47E-05		8.84E-07
NO _x	Euro 1	All capacities	10-130	0.86	5.25E-01		-1.00E-02		9.36E-05
	Euro 2	All capacities	10-130	0.52	2.84E-01	-2.34E-02	-8.69E-03	4.43E-04	1.14E-04
	Euro 3	All capacities	10-130	0.80	9.29E-02	-1.22E-02	-1.49E-03	3.97E-05	6.53E-06
	Euro 4	All capacities	10-130	0.71	1.06E-01		-1.58E-03		7.10E-06
FC	Euro 1	<1.4	10-130	0.99	1.91E+02	1.29E-01	1.17E+00	-7.23E-04	
		1.4-2.0	10-130	0.98	1.99E+02	8.92E-02	3.46E-01	-5.38E-04	
		>2.0	10-130	0.93	2.30E+02	6.94E-02	-4.26E-02	-4.46E-04	
	Euro 2	<1.4	10-130	0.99	2.08E+02	1.07E-01	-5.65E-01	-5.00E-04	1.43E-02
		1.4-2.0	10-130	0.98	3.47E+02	2.17E-01	2.73E+00	-9.11E-04	4.28E-03
		>2.0	10-130	0.98	1.54E+03	8.69E-01	1.91E+01	-3.63E-03	
	Euro 3	<1.4	10-130	0.99	1.70E+02	9.28E-02	4.18E-01	-4.52E-04	4.99E-03
		1.4-2.0	10-130	0.99	2.17E+02	9.60E-02	2.53E-01	-4.21E-04	9.65E-03
		>2.0	10-130	0.99	2.53E+02	9.02E-02	5.02E-01	-4.69E-04	
	Euro 4	<1.4	10-130	0.95	1.36E+02	2.60E-02	-1.65E+00	2.28E-04	3.12E-02
		1.4-2.0	10-130	0.96	1.74E+02	6.85E-02	3.64E-01	-2.47E-04	8.74E-03
		>2.0	10-130	0.98	2.85E+02	7.28E-02	-1.37E-01	-4.16E-04	