

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno José de Oliveira Araújo

**Desenvolvimento de um Modelo de
Caracterização Energética de Ciclos de
Condução**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Especialização Energia e Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Luís António de Sousa Barreiros Martins

Professor Francisco Carrusca Pimenta de Brito

Janeiro 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Bruno José de Oliveira Araújo

Endereço eletrónico: bruno38096@gmail.com

Telefone: 918858035

Número do Bilhete de Identidade: 12382953

Título dissertação:

Desenvolvimento de um Modelo de Caracterização Energética de Ciclos de Condução

Orientador (es):

Professor Luís António de Sousa Barreiros Martins;

Professor Francisco Carrusca Pimenta de Brito

Ano de conclusão: 2014

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respetiva, deve constar uma das seguintes declarações:

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;
2. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA TESE/TRABALHO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;
3. DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais pelo apoio e confiança em mim depositados ao longo destes anos de estudo. Agradeço à Manuela pela paciência e pela coragem que me deu ao longo deste trabalho e sem ela nada teria sido possível.

Um agradecimento especial ao Doutor Luís Martins, meu orientador pelo apoio, empenho e esforço, indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradeço também o apoio e orientação do meu coorientador, Doutor Francisco Brito.

O meu Muito Obrigado a todos.

RESUMO

As crescentes preocupações ambientais e o receio constante pela futura escassez das reservas de petróleo a nível mundial, acompanhada pela subida do seu preço, levaram a União Europeia a definir exigentes normas para o sector automóvel, o que tem impulsionado o seu desenvolvimento tecnológico embora com custos acrescidos.

Em 1999 a indústria automóvel chegou a um acordo para fazer uma redução gradual do nível de emissões de GEEs e de poluentes para novos veículos. No entanto, nos primeiros anos do acordo, essa redução foi inferior ao esperado pelo que os fabricantes começaram a explorar as flexibilidades do teste de homologação para conseguirem atingir as metas mais restritas impostas pela UE a partir de 2007, levando ao aumento da diferença entre consumos certificados e reais.

Para se poder comparar e expor as debilidades dos ciclos de condução utilizados na certificação de consumos e emissões, foi desenvolvido no presente trabalho uma metodologia para a caracterização energética destes ciclos de condução normalizados ou de ciclos reais. Esta metodologia será também muito útil na análise e dimensionamento dos futuros sistemas de propulsão de veículos, e.g. híbridos ou eléctricos.

O estudo incluiu a aquisição e tratamento dos dados recolhidos por um sistema GPS em três percursos: um citadino, um por estrada Nacional e um terceiro maioritariamente por autoestrada. Os dados tratados foram séries no tempo e no espaço da altitude, velocidade e aceleração lateral do veículo. Seguiu-se a utilização de um modelo físico desenvolvido na plataforma *MatLab/Simulink*, que permite a determinação dos vários fluxos energéticos envolvidos na circulação de um veículo genérico ao longo dos percursos reais ou dos ciclos de condução normalizados.

Finalmente foi desenvolvida uma metodologia, envolvendo a definição de uma série de parâmetros específicos, independentes ou pouco dependentes do veículo considerado, que permite a fácil caracterização energética e a comparação entre ciclos de condução.

Os resultados provam que os consumos energéticos em percursos reais são significativamente superiores aos obtidos com os ciclos usados na homologação de novos veículos, sobretudo no caso Europeu mas também nos EUA. A principal razão prende-se com a energia associada às variações de altitude, não considerada na homologação, mas também na dinâmica mais agressiva da circulação real.

ABSTRACT

The growing environmental concerns and the constant fear for a future shortage in worldwide oil reserves, together with price increases, lead the European Union to impose strict regulations to the automotive sector, thus promoting the technological development but at a cost for the consumer.

From 1999, the automotive industry agreed upon a gradual reduction in the level of greenhouse gases and pollutant emissions for new vehicles. In the first years, however, the reduction was lower than expected, so that the manufacturers began to explore the flexibilities of the type-approval test, trying to reach the new targets imposed by the EU since 2007. This led to a growing gap between certified and real consumption figures.

In this work an energy characterization methodology has been developed to compare and expose the weaknesses of the driving cycles used in the type-approval tests. The methodology will also be useful in the design of new vehicle powertrains (e.g. hybrid or electric).

The study included the acquisition and processing of data obtained from a dedicated GPS system for three real routes: an urban circuit, a National suburban road and a motorway route. The collected data included time and space series of altitude, speed and lateral acceleration of the vehicle. The pre-processed real data, or the data from the type-approval tests, was then the input of a simulation model developed in *MatLab/Simulink* platform, which allows the determination of the various energy flows involved in the drive of a generic vehicle.

Finally, a methodology was defined with several non-vehicle dependent parameters, thus allowing the energetic characterization and comparison of different real-life and type-approval driving cycles.

The results indicate that the energy consumptions obtained with the real routes are considerably higher than those resulting from the type-approval driving cycles used, particularly in Europe but also in the United States of America. The main reasons seem to be the energies involved in the altitude variations (not considered in the type-approval tests) and the aggressiveness of nowadays real-world traffic.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Panorama Energético Mundial.....	1
1.2. Sector dos Transportes.....	2
1.3. Objetivos do presente trabalho	5
1.4. Organização da Dissertação.....	6
2. Classificação e Certificação de Veículos	7
2.1. Evolução Histórica do Automóvel.....	7
2.2. Classificação de Veículos de Passageiros.....	11
2.3. Certificação de Consumos e Emissões	12
3. Ciclos de Condução Normalizados	19
3.1. Introdução	19
3.2. Ciclos de Condução Europeus	20
Enquadramento.....	20
Procedimento de Teste	22
3.3. Ciclos de Condução dos EUA	25
Normas Federais.....	26
3.4. Ciclos de Condução Japoneses	31
3.5. Ciclo de condução mundial - WLTP	32
Introdução.....	32
Procedimento de Teste	33
Características do ciclo de condução mundial	34
4. Percursos de condução reais.....	37
4.1. Introdução	37
4.2. Aquisição e tratamento de dados de entrada.....	37
4.3. Introdução ao sistema GPS	37
Principais fontes de erros dos sistemas de GPS	38

Descrição do Sistema de GPS utilizado na recolha de dados	39
4.4. Análise e correção dos dados recolhidos pelo GPS	40
Análise e tratamento dos dados da velocidade e aceleração lateral	40
4.5. Levantamento e tratamento dos dados da altitude	43
Leitura de Mapas Topográficos.....	43
Introdução à Cartografia.....	43
Tipos de Mapas	44
Mapas Topográficos	45
A Carta Militar	45
As Coordenadas.....	45
Processo de leitura de coordenadas numa Carta Militar	48
Metodologia utilizada.....	49
5. Modelo Energético	53
5.1. Introdução	53
5.2. Fundamentos teóricos	53
Sistema de Eixos	54
Modelo físico.....	55
5.3. Modelo computacional	61
5.4. Parâmetros para a caracterização dos ciclos de condução	63
Parâmetros independentes do veículo	64
Parâmetros dependentes do veículo	68
5.5. Estrutura e utilização do programa Driving Cycle	71
Estrutura	72
Utilização	75
Outputs Gráficos	77
6. ANÁLISE de Resultados	79
6.1. Perfis de Altitude	80

6.2.	Análise dos percursos de Condução Reais	82
6.3.	Análise dos Ciclos de Condução Normalizados	88
6.4.	Comparação de resultados entre os Ciclos Normalizados e percursos Reais ..	94
7.	Conclusões	99
7.1.	Principais Resultados e Conclusões.....	99
7.2.	Sugestões para trabalho futuro.....	101
8.	Bibliografia.....	103
ANEXO A	107
	Descrição dos Percursos de Condução Reais	107
ANEXO B	119
	CARTAS MILITARES	119
ANEXO C	125
	Resultados.....	125
ANEXO D	129
	Descrição dos Modelos MatLab/Simulink	129

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução do consumo energético mundial desde 2003 e previsão até 2030, por sectores	1
Figura 1.2 - Aumento das emissões de CO ₂ nos últimos 200 anos	3
Figura 2.1 - Motorwagen de Benz, o precursor do automóvel moderno.	8
Figura 2.2 - Linha de produção do Ford Model T, na sua típica cor negra, a única disponível após a implementação das linhas de montagem móveis em 1913, por permitir um tempo secagem inferior à das restantes cores.....	10
Figura 2.3 - Teste no dinamómetro de rolos.....	13
Figura 2.4 – Pormenor do tubo no escape para medição das emissões poluentes.....	14
Figura 3.1 - Ciclo de condução ECE 15	23
Figura 3.2 - Ciclo de condução EUDC com menos potência.....	23
Figura 3.3 - Ciclo de condução EUDC.....	24
Figura 3.4 - Ciclo WLTC Class 3.....	34
Figura 3.5 - Ciclo WLTC Class 2.....	35
Figura 3.6 - Ciclo WLTC Class 1.....	36
Figura 4.1 - Representação do ambiente gráfico do programa MQGPS.....	39
Figura 4.2 - “Tabula Geografica Portugalliae”. Feito por Álvaro Seco	44
Figura 4.3 - Localização de Portugal Continental na Projeção de Mercator	47
Figura 4.4 - Localização de uma posição por estimativa diretamente na Carta Militar (IGeoE) 1:25 000.....	48
Figura 4.5 - Aspeto da visualização do percurso recolhido em GPS no Google Earth..	50
Figura 5.1 - Sistema de eixos da SAE para o pneu (MILLIKEN, 1995)	54
Figura 5.2 - Sistema de eixos utilizado coincidente com o centro de massa do veículo	55
Figura 5.3 – Principais forças exteriores na direcção do movimento.....	55
Figura 5.4 - Variação dos coeficientes f_o e f_s em função da pressão dos pneus (GILLESPIE, 1992).....	57
Figura 5.5 - Variação da força de travagem normalizada F_x/W_z com a relação de escorregamento longitudinal S (Milliken e Milliken, 1995) e recta para um coeficiente K de 0.15.	58
Figura 5.6 - Ângulo de escorregamento lateral e força lateral imposta no pneu quando o veículo curva.....	59

Figura 5.7 – Variação do ângulo de escorregamento lateral com a aceleração lateral para um pneu desportivo (Milliken e Milliken, 1995) e recta utilizada no presente modelo.	60
Figura 5.8 – Variação do atrito de rolamento em curva com a aceleração lateral.....	61
Figura 5.9 – Exemplo de perfil de altitudes de um percurso fictício de 20 km, com 270 m de subidas acumuladas, 250 m de descidas e variação final positiva de 20 m.....	65
Figura 5.10 - Estrutura principal do programa <i>Driving Cycle</i>	72
Figura 5.11- "Print Screen" do Front-End	74
Figura 5.12 - Interface gráfica do módulo dos gráficos	77
Figura 6.1 – Distribuição VSP no percurso Citadino	83
Figura 6.2 – Distribuição VSP no percurso em EN.....	84
Figura 6.3 – Distribuição VSP no percurso em AE.....	86
Figura 6.4 – Distribuição VSP no ciclo NEDC	90
Figura 6.5 – Distribuição VSP no ciclo ECE 15	90
Figura 6.6 – Distribuição VSP no ciclo EPA 5 cycle.....	91
Figura 6.7 – Distribuição VSP no ciclo WLTP (classe 3).....	92
Figura 8.1 - Ilustração da vista de satélite do percurso citadino realizado na cidade de Guimarães.....	110
Figura 8.2 - Representação na vista de satélite do percurso realizado em EN	114
Figura 8.3 - Representação na vista de satélite do percurso realizado em AE	117
Figura 8.4 – Ex. da representação gráfica das curvas de nível numa carta topográfica	123
Figura 8.5 - Distribuição VSP no percurso citadino sem influência da altitude	128
Figura 8.6 - Distribuição VSP no percurso em Estrada Nacional sem influência da altitude	128
Figura 8.7 - Distribuição VSP no percurso em Auto-estrada sem influência da altitude	128

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Parâmetros dos ciclos ECE 15, EUDC e NEDC (Inc., DieselNet, Emission Standards » European Union, 2013).....	24
Tabela 3.2 - Comparação dos diferentes testes que são utilizados para estimar o consumo médio dos veículos a partir de 2008	28
Tabela 3.3 - Níveis dos limites de emissões poluentes (FTP; 150 000 milhas)	31
Tabela 3.4 - Características do ciclo WLTC Class 3.....	34
Tabela 3.5 - Características do ciclo WLTC Class 2.....	35
Tabela 3.6 - Características do ciclo WLTC Class 1.....	36
Tabela 4.1 - Exemplo da correspondência dos dados retirados das Cartas Militares com distância no percurso	50
Tabela 4.2 - Exemplo da interpolação efetuada aos dados de altitude	51
Tabela 6.1 - Comparação dos valores de potências específicas dos percursos reais.....	86
Tabela 6.2 - Valores máximos de potências específicas dos percursos reais sem variação da altitude e sem atrito em curva	86
Tabela 6.3 - Classificação dos percursos reais considerando apenas as características do percurso	88
Tabela 6.4 - Potências específicas máximas dos ciclos normalizados	92
Tabela 6.5 - Classificação dos ciclos normalizados considerando apenas as características do percurso	93
Tabela 6.6 - Comparação das características entre os ciclos normalizados e os percursos reais.....	95
Tabela 6.7 - Comparação dos valores máximos das potências específicas entre ciclos normalizados e reais	96
Tabela 6.8 - Comparação das características entre o ciclo citadino real e o normalizado <i>ECE15</i>	97

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 - Aproximação da filtragem efetuada aos dados de aceleração lateral do percurso citadino.....	42
Gráfico 4.2 - Aproximação da filtragem efetuada aos dados da velocidade do percurso citadino	42
Gráfico 6.1 - Velocidade terminal do veículo de referência quando em descida em rolamento livre,.....	80
Gráfico 6.2 - Diferença dos dados de altitude no percurso Citadino.....	81
Gráfico 6.3 - Diferença dos dados de altitude no percurso realizado em EN.....	81
Gráfico 6.4 - Diferença dos dados de altitude no percurso realizado em AE.....	82
Gráfico 6.5 - Variação das diferentes potências específicas ao longo do percurso Citadino	83
Gráfico 6.6 - Variação das diferentes potências específicas ao longo do percurso em EN	84
Gráfico 6.7 - Variação das diferentes potências específicas ao longo do percurso em AE	85
Gráfico 6.8 - Comparação das diferentes energias específicas envolvidas nos percursos reais.....	87
Gráfico 6.9 - Diferentes energias específicas envolvidas nos percursos reais sem influência da altitude e atrito em curva	87
Gráfico 6.10 - Variação das diferentes potências específicas no ciclo NEDC.....	89
Gráfico 6.11 - Variação das diferentes potências específicas no ciclo EPA 5 cycle.....	91
Gráfico 6.12 - Variação das diferentes potências específicas no ciclo WLTP (classe 3).....	92
Gráfico 6.13 - Energias específicas dos ciclos de condução normalizados.....	94
Gráfico 6.14 - Comparação dos valores máximos das energias específicas entre ciclos normalizados e reais	96
Gráfico 6.15 - Comparação entre o ciclo citadino real e o normalizado <i>ECE15</i>	97
Gráfico 8.1 – Variação da altitude no percurso Citadino com a identificação dos pontos críticos	111
Gráfico 8.2 – Variação da altitude no percurso em EN com a identificação dos pontos críticos	114
Gráfico 8.3 – Variação da altitude no percurso em AE com a identificação dos pontos críticos	117

Lista de Abreviaturas e Siglas

AE	Auto Estrada
EN	Estrada Nacional
FFSBP	Friction Free Specific Braking Power
FFSPP	Friction Free Specific Pulling Power
GPS	Global Positioning System
IgeoE	Instituto Geográfico do Exército
LOESS	Locally Weighted Scatterplot Smoothing
mFFSBP	maximum Friction Free Specific Braking Power
mFFSPP	maximum Friction Free Specific Pulling Power
mRVSBP	maximum Reference vehicle Specific Braking Power
mRVSP	maximum Reference vehicle Specific Pulling Power
NEDC	New European Driving Cycle
RRC	Rolling Resistance Coefficient
RVSBE	Reference Vehicle Specific Braking Energy
RVSPE	Reference Vehicle Specific Pulling Energy
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VSP	Vehicle Specific Power
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures

Lista de Símbolos

a	Aceleração	m/s ²
b	Distância entre o centro de gravidade do veículo e o eixo dianteiro	m
c	Distância entre o centro de gravidade do veículo e o eixo traseiro	m
f_0	Coefficiente básico de resistência ao rolamento livre	
f_R	Coefficiente de resistência ao rolamento livre	
f_S	Coefficiente que representa o efeito da velocidade	
h	Altura do centro de gravidade do veículo	m
k	Declive da reta da relação de escorregamento longitudinal	
u	Velocidade longitudinal do veículo	m/s
u_{\square}	Velocidade do veículo em relação ao vento	m/s
A_F	Área frontal	m ²
C_D	Coefficiente de penetração aerodinâmica	
C_{α}	(do inglês cornering stiffness) constante de curva	
CC_{α}	(do inglês cornering coefficient) coeficiente de curva	
E	Energia	J
E_{atrito}	Energia dissipada devido ao atrito do veículo	J
E_{DRAG}	Energia dissipada devido à resistência aerodinâmica	J
E_{GRADE}	Varição da energia potencial no circuito	J
E_M	Energia motora	J
E_R	Energia dissipada devido à resistência de rolamento	J
E_{R1}	Energia dissipada devido à resistência de rolamento livre	J
E_{R2}	Energia dissipada devido ao escorregamento longitudinal do pneu	J
E_{RY}	Energia dissipada devido ao escorregamento lateral do pneu	J
E_T	Energia dissipada na travagem	J
E_{T-H}	Energia dissipada na travagem por fricção	J
E_{T-R}	Energia recuperada nas travagens	J

F	Força	N
F_{DRAG}	Resistência aerodinâmica	N
F_{GRADE}	Componente do peso do veículo paralela à estrada	N
F_R	Resistência de rolamento	N
F_{R1}	Resistência de rolamento livre	N
F_{R2}	Resistência fictícia devido ao escorregamento longitudinal	N
F_{RY}	Resistência fictícia devido ao escorregamento lateral	N
IR	Inércia de rotação	
L	Distância entre eixos do veículo	m
M	Massa do veículo	kg
P	Potência	W
R	Raio das curvas do circuito	m
R_e	Raio efetivo de rolamento do pneu	m
R_l	Raio com o pneu carregado	m
RRC	Coeficiente básico de resistência ao rolamento livre	
S	(do inglês slip ratio) relação de escorregamento longitudinal	
T	Binário	N.m
W	Peso do veículo	N
α	(do inglês slip angle) Ângulo de escorregamento longitudinal	rad
θ	Inclinação da estrada	rad

Subscritos

in	Valores de entrada na roda
X	Direção longitudinal no sistema de eixos utilizado
X, T	Tração na direção longitudinal
X, B	Travagem na direção longitudinal
Y	Direção lateral no sistema de eixos utilizado
Z	Direção vertical no sistema de eixos utilizado
f	Refere-se às rodas dianteiras
r	Refere-se às rodas traseiras

1. INTRODUÇÃO

1.1. Panorama Energético Mundial

Desde sempre que o homem necessitou de energia para as suas diversas atividades. Mas se inicialmente as energias que utilizava eram as que disponha na natureza: lenha, força motriz das águas dos rios e do vento; com a utilização das energias fósseis como o carvão e o petróleo iniciou-se uma nova etapa no consumo de energia. A existência na natureza de grandes quantidades de energia de origem fóssil, explorada a preços reduzidos sobretudo a partir do século XVIII, segundo diversos autores, levou à aceleração do desenvolvimento da sociedade humana até aos níveis atuais.

Os grandes avanços tecnológicos ocorridos após a revolução industrial resultaram num crescimento económico e populacional até aí nunca visto. Este crescimento fez com que uma grande percentagem da população abandonasse os meios rurais e se concentrasse nas grandes cidades. Com a sociedade a tornar-se cada vez mais industrializada, e com o aumento exponencial da população, o consumo energético a nível mundial sofreu um forte aumento nas últimas décadas do século XX. Segundo a Agencia Internacional de Energia (IEA) prevê-se que esse consumo continue a aumentar nas próximas décadas, em cerca de 60% até 2030 em relação ao ano de 2003.

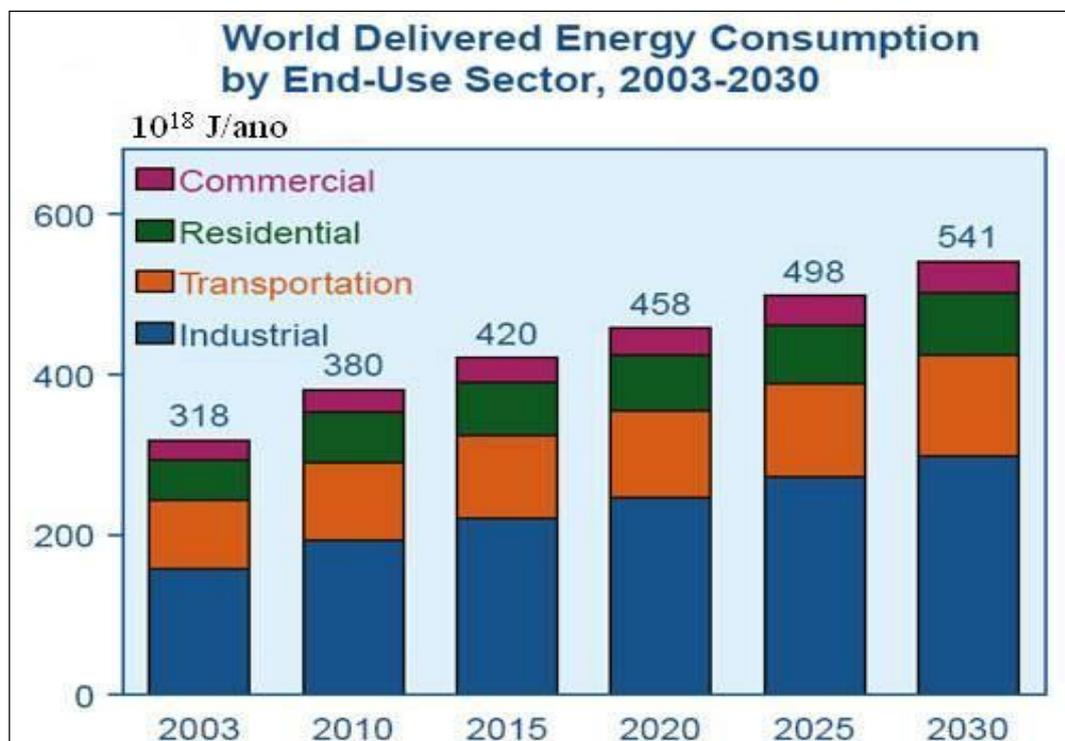


Figura 1.1 - Evolução do consumo energético mundial desde 2003 e previsão até 2030, por sectores

Se, por um lado a procura crescente de energia por todas as economias, e em especial pelas emergentes, provoca uma subida global dos preços internacionais das energias disponíveis, por outro lado há cada vez mais evidências científicas de que o modelo energético atual, incluindo as atuais tecnologias, está a provocar mudanças climáticas no nosso planeta, com implicações que atualmente já são visíveis, mas que no futuro poderão ter um impacto ainda mais acentuado. Na opinião de diversas organizações ambientalistas, estas mudanças climáticas estarão a provocar o aumento de fenómenos climáticos adversos tais como tempestades, secas e inundações. O aumento da temperatura na terra também estará a provocar uma perda acelerada das suas massas de gelo, conduzindo à subida do nível do mar e pondo em perigo as zonas costeiras e ilhas.

1.2. Sector dos Transportes

A evolução do nível de vida das populações levou a que fosse necessário a utilização diária dos automóveis por questões de trabalho ou de foro pessoal. Assim foi necessário recorrer à produção em massa de automóveis de baixo custo, de fácil manutenção, que fosse capaz de percorrer grandes distâncias e que recorresse a uma fonte de energia barata e abundante.

Em 1900, apenas 1/4 dos 4200 automóveis produzidos nos EUA estavam equipados com um motor de combustão interna. Esta proporção rapidamente se inverteu e na primeira metade do séc. XX com o motor de combustão interna a impor-se às restantes alternativas de motorizações, tais como as motorizações a vapor e elétrica. Isto porque, o motor de combustão interna recorria a uma fonte de energia mais barata e de maior densidade do que as restantes, e que se pensava na altura que fosse inesgotável.

Ao longo dos anos, e à medida que o consumidor aumentava as suas exigências, a indústria automóvel desenvolveu automóveis maiores, mais pesados e, simultaneamente, adicionou equipamento suplementar, tal como, o ar condicionado, a transmissão automática e a direção assistida, o que contribuiu para aumentos no consumo de combustível.

Estes aumentos, em conjunto com o crescimento exponencial do número de automóveis traduziu-se num grande aumento do consumo de combustíveis fósseis, o que provocou um forte aumento das emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa.

Em 2011 a energia consumida pelo sector dos transportes, a nível global, correspondeu a 27.4% do consumo de energia final e foi responsável por 22.3% das emissões de CO₂ por

combustão (IEA, 2013), que é considerado o principal responsável pelo efeito de estufa. Estes valores são superiores nas economias mais desenvolvidas, atingindo os 31.8% e os 35.6% nos balanços de energia final e os 25.3% e os 35.5% nas emissões de carbono por combustão, respetivamente na UE28 e em Portugal em 2012 (EPocketbook, 2014; EPocketbook/Tranports, 2014). Associadas ao funcionamento existe ainda formação e emissão de poluentes nocivos para a saúde humana, nomeadamente de partículas finas, óxidos de azoto e compostos aromáticos, que têm levado à degradação da qualidade do ar, ao ponto de se tornar numa séria ameaça para a saúde pública em muitas cidades e regiões europeias.

Como resultado destes acontecimentos, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera aumentou cerca de 30% nos últimos duzentos anos, e estima-se que ao ritmo atual a sua concentração irá duplicar o valor de 1750 até ao fim deste século, o que resultará num acréscimo da temperatura média global de cerca de 1,4 °C. (Ferreira, 2010)

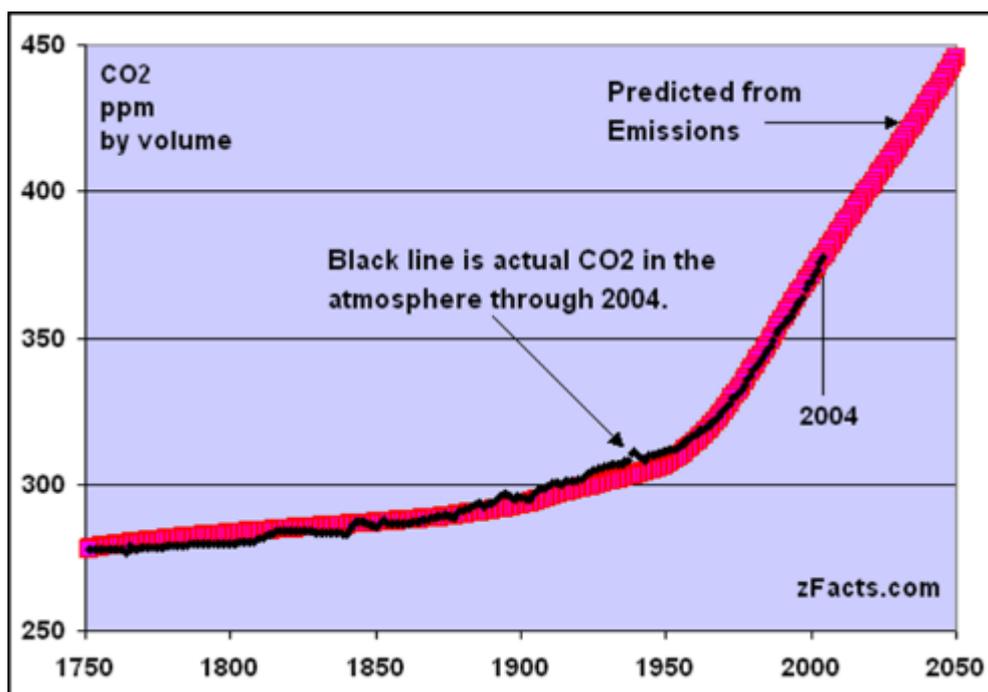


Figura 1.2 - Aumento das emissões de CO₂ nos últimos 200 anos

A possibilidade destas alterações climáticas se verificarem começaram a gerar um clima de preocupação, tanto na sociedade civil como a nível governamental.

Assim, para travar o aumento contínuo das emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa, as entidades internacionais começaram a trabalhar no sentido de diminuírem os impactos negativos destas emissões. Uma das mais importantes medidas tomadas foi a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997. Este tratado inclui vários acordos e metas de

redução das emissões dos gases que provocam o efeito de estufa. O tratado foi revisto em a 31 de Agosto de 2007 e as metas acordadas na reunião do G8 foi a de reduzir, pelo menos, para metade as emissões antropomórficas globais de CO₂ até 2050. (Kyoto Protocol, 2014)

Neste âmbito e também para reduzir a dependência da importação do petróleo, a União Europeia (UE) necessita de reduzir entre 80 a 90% as emissões de gases com efeito de estufa, com base nos níveis registados no ano de 1990, até ao ano de 2050. Para o sector dos transportes será necessário uma redução de 60%, ou de 70% em relação aos registados em 2008. Este foi o único sector em que as emissões de gases com efeito estufa aumentaram desde 2005, tendo-se registado um aumento de 30% em contraciclo com a redução de 7% nos outros sectores de atividade. Na UE, a dependência do petróleo no sector dos transportes foi de 93.5% em 2012 (EPocketbook, 2014)

Na comunidade internacional, o objetivo é atingir a meta dos 3 litros de combustível por cada 100 km percorridos, ou 80 milhas por galão (EUA), para o consumo médio dos veículos ligeiros de passageiros. Nos EUA este valor equivale a reduzir para um terço o consumo de combustível do veículo médio em comparação com os valores registados no ano 2000. Na Europa e no Japão, onde os carros são mais pequenos e eficientes, este valor equivale a reduzir para metade o consumo de combustível.

Para conseguir atingir estas metas de consumo é necessário a utilização de técnicas avançadas que levem à redução do peso dos veículos, da resistência aerodinâmica, da resistência ao rolamento e melhorem a eficiência dos motores. Ao mesmo tempo é necessário encontrar novas formas de energia final que substituam os derivados do petróleo (e.g. gás natural, biocombustíveis, eletricidade, hidrogénio, etc.) e assim diminuir a quase total dependência do sector dos transportes deste tipo de energia fóssil. A simples introdução de veículos elétricos, sobretudo em países onde a produção de eletricidade tenha uma elevada percentagem de fontes renováveis ou nuclear, seria um bom contributo.

Para garantir que as marcas automóveis invistam nestas novas tecnologias, os governos definiram regulamentos a que os fabricantes de automóveis passaram a estar sujeitos: nos EUA essa regulamentação é conhecida pelo seu acrónimo CAFE (*Corporate Average Fuel Economy standards*). Na UE a regulamentação CE443/2009 (alterada pela

UE333/2014) impõe que a média da frota de veículos ligeiros de passageiros novos não ultrapasse, em emissões de CO₂, os 130 gCO₂/km em 2015 e os 95 gCO₂/km em 2021.

Esta regulamentação define as metodologias das medições para a classificação e certificação dos veículos novos, que se baseia em circuitos de condução normalizados e ensaios em laboratório. No entanto, estes circuitos normalizados têm sido criticados por serem demasiado simples e irrealistas, levando a consumos e emissões certificadas muito inferiores aos verificados na utilização real do veículo (Mock, 2012). O problema tem-se agravado no caso dos veículos mais recentes e económicos (Ntziachristos, 2014) pelo que urge definir novos circuitos normalizados que estejam mais em acordo com os estilos de condução atuais, bem como rever toda a metodologia dos testes em laboratório.

1.3. Objetivos do presente trabalho

O principal objetivo do presente trabalho é a definição de uma metodologia para a caracterização energética de ciclos de condução de veículos automóveis, que permita uma comparação objetiva entre os ciclos normalizados utilizados nos ensaios de certificação e os obtidos por gravação de percursos reais. Assim, e na sequência de trabalhos anteriores realizados no DEM sobre simulação energética de veículos, foram definidos os seguintes objetivos parcelares:

- 1) Uma revisão da literatura sobre os ciclos normalizados utilizados em diferentes países, bem como dos procedimentos utilizados na classificação energética de veículos novos;
- 2) A descrição do modelo matemático anteriormente desenvolvido ambiente *MatLab/Simulink*, para a simulação energética de um veículo e sua adaptação para a aplicação da metodologia da caracterização energética;
- 3) O tratamento e filtragem dos dados recolhidos por um sistema GPS em três percursos reais: um circuito citadino, na cidade de Guimarães, um percurso entre a cidade de Guimarães e a de Braga pela estrada nacional 101, e outro entre as mesmas cidades mas utilizando a autoestrada A11. Estes percursos foram definidos com o objetivo de simular a condução real em diferentes situações de trânsito. Será dada particular ênfase ao tratamento dos dados da altitude;
- 4) A definição da metodologia de caracterização energética de ciclos de condução, incluindo parâmetros relevantes da circulação real, como as variações de altitude e a sinuosidade. O método deverá ser eficaz na obtenção de resultados sob a forma

de grandezas específicas, assim eliminando ou reduzindo a influência do tipo de veículo utilizado no teste;

- 5) Utilizando a metodologia definida, a comparação dos principais ciclos normalizados com os três percursos reais.

1.4. Organização da Dissertação

Logo depois da introdução, é apresentado nesta dissertação, no capítulo 2, uma revisão bibliográfica sobre os veículos, incluindo a sua história, assim como uma descrição de como é processado os testes de consumo e emissões atualmente na Europa assim como nos EUA.

No capítulo 3 será feita uma análise a diferentes ciclos de condução normalizados que são utilizados para a homologação de veículos, tanto na Europa como nos EUA e no Japão, porque são nestes mercados que se encontram os principais fabricantes de veículos mundiais.

Também neste capítulo é feita referência ao novo ciclo mundial de condução normalizado que está a ser preparado e está previsto que a sua versão final seja apresentada em Outubro de 2015.

É descrito também, no capítulo 3, como foi feito o levantamento e tratamento de dados dos ciclos reais utilizados, assim como uma descrição detalhada de cada um dos percursos efetuados revelando as suas especificidades e os seus pontos críticos.

No capítulo 4 é efetuada uma análise ao modelo energético que simula o funcionamento real do veículo com base nos dados de entrada e são descritas as variáveis de entrada e saída assim como são efetuados os cálculos dos diferentes tipos de energias e potências.

No capítulo 5 é feita a análise dos resultados obtidos através do modelo e é efetuada a comparação dos resultados dos ciclos reais com os resultados dos ciclos normalizados.

Por fim, no capítulo 6, serão apresentadas conclusões e sugestões para trabalho futuro.

2. CLASSIFICAÇÃO E CERTIFICAÇÃO DE VEÍCULOS

A definição de automóvel abrange todos os veículos rodoviários com autopropulsão, que têm como finalidade o transporte de passageiros e/ou carga. São habitualmente movidos por motores de combustão interna, que podem utilizar combustíveis líquidos ou gasosos como gasolina, gasóleo, biodiesel, álcool, gás natural e até hidrogénio. O sistema de propulsão pode ainda ser elétrico, híbrido, utilizar microturbinas a gás ou recorrer a motores de combustão externa como os motores Stirling ou motores a vapor.

O automóvel dos dias de hoje é de constituição muito completa e resulta de inúmeras invenções nas mais variadas artes e ciências, como a física, matemática, *design*, etc.

Em 2010 existiam aproximadamente 1015 milhões veículos automóveis a nível mundial (cerca de um carro para cada sete pessoas) que queimavam mais de 1000 milhões de m³ de gasolina/diesel de combustível por ano (Energy, 2012). Estes valores continuam a aumentar rapidamente, sobretudo na China e na Índia.

2.1. Evolução Histórica do Automóvel

Por volta de 1769, com a criação do motor a vapor, foram criados automóveis capazes de transportar humanos. Em 1807, os primeiros carros movidos por um motor de combustão interna a gás combustível começaram a aparecer o que levou à introdução em 1885 do moderno motor com combustão a gasolina.

A 29 de Janeiro de 1886, Karl Benz regista a primeira patente referente a um veículo automóvel equipado com um motor de combustão interna. Apesar de inúmeros cientistas e inventores terem contribuído anteriormente para o desenvolvimento do conceito de veículo motorizado (são conhecidos planos teóricos de Leonardo da Vinci e de Isaac Newton para um veículo desta espécie, cabendo a definição de primeiro automóvel à criação de Nicolas Joseph Cugnot, em 1769, de um veículo movido por um motor a vapor), e de os contemporâneos de Benz, Gottlieb Daimler e Wilhelm Maybach, desenvolverem independentemente projetos paralelos ao de Benz, a viatura por este patenteada é reconhecida como sendo o precursor do automóvel moderno.

Na verdade, no Motorwagen de Benz estão já presentes várias características normalmente associadas ao automóvel atual: um motor de combustão interna de gasolina e quatro tempos, equipado com uma cambota com contrapesos, ignição elétrica e arrefecimento a água.



Figura 2.1 - Motorwagen de Benz, o precursor do automóvel moderno.

A 8 de Março de 1886, Gottlieb Daimler, em conjunto com o seu sócio Wilhelm Maybach, completa a construção do primeiro automóvel de quatro rodas, onde instalam um motor a gasolina baseado no ciclo de quatro tempos inventado em 1876 por Nikolaus August Otto, também denominado por Ciclo de Otto. O motor inicialmente desenvolvido por Otto constitui outro marco no desenvolvimento do automóvel, estando o seu princípio de funcionamento na base de uma boa parte dos motores utilizados nos automóveis dos nossos tempos.

Apesar de pioneiros na criação dos primeiros automóveis comercialmente viáveis, Benz, Daimler e Maybach não se dedicaram de imediato à construção automóvel, focando inicialmente as suas atividades no desenvolvimento de motores que vendiam a outras empresas e cujas patentes licenciavam. Assim, os primeiros construtores a colocarem no mercado automóveis inteiramente desenvolvidos e construídos por si foram as empresas Panhard & Levassor e a Peugeot, ambas sediadas em França e fundadas em 1889 e 1891 respetivamente. A Panhard & Levassor construiu veículos equipados com embraiagem de acionamento por pedal, transmissão por corrente, com caixa de velocidades e radiador

frontal, tendo sido o primeiro construtor a utilizar um motor instalado na parte dianteira do veículo e tração nas rodas posteriores. Este sistema ficou conhecido como o *Système Panhard* e rapidamente passou a ser utilizado por outros fabricantes por permitir um maior equilíbrio do veículo e melhorias significativas na condução. A Panhard & Levassor é também responsável pela invenção da transmissão moderna.

Estes fabricantes produziam automóveis únicos, sendo que cada novo automóvel fabricado era diferente do anterior. O primeiro registo da uniformização da construção de um modelo aparece em 1894, com a produção de 134 unidades idênticas do modelo Benz Velo. Apesar do crescente aparecimento de construtores, o automóvel era ainda um produto restrito e dispendioso, estando apenas acessível aos verdadeiramente ricos.

No início do séc. XX dá-se início aos primeiros esforços para a produção automóvel em massa. Em Detroit é fundada por *Ransome Eli Olds a Olds Motor Works*. Olds inventa o conceito de linha de montagem e aplica-o à produção automóvel, surgindo assim o primeiro automóvel produzido em massa nos Estados Unidos, o *Curved Dash Oldsmobile*, do qual foram produzidas 425 unidades em 1901. O conceito de linha de montagem seria mais tarde desenvolvido e otimizado por Henry Ford.

Em 1 de Outubro de 1908, a *Ford Motor Company* apresenta em Detroit o modelo que iria definitivamente marcar o início da democratização do automóvel: o Ford Modelo T. Para além das muitas inovações que apresentava, o Modelo T era vendido por um valor suficientemente baixo para ser acessível à classe média americana. Com a implementação em 1913 das inovadoras linhas de montagem móveis, Ford assegura um aumento de eficiência e redução de custos que lhe permitem colocar o seu Modelo T a um preço ainda mais baixo, tornando-o no automóvel com maior sucesso comercial até então. Em 1918, metade dos automóveis a circular nos EUA eram Modelos T, tendo sido produzidos mais de 15 milhões de unidades até à extinção do modelo em 1927.



Figura 2.2 - Linha de produção do Ford Model T, na sua típica cor negra, a única disponível após a implementação das linhas de montagem móveis em 1913, por permitir um tempo secagem inferior à das restantes cores.

Potenciada pelo desenvolvimento económico dos países industrializados após a 2.^a Guerra Mundial e pela consolidação de uma classe média com poder de compra, a utilização do automóvel sofre um acréscimo significativo. O automóvel torna-se no meio de transporte individual por excelência, estando na origem de uma verdadeira revolução nas sociedades industrializadas.

2.2. Classificação de Veículos de Passageiros

O objetivo da definição da categoria de veículos, para utilização em terra, é a regulamentação. A UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) classifica cada tipo de categoria, de veículos a motor e caravanas, por uma letra onde, caso haja necessidade, define cada subcategoria através de um número. Também define categorias especiais, aos quais não atribui nenhuma letra, que definem os veículos especiais. Assim as principais categorias dos veículos, segundo a UNECE, são demonstrados no quadro a seguir, onde apenas a categoria M apresenta as suas subcategorias por se tratar dos veículos com maior representação.

CATEGORIA	DESCRIÇÃO
L	Veículos a motor com menos de quatro rodas
M	Veículos a motor com pelo menos quatro rodas e usados para o transporte de passageiros
M1	Veículos destinados ao transporte de passageiros que não tem mais de oito lugares sentados, além do lugar do condutor
M2	Veículos destinados ao transporte de passageiros com mais de oito lugares, além do lugar do condutor, e uma massa máxima não superior a 5 toneladas
M3	Veículos destinados ao transporte de passageiros com mais de 8 lugares, além do lugar do condutor, e uma massa superior a 5 toneladas
N	Veículos a motor com pelo menos quatro rodas e usados para o transporte de mercadorias
O	Atrelados
	Veículos para fins especiais ¹
T	Tratores para agricultura e florestais ²
	Maquinaria móvel não usada em estrada ³
G	Veículos todo o terreno ⁴⁵
	Autocaravana
	Veículo Armado
	Ambulância
	Carro Fúnebre

¹ Um veículo da categoria **M,N** ou **O** usado para o transporte de passageiros ou mercadorias e para desempenhar uma função especial, para o qual são necessárias modificações ao seu formato, ou equipamentos especiais.

² Um veículo a motor que tem pelo menos dois eixos cuja função depende essencialmente na sua potência de tração, que foi especialmente projetado para puxar, empurrar, carregar ou atuar em certas alfaias, maquinas ou reboques destinados à agricultura ou reflorestamento.

³ Qualquer máquina móvel, equipamento industrial transportável, ou veículo sem carroçaria, não destinado ao transporte de passageiros ou mercadorias na estrada, em que um motor de combustão interna está instalado.

⁴ Veículos de todo o terreno são considerados veículos da categoria **M** e **N**.

⁵ Os símbolos das categorias **M** e **N** podem ser combinados com o símbolo da categoria **G**. por exemplo, um veículo da categoria **N1G** que é adequado para o uso fora de estrada pode ser designado como **N1G**.

2.3. Certificação de Consumos e Emissões

A homologação dos veículos é algo que os fabricantes de automóveis têm de cumprir para poderem vender o seu produto em cada país. São definidos por legislação e administrados por um órgão governamental. A homologação diz respeito a aspetos como a iluminação, controlos, resistência aos choques, proteção do meio ambiente e proteção contra roubo.

Existem diversos tipos de homologações que podem ser internacionais ou nacionais. Eis alguns exemplos:

- Internacionais
 - ECE (*United Nations Economic Commission for Europe*);
 - EU (EG-Directive);
- Nacionais
 - USA (FMVSS) administrado pela U.S. *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) que também gere o modelo do *Corporate Average Fuel Economic* (CAFE);
 - Canadá (CMVSS);
 - China (*Guobiao Standards*);
 - Coreia do Sul (KMVSS);
 - Austrália (ADR, *Australian Design Rules*);
 - Japão (*Test Requirements and Instructions for Automobile Standards*);
 - Índia (*AIS, Automotive Industry Standards*).

Os primeiros passos para a harmonização dos regulamentos internacionais foram feitos em 1952, quando foi criado um grupo de trabalho composto por especialistas em requisitos técnicos de veículos, o WP.29. Isto resultou no acordo de 1958 sobre as condições uniformes de homologação e levou ao reconhecimento mútuo de homologações de veículos, componentes e peças. Houve um novo acordo, em 1998, cujos objetivos eram melhorar a segurança global, diminuir a poluição do meio ambiente, diminuir o consumo de energia e melhorar o desempenho antirroubo de veículos e seus componentes através da criação de regulamentos técnicos globais (Global Technical Regulations - GTRs), baseados em regulamentos da UNECE ou nas regulamentações nacionais, listadas num compêndio e harmonizá-los ao mais alto nível. Em 2000, o WP.29 tornou-se o *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations* que é um grupo de trabalho da *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE).

A certificação do consumo de combustível, das emissões de CO₂ e das emissões de poluentes faz parte do processo de homologação de um veículo automóvel e tem-se tornado cada vez mais importante. Esta certificação é obtida por teste em laboratório através da aplicação de um procedimento especificado pela lei em vigor no respetivo país ou espaço económico, designado de processo de aprovação ou *Type-Approval (TA) Proces*. No entanto, o procedimento seguido nos EUA é bastante diferente e mais exigente do que o utilizado na Comunidade Europeia.



Figura 2.3 - Teste no dinamómetro de rolos

O teste é realizado com o veículo colocado sobre um dinamómetro de rolos, com a prévia introdução das características de inércia e de atrito do veículo, tendo um condutor experimentado de seguir um determinado ciclo de condução normalizado (velocidade em função o tempo), simulando assim a carga do veículo na estrada. Na União Europeia, as medições do consumo, emissões de CO₂ e de poluentes nos gases de escape, seguem os procedimentos regulamentados pela própria UE e pela UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*). Um documento fundamental neste processo é o regulamento EC 715/2007.

O teste é normalmente efetuado nas instalações do fabricante sob a supervisão de uma autoridade técnica do serviço do respetivo membro da UE a que pertence o fabricante. Se o procedimento de teste prescrito for seguido, se as tolerâncias requeridas forem cumpridas e os limites não foram excedidos, a certificação será concedida pela autoridade responsável pela homologação nacional. Dentro de condições bem definidas a certificação de um modelo de veículo pode ser estendida a outros modelos semelhantes

do mesmo fabricante. A vantagem para o fabricante é que neste caso apenas um modelo de veículo é testado enquanto a certificação é concedida a vários modelos de uma só vez. Uma dessas condições é que o nível de emissões de CO₂ medido pelos serviços técnicos não pode exceder em 4% os níveis da homologação. Se o fabricante não prevê a necessidade de medidas adicionais então corre o risco desta tolerância permitida ser excedida e assim ser acusado de declarar, na ficha de homologação, um valor de consumos ou emissões de CO₂ menor do que o testado.



Figura 2.4 – Pormenor do tubo no escape para medição das emissões poluentes

A aplicação de um procedimento de teste normalizado igual para todos os veículos em todos os Estados membros da UE, e não só, tem a vantagem da repetibilidade e comparação de resultados. O ciclo de condução que é usado para simular o padrão de condução dos veículos testados, o *New European Driving Cycle* (NEDC), é sempre o mesmo e portanto assegura que o valor de CO₂ de um veículo é diretamente comparável com outro veículo. No entanto o ciclo de condução NEDC não é representativo das condições de condução na vida real, pois apresenta um padrão de velocidades de condução muito suave, com acelerações fracas, longos períodos com velocidades de cruzeiro constantes e muitos eventos a baixa velocidade.

Como resultado disto, os níveis de consumo de combustível e CO₂ medidos com recurso ao NEDC também não são representativos dos obtidos da condução na vida real.

Outro problema com a homologação dos valores de emissões é a flexibilidade do procedimento de teste. Um exemplo é a temperatura ambiente durante o teste, que pode atingir os 30°C. Num estudo recente foi descoberto que uma temperatura ambiente de

22°C, em vez de 28°C, pode levar a emissões de CO₂ 4% superiores (Überwachungsverein, 2010). Isto corresponde a aproximadamente a uma diferença de 6 g/km para um veículo novo de média dimensão.

Algumas flexibilidades poderiam ter relevância no passado mas atualmente são um anacronismo. Por exemplo, em vez de usar a massa real do veículo para o teste, este é categorizado com uma classe de inércia o que permite programar o dinamómetro para uma massa que chega a ser 150 kg inferior à real. Isto, historicamente, fazia sentido porque se usavam dinamómetros mecânicos, que simulavam a inércia do veículo pendurando pesos nos dinamómetros. Atualmente são usados dinamómetros eletrónicos que podem simular qualquer massa. A continuação do uso de classes de inércia não é tecnicamente necessário e pode resultar em valores de CO₂ que podem diferir em cerca de 4-8 g/km comparados com os valores reais. (International Transport on Clean Transportation, 2011a)

Por fim, é necessário que as autoridades façam testes de controlo e apliquem sanções aos fabricantes, caso seja necessário, para evitar que estes preparem um protótipo para a homologação quando na realidade a versão de produção desse modelo é diferente nas características essenciais tais como nas emissões de CO₂.

Até um certo ponto isto é coberto pelos requisitos da Conformidade da Produção e uma obrigação do programa de Conformidade *In-Service*, ambos realizados pelo fabricante e averiguados pela autoridade de homologação. Mesmo assim, algumas diferenças entre veículos de pré-produção para homologação e os de produção são permitidas ou difíceis de monitorizar, tais como a programação especial da unidade de controlo do motor (ECU), que pode incluir o funcionamento da caixa automática, de modo a garantir a operação do motor nos pontos ótimos durante o teste (mas não necessariamente na condução na vida real) ou a resistência de rolamento dos pneus. O sistema de legislação na UE está implementado de maneira a que uma vez que a homologação seja atribuída não pode ser retirada, exceto em casos sérios de não cumprimento.

Outro dos problemas com estas flexibilidades permitidas é que enquanto um fabricante pode usar todo o seu conhecimento técnico para obter emissões de CO₂ mais baixas, outro pode optar por uma abordagem mais conservativa no “espírito” do procedimento de teste. Esse fabricante conservador, que anunciou valores de emissões de CO₂ que reflitam melhor a condução na vida real, corre o risco de se encontrar numa situação de desvantagem competitiva. Isto pode levar a uma situação em que valores de teste de

diferentes fabricantes não possam ser diretamente comparados entre si. Além disso, dependendo da pressão a que os fabricantes forem submetidos para cumprirem metas de emissões de poluentes, estes podem tornar-se mais agressivos na exploração da flexibilidade no teste de homologação, de maneira a que valores de teste de um dado ano não possam ser comparados com valores do mesmo teste do ano anterior.

Uma das flexibilidades que os fabricantes mais exploram é na maneira como o valor do atrito em rolamento livre é determinado. Nos EUA o atrito é definido experimentalmente, fazendo o veículo acelerar até aos 120 km/h, colocando-o em ponto morto e avaliando a evolução da velocidade no tempo até à sua paragem, obtendo-se assim uma curva de desaceleração. Utilizando a massa atual do veículo é então possível a determinar uma curva parabólica para a força de resistência total ao rolamento, como função da velocidade. De cada vez que um veículo é testado em laboratório, o dinamómetro é ajustado com a introdução da equação parabólica de maneira a que o valor do atrito de rolamento seja simulado. Evidentemente, há incentivo a que os fabricantes explorem toda a flexibilidade na determinação do valor do atrito em rolamento livre. Por exemplo, este pode ser reduzido diminuindo o peso do veículo de teste, removendo partes do carro que afetem negativamente a aerodinâmica, preparando os travões para evitar perdas parasíticas, usando um alinhamento de direção otimizado, colocando pneus de baixa resistência e com pressões elevadas. Nenhuma destas medidas é proibida, dependendo o resultado da criatividade do fabricante em função das possibilidades e tolerâncias do teste. Na UE a situação ainda é mais grave, pois não é sequer necessário um ensaio experimental, sendo o fabricante a definir os parâmetros para a equação de atrito.

Como consequência os veículos testados no dinamómetro têm valores de consumo e emissões de CO₂ menores do que os veículos reais não otimizados.

A Universidade de Graz (TU Graz) testou alguns veículos de passageiros e descobriu que a diferença nos valores de emissões de CO₂, entre o seu teste e o teste de homologação eram em média 17% superiores, variando entre +9 a +24%. (Zallinger, 2009)

Reduzir os valores de CO₂ na homologação, explorando as flexibilidades permitidas, é mais barato do que fazer alterações técnicas para os reduzir nos veículos reais. Sendo assim estas medidas secundárias provavelmente serão utilizadas antes que sejam feitas quaisquer alterações técnicas aos veículos. O resultado do uso abusivo das flexibilidades durante os testes é que os valores de consumo e das emissões de CO₂ nas homologações

estão a tornar-se irrelevantes para o consumidor, tornando-se uma diretriz enganadora para os formuladores de políticas quando se discutem as metas futuras de emissões.

3. CICLOS DE CONDUÇÃO NORMALIZADOS

3.1. Introdução

Para a implementação da legislação, que permita regular as emissões de gases poluentes, que incluísse todos os modelos de veículos disponíveis no mercado, foram criados mecanismos que permitem comparar os diversos modelos. Estes procedimentos de teste chamam-se circuitos de condução, ou *Driving Cycles*.

Um ciclo de condução, geralmente, representa um conjunto de pontos de velocidade do veículo em função do tempo. É usado para avaliar o consumo de combustível e emissões poluentes de um veículo de maneira normalizada, de modo a que diferentes tipos de veículos possam ser comparados. O percurso de condução está segmentado em pequenos intervalos de tempo nos quais a aceleração é considerada constante. Como resultado, a velocidade varia linearmente com o tempo em cada intervalo. Devido à velocidade e aceleração serem conhecidas para cada intervalo de tempo, a energia mecânica requerida em função do tempo pode ser determinada através de fórmulas.

O ciclo de condução é realizado num laboratório num dinamómetro. No caso de veículos com motor de combustão interna, o consumo de combustível e as emissões podem ser diretamente medidos. As emissões poluentes provenientes do escape são recolhidas e analisadas para assim avaliar as taxas de emissões. O mesmo se aplica a veículos híbridos movidos pela transformação de combustível. A energia primária pode ser calculada a partir do consumo de combustível.

Nos testes realizados a veículos comerciais, o ciclo de condução não é realizado num dinamómetro de veículos, mas sim num dinamómetro de motores. Assim o consumo e as emissões poluentes são avaliados através de uma série de pontos de binário e velocidade motor em vez de apenas uma série de pontos de velocidade do veículo.

Existe dois tipos e ciclos de condução, os ciclos modais, tais como o Europeu *Standard NEDC*, ou o Japonês *10-15 Mode*, e os ciclos transientes, tais como o *FTP-75* ou o ciclo *ARTEMIS*. A principal diferença é que os ciclos modais são uma compilação de aceleração em linha reta e de períodos de velocidade constante e não são representativos de comportamento de condução real, enquanto os ciclos transientes envolvem muitas variações de velocidade, típicas de condução em estrada.

Os ciclos utilizados no mundo podem ser divididos em três grupos:

- Ciclos de condução Europeus (EDC – *European Driving Cycles*);
- Ciclos de condução dos EUA (USDC – *United States Driving Cycles*);
- Ciclos de condução Japoneses (JDC – *Japanese Driving Cycles*).

3.2. Ciclos de Condução Europeus

Enquadramento

As primeiras metas de emissão de dióxido de carbono, para veículos ligeiros de passageiros, foram criadas em 1998/99 através de acordos voluntários entre a Comissão Europeia e a Indústria Automóvel representada por três associações de fabricantes: ACEA (*European Automobile Manufactures Association*), JAMA (*Japanese Automobile Manufactures Association*) e KAMA (*Korean Automobile Manufactures Association*). Estes acordos destinavam-se a atingir metas de emissões médias de CO₂ de 140 g/km até 2008/09. Enquanto nos anos seguintes à introdução deste acordo as reduções foram significativas, já em torno do ano 2004, os fabricantes de automóveis não estavam a cumprir as suas metas voluntárias. Como resposta a este impasse a Comissão Europeia desenvolveu um programa de redução de emissões de CO₂ obrigatório.

Dois conjuntos separados de regulamentos cobrem as emissões de CO₂ de automóveis ligeiros de passageiros e veículos comerciais ligeiros (LCV – *Light Commercial Vehicles*). Para automóveis ligeiros de passageiros a meta de emissões média de CO₂ é de 130 g/km, e cada fabricante de automóveis tem que a atingir até 2015 usando tecnologia automóvel. Para atingir a meta de emissões de CO₂ de 120 g/km, uma redução adicional de 10 g/km, poderão ser prestadas medidas adicionais, tais como o uso de biocombustíveis. Este regulamento é aplicável a automóveis ligeiros de passageiros da categoria M1, automóveis com no máximo 8 lugares além do lugar do condutor. As emissões de CO₂ são medidas ao longo do ciclo de condução NEDC.

A legislação para LCV (*Light Commercial Vehicles*) fixa uma meta de emissões média de CO₂ de 175 g/km, para a frota de veículos de cada fabricante, integralmente faseada até 2017. O regulamento é aplicável para veículos comerciais ligeiros da categoria N1, com massa de referência que não exceda os 2610 kg. As emissões são medidas durante o ciclo NEDC. (Inc., DieselNet, Emission Test Cycles, EU, 2013)

Os ciclos de condução europeus são ciclos teóricos, ou seja, não traduzem o que efetivamente se passa na realidade. Isto significa que algumas partes do ciclo são feitas a velocidade constante. Devido ao facto de estes ciclos não reproduzirem a realidade, foram

desenvolvidos um grupo suplementar de ciclos, os quais são designados por “HYZEM Cycles”.

Os ciclos de condução europeus são:

- **ECE15**

Este ciclo representa a condução em cidade. É caracterizado pela baixa velocidade média ($\bar{u} \approx 18.35$ km/h), pela baixa carga do motor e pela baixa temperatura dos gases de escape.

- **EUDC**

Este ciclo representa uma estrada extra urbana. No fim do ciclo o veículo acelera até à velocidade de auto-estrada. Tanto a velocidade como a aceleração são maiores que no ciclo ECE 15, mas continua a ser o ciclo teórico.

- **EUDCL**

Este ciclo representa uma estrada extra urbana para veículos de baixa potência. É similar ao ciclo EUDC, mas apresenta uma velocidade máxima de 90 km/h.

- **HYZEM**

Estes ciclos, por vezes podem não representar os parâmetros reais de condução. As partes a velocidade constante destes ciclos, são menores que nos ciclos teóricos. Estes derivam de circuitos reais na Europa. Estes ciclos são muito usados, mas não são oficiais. Estes ciclos são constituídos por um ciclo urbano, um extra-urbano e um que reflete a condução em auto-estrada.

- **ARTEMIS**

Este ciclo baseia-se num estudo estatístico feito na Europa dentro do chamado projeto ARTEMIS. É feito de três configurações distintas, além de uma variante adicional: o ciclo urbano, o rural, o autoestrada a 130 km/h e o da autoestrada a 150 km/h.

- **NEDC**

O NEDC (*New European Driving Cycle*) é um ciclo de condução concebido para avaliar os níveis de emissões de motores automóveis e a seu consumo de combustível em veículos de passageiros (excluindo camiões ligeiros e veículos comerciais pesados). É também referido como ciclo MVEG (*Motor Vehicle Emission Group*).

Este é um ciclo que combina alguns dos ciclos anteriores. Contém quatro ciclos ECE 15, seguidos de um EUDC ou um EUDCL.

O ciclo de condução NEDC, supostamente, representa o uso típico de um automóvel na Europa. É usado como referência para a homologação de veículos segundo a norma Euro6, na Europa e noutros países.

Procedimento de Teste

O procedimento de teste é certificado pela UNECE *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations*.

O ciclo utilizado é NEDC que é constituído por um fragmento urbano denominado ECE 15 e por um fragmento extraurbano, designado EUDC. O ciclo de condução ECE+EUDC, que também era conhecido como ciclo MVEG-A, foi introduzido em 1990 e usado para testes de aprovação de emissões e consumo de combustível para veículos comerciais ligeiros (Diretiva Europeia 90/C81/01). O teste era realizado num dinamómetro e o incluía quatro segmentos ECE repetidos (Figura 3.1) sem interrupção, seguido por um segmento EUDC (Figura 3.2). Antes do teste, era permitido ao veículo estar a uma temperatura ambiente de teste de 20-30°C durante 6 horas. De seguida era posto a trabalhar e deixado ao ralenti durante 40 segundos.

A partir do ano 2000, o período ao ralenti foi eliminado, isto é, a partir do momento em que o motor é posto a trabalhar, aos 0 segundos, também o teste de emissões é iniciado. Isto modificou o procedimento de arranque a frio e assim o teste foi denominado como *New European Driving Cycle* (NEDC), ou também ciclo de teste MVEG-B.

O teste completo começa, como já foi descrito anteriormente, com quatro repetições do ciclo ECE 15 (Figura 3.1). O ciclo ECE 15 é um ciclo urbano, também conhecido como UDC. Foi desenvolvido para representar a condução citadina, e.g. em Paris ou Roma. É caracterizado pela velocidade reduzida do veículo, baixa carga motor, e baixa temperatura dos gases de escape.

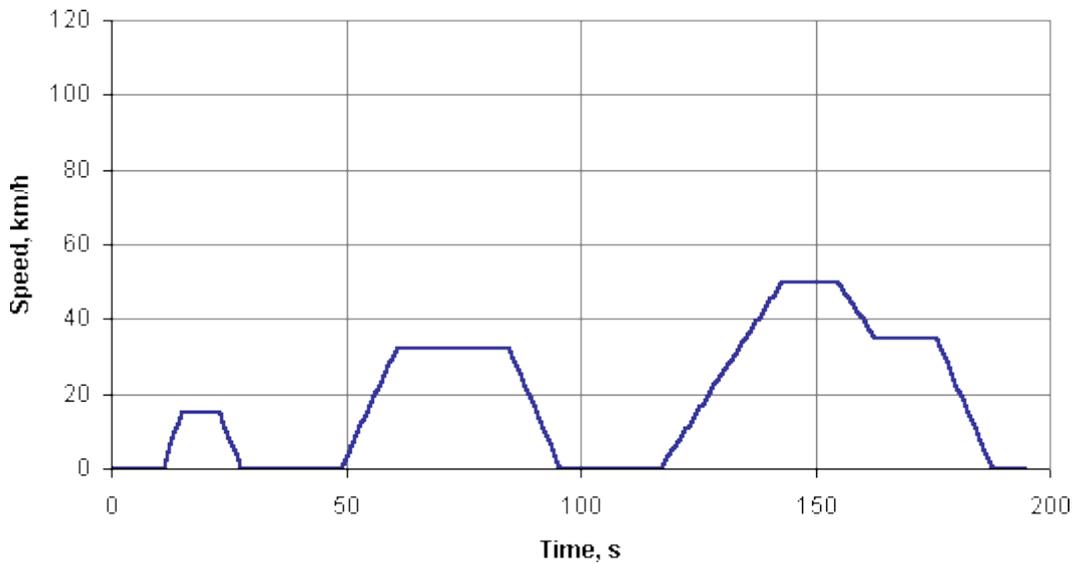


Figura 3.1 - Ciclo de condução ECE 15

O segmento EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*) foi adicionado, depois das quatro repetições do ciclo ECE 15, para simular os estilos de condução mais agressivos, e a condução a alta velocidade. A velocidade máxima do ciclo EUDC é de 120 km/h (Figura 3.3). Uma alternativa ao ciclo EUDC, para veículos com menos potência, também foi desenvolvido com uma velocidade máxima de 90 km/h (Figura 3.2).

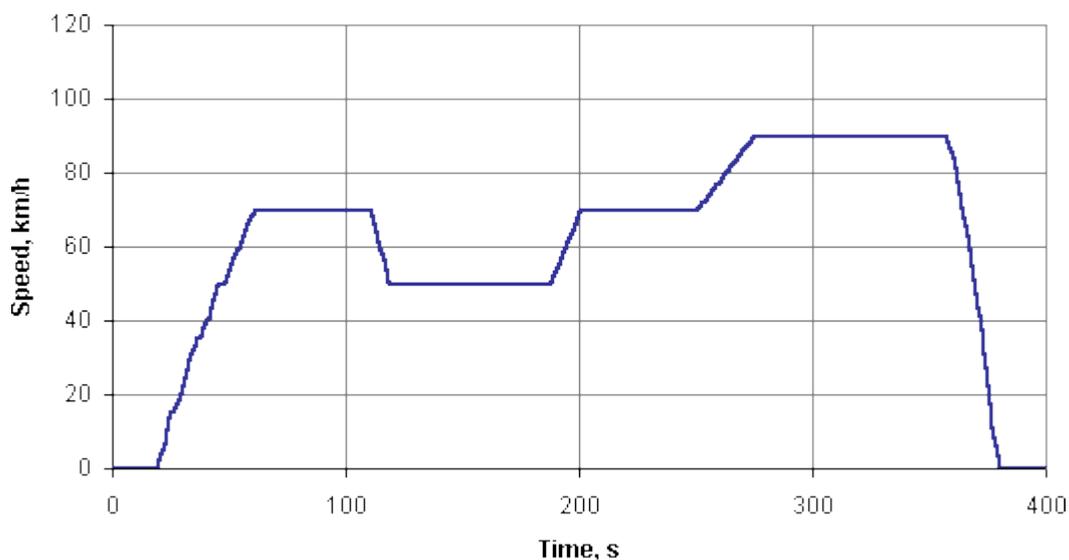


Figura 3.2 - Ciclo de condução EUDC com menos potência

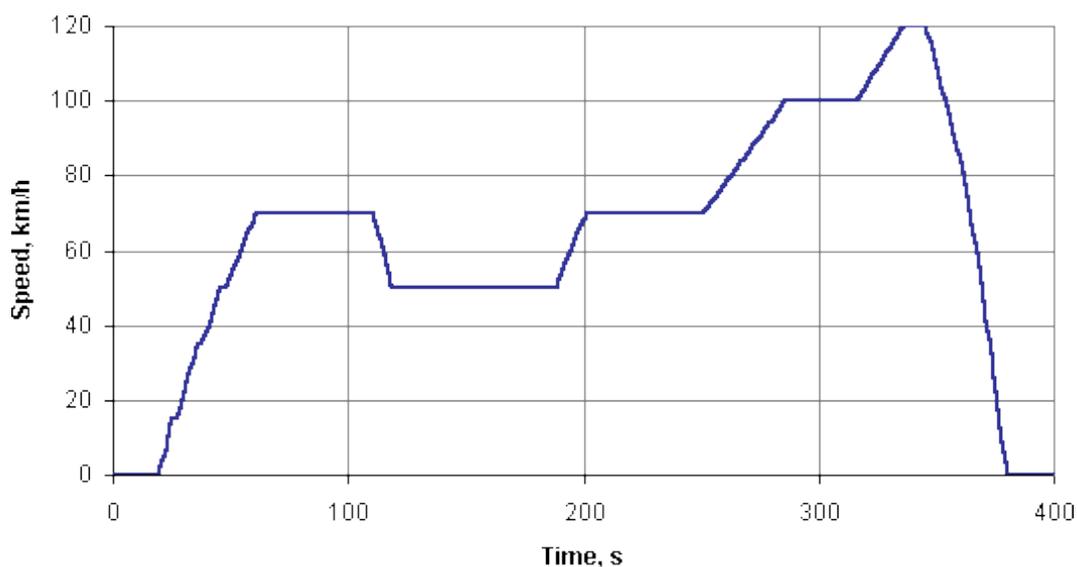


Figura 3.3 - Ciclo de condução EUDC

Durante o teste são recolhidas amostras de emissões de acordo com a técnica de recolha de amostras de volume constante (*CVS – Constant Volume Sampling*), analisadas, e expressas em g/km para cada um dos poluentes.

A tabela seguinte inclui um sumário de alguns parâmetros selecionados para os ciclos ECE 15, EUDC e NEDC.

Tabela 3.1 - Parâmetros dos ciclos ECE 15, EUDC e NEDC (Inc., DieselNet, Emission Standards » European Union, 2013)

Características	Unidades	ECE 15	EUDC	NEDC †
Distância	Km	0,9941	6,9549	10,9314
Tempo total	s	195	400	1180
Tempo em ralenti	s	57	39	267
Velocidade média (paragens incluídas)	Km/h	18,35	62,59	33,35
Velocidade média (paragens excluídas)	Km/h	25,93	69,36	43,10
Velocidade máxima	Km/h	50	120	120
Aceleração média ¹	m/s ²	0,599	0,354	0,506
Aceleração máxima ¹	m/s ²	1,042	0,833	1,042
† Quatro segmentos do ciclo ECE 15 seguido de um segmento do ciclo EUDC				
¹ Calculado usando o método da diferença central				

3.3. Ciclos de Condução dos EUA

Estes ciclos tentam representar o que se passa na realidade. Tal como os ciclos HYZEM, estes ciclos representam melhor os parâmetros de condução real que os ciclos de condução teóricos utilizados na Europa.

Os ciclos de condução americanos são:

- **FTP 72**

No início dos anos 70, este ciclo foi desenvolvido para representar um circuito urbano. A primeira fase deste ciclo representa um arranque a frio, esta fase é seguida por uma fase com muitos picos de velocidade. Este ciclo também é conhecido por FUDS, UDDS ou LA-4.

- **FTP 75**

Este ciclo é o ciclo FTP 72 com uma terceira fase. A última fase deste ciclo é igual à primeira fase do ciclo FTP 72, mas feita com o arranque do motor à temperatura ideal.

- **HWFET**

O Highway Fuel Economy Test (HWFET) é usado para avaliar a economia de combustível durante o ciclo de condução em autoestrada.

- **IM 240**

Este ciclo é usado durante as inspeções periódicas. Com este ciclo, as emissões dos veículos são determinadas durante estas inspeções.

- **LA 92**

Este ciclo, tal como o ciclo FTP 72 representa um percurso urbano. Este ciclo foi desenvolvido em 1992, com o objetivo de substituir o ciclo FTP 72, o qual se tinha tornado um ciclo irrealista na representação dos parâmetros modernos de condução urbana, ou seja, o ciclo LA 92 apresenta uma velocidade média mais elevada e acelerações mais vigorosas que o ciclo FTP 72.

- **NYCC**

Este ciclo pretende representar um circuito na cidade de Nova York. Tem muitas paragens e apresenta velocidades médias e máximas baixas.

- **US06**

Este ciclo é considerado um ciclo agressivo. Trata-se de um complemento ao que está em falta no ciclo FTP 75, já que este não contempla a condução em auto-estrada. Representa uma condução com cargas elevadas do motor. Com efeito, este ciclo tem uma velocidade de topo mais elevada, 130 km/h, e etapas de maior aceleração que representa um comportamento de condução muito mais agressivo.

- **SC03**

Este ciclo é utilizado como um procedimento suplementar para simular as emissões resultantes do uso do ar condicionado. Serve também como complemento ao ciclo FTP 75. O SC03 tem uma particularidade adicional, é realizado a 35 °C de temperatura ambiente. Isto é necessário para ter em conta o ar condicionado cálculo do consumo de combustível e no das emissões poluentes

Normas Federais

As normas federais para veículos, ou motores, incluindo as normas de emissão de gases de estufa, são estabelecidos nos EUA pela Agência de Proteção Ambiental (EPA). A EPA, para regular as emissões-e a qualidade do ar em geral- baseia-se na Lei do Ar Limpo (*Clean Air Act*), que sofreu a última alteração em 1990.

Os regulamentos de consumo de combustível são desenvolvidas pela *Highway Traffic Safety Administration Nacional* (NHTSA), que é um órgão do Departamento de Transportes dos EUA (DOT).

Regulamentos de emissão para novos veículos e motores

As normas de emissões nos EUA dividem nas seguintes categorias os novos veículos e/ou motores que estão sujeitos a regulação:

- Automóveis e veículos comerciais ligeiros: *Escalão 1 | Escalão 2 | Escalão 3 | Califórnia*;
- Veículos comerciais pesados e motores de autocarros;
- Motores Diesel móveis não rodoviários;
- Locomotivas;
- Motores marítimos;
- Pequenos motores de ignição inflamada (SSI): ≤ 19 kW;
- Grandes motores de ignição inflamada (LSI): > 19 kW;
- Motores Diesel estacionários (NSPS).

No presente trabalho apenas irá ser descrito em mais pormenor os diferentes níveis dos veículos comerciais ligeiros.

Automóveis e veículos comerciais ligeiros: Escalão 1

Dois conjuntos de normas foram definidos para automóveis e veículos comerciais ligeiros na *Clean Air Act Amendments* (CAAA) de 1990:

- Regras do *Escalão 1*, publicadas na sua configuração final a 5 de Junho de 1991, e postas em prática progressivamente de forma faseada de 1994 a 1997;
- Regras do *Escalão 2*, aprovadas a 21 de Dezembro de 1999, com implementação faseada de 2004 a 2009.

As regras do *Escalão 1* são aplicadas a todos os veículos ligeiros novos (VLN), como veículos de passageiros, veículos comerciais ligeiros, veículos utilitários desportivos (SUV), pick-ups e monovolumes. A categoria VLN inclui veículos com menos de 3855 kg de peso bruto (peso do veículo mais a capacidade de carga nominal). Os VLN são divididos nas seguintes subcategorias:

- Veículos de passageiros;
- Veículos comerciais ligeiros com peso bruto inferior a 2721 kg;
- Veículos comerciais ligeiros com peso bruto acima de 2721 kb.

Os limites de emissões do *Escalão 1* para automóveis e veículos comerciais ligeiros, são controlados através do ciclo **FTP 75** (*Federal Test Procedure*) e apresentados em g/milha. Conjuntos distintos de limites de emissões são definidos para cada categoria de veículo, com limites mais relaxados para veículos pesados.

Além do ciclo de teste FTP 75, foi introduzido gradualmente, entre 2000 e 2004, o ciclo SFTP (*Supplemental Federal Test Procedure*). O SFTP inclui ciclos adicionais para medir as emissões durante condução agressiva em autoestrada (US06) e as emissões em condução urbana, com o sistema de ar condicionado em funcionamento (SC03).

Após trinta anos a utilizar o mesmo tipo de ciclo de condução, a EPA finalmente desenvolveu um método para obter avaliações mais realistas para o consumo dos veículos que as que eram estimadas até ao momento. Este método entrou em vigor em 2008.

As avaliações até 2008 utilizavam o ciclo FTP75 para estimar o consumo médio em cidade e o ciclo HWFET para estimar o consumo médio em auto-estrada. Estes ciclos foram criados nos anos setenta, e como resultado o ciclo FTP75 apresenta uma velocidade

média de 34,13 km/h (21,2 mph). A parte deste ciclo com arranque a frio é realizado com o motor a 23,89 °C (75 °F), ou seja, à temperatura ambiente e é realizado com o ar condicionado e outros acessórios típicos dos carros modernos (e.g. rádio, sistema de navegação, etc.) desligados. O ciclo HWFET tem uma velocidade média de 77,76 km/h (48,3 mph) e também é realizado com o ar condicionado e acessórios desligados e envolve apenas acelerações suaves.

Como acontecia com as estimativas até 2008, as novas estimativas resultam em dois valores, um para o consumo médio em cidade e um para o consumo médio em autoestrada, os quais, são influenciados pelo uso do ar condicionado, pelo funcionamento a baixas temperaturas e pela condução com velocidades mais elevadas e acelerações fortes.

Para determinar os valores dos consumos médios em cidade e em autoestrada são utilizados a partir de 2008 cinco testes, nos quais o veículo funciona em condições diferentes. Os dois primeiros testes são iguais aos testes utilizados até 2008, ou seja, o primeiro teste utiliza o ciclo FTP75 para representar um circuito urbano, onde o veículo começa o ciclo com o motor frio e o segundo teste utiliza o ciclo HWFET para representar a condução em autoestrada, onde o veículo começa o ciclo com o motor quente (representa uma viagem longa). No terceiro teste, é utilizado o ciclo US06 para representar um percurso em autoestrada, onde a velocidade média e as acelerações são maiores que no ciclo HWFET (é um circuito agressivo). O quarto teste utiliza o ciclo SC03 para representar o uso do ar condicionado com uma temperatura ambiente de 35°C (95 °F) e sobre influência da radiação solar. Por fim, o quinto teste é idêntico ao primeiro, mas neste teste a temperatura exterior é muito inferior à do primeiro ciclo, ou seja, simula a condução em cidade sobre temperaturas muito baixas. Na Tabela 3.2 pode-se observar o que aqui foi descrito.

Tabela 3.2 - Comparação dos diferentes testes que são utilizados para estimar o consumo médio dos veículos a partir de 2008

CARACTERÍSTICAS DO ESQUEMA DE TESTE	ESQUEMA DE TESTE				
	CITY	HIGHWAY	HIGH SPEED	AC	COLD TEMP
Tipo de condução	Velocidad e baixa e tráfego pára-arranca urbano	Tráfego de fluxo livre a velocidades de autoestrada	Velocidad es mais altas; acelerações e travagens mais fortes	Uso do AC em ambiente de temperaturas altas	Teste urbano com temperaturas ambientes baixas

Velocidade máxima	≈ 90 km/h	≈ 97 km/h	≈ 129 km/h	≈ 88 km/h	≈ 90 km/h
Velocidade média	≈ 23 km/h	≈ 77 km/h	≈ 77 km/h	≈ 35 km/h	≈ 23 km/h
Aceleração máxima	≈ 1.47 m/s ²	≈ 1.43 m/s ²	≈ 3.78 m/s ²	≈ 2.28 m/s ²	≈ 1.47 m/s ²
Distância simulada	17.7 km	16.1 km	12.9 km	5.8 km	17.7 km
Tempo	1860 s	750 s	600 s	594 s	1860 s
Paragens	23	Nenhuma	4	5	23
Tempo ao ralenti	18% do tempo	Nenhum	7% do tempo	19% do tempo	18% do tempo
Arranque do motor	Frio	Quente	Quente	Quente	Frio
Temperatura do laboratório	20 – 30 °C			35 °C	≈ -6.6 °C
Ar condicionado do veículo	Off	Off	Off	On	Off
Nota: O motor de um veículo não atinge a máxima eficiência no consumo de combustível enquanto não está quente.					

Automóveis e veículos comerciais ligeiros: Escalão 2

O regulamento do Escalão 2 introduziu limites de emissões mais rigorosos relativamente aos limites do Escalão 1 e uma série de padrões mais rigorosos para veículos de maiores dimensões. Sob os regulamentos do *Escalão 2*, os limites de emissões são aplicados a todas as categorias de veículos, i.e., automóveis ligeiros, monovolumes, pick-ups e SUV's têm o mesmo limite de emissões poluentes.

As regras dos Escalão 2 foram introduzidas de maneira faseada entre 2004 e 2009. Sob a proposta do Escalão 3, as regras do Escalão 2 serão substituídas de maneira faseada pela regulamentação do *Escalão 3* no período de 2015 a 2017.

No Escalão 2 também foi incluído um novo tipo de veículo que não estava definida no Escalão 1, os MDPV (*Medium-Duty Passenger Vehicles*). No *Escalão 1* o regulamento apenas contemplava veículos com um peso até 3855 kg. O regulamento do *Escalão 2* é aplicado a todos os veículos do Escalão 1 e, adicionalmente, veículos com um peso que esteja no intervalo de 3855 kg até 4535 kg e que são usados para o transporte de passageiros. Este grupo inclui primordialmente grandes SUV's e carrinhas de passageiros, e são denominados MDPV.

Os limites de emissões poluentes são aplicados a todos os veículos independentemente do tipo de combustível utilizado. Isto é, veículos a gasolina, gasóleo, ou combustíveis alternativos, têm todos de cumprir o mesmo regulamento.

O programa do Escalão 2 da EPA utiliza uma estratégia de conformidade de três níveis que são:

1. Avaliação pré-produção: utilizada para certificar veículos antes de ser colocado no mercado;
2. Avaliação na produção: utilizada durante a produção do veículo, na linha de montagem, para avaliação precoce dos veículos de produção;
3. Avaliação em uso: usada para verificar se os veículos mantêm boas condições depois de vários anos de uso.

Os limites de emissões para todos os poluentes, no Escalão 2, são testados através do ciclo de teste **FTP75**, nos três níveis de avaliação. Em adição aos limites de emissões requeridos com o ciclo FTP, a certificação dos veículos também requer que sejam cumpridos normas de emissões suplementares, que são verificados com os ciclos de condução US06 e SC03. Em algumas exceções, os fabricantes necessitam cumprir um teste de ensaio de 4000 milhas (6437 km) e completar aferidores de vida útil através do ciclo SFTP (*Supplemental Federal Test Procedure*).

O cumprimento de vida útil através do SFTP é determinado pela ponderação dos resultados do teste de emissões da seguinte forma:

$$0.35 \times FTP + 0.28 \times US06 + 0.37 \times SC03$$

e comparando o resultado com o calculado SFTP standard.

Automóveis e veículos comerciais ligeiros: Escalão 3

Em 29 de Março de 2013, a US EPA (*United States Environmental Protection Agency*), aprovou a regulamentação proposta introduzindo as regras de emissão do Escalão 3 para veículos ligeiros. A proposta introduz novas metas de emissões poluentes que estão proximamente alinhadas com as normas da Califórnia LEV III, que começa a ser introduzida em 2017 de maneira faseada até 2025.

A estrutura das regras do Escalão 3 é similar às do Escalão 2 – construtores têm que certificar os veículos a uma das sete certificações disponíveis e têm que atingir as metas

regulamentadas para a sua frota de veículos de um dado ano. Os limites são mais apertados que no Escalão 2 e incluem um número importante de mudanças, tais como:

- ❖ Ambos limites de certificação e os limites médios da frota de veículos são representados usados a soma de emissões poluentes NMOG + NO_x;
- ❖ Os limites de emissões médias NMOG + NO_x da frota de veículos têm que atingir a meta de 30 mg/mi até 2025;
- ❖ A durabilidade de emissões exigida é de 150 000 milhas (valor acima das 120 000 milhas do Escalão 2).

As definições das categorias dos veículos, incluindo os veículos ligeiros de passageiros, veículos comerciais ligeiros e os MDPV mantêm-se as mesmas do Escalão 2.

Os construtores de veículos têm que certificar todos os seus veículos a um dos sete níveis de limite de emissões poluentes mostrados na Tabela 3.3. Os veículos são testados, durante o procedimento de teste, segundo o ciclo de condução normalizado **FTP75**. Os limites de emissões são aplicados a todos os veículos independentemente do tipo de combustível utilizado. (Inc., DieselNet, Emission Standards » United States, 2013)

Tabela 3.3 - Níveis dos limites de emissões poluentes (FTP; 150 000 milhas)

Nível	NMOG+Nox	PM	CO	HCHO
	mg/mi			
Nível 160	160	3	4200	4
Nível 125	125	3	2100	4
Nível 70	70	3	1700	4
Nível 50	50	3	1700	4
Nível 30	30	3	1000	4
Nível 20	20	3	1000	4
Nível 0	0	0	0	0

3.4. Ciclos de Condução Japoneses

Os ciclos de condução japoneses pertencem ao tipo de ciclos teóricos e são constituídos por um ciclo urbano (10 *Mode*), por um ciclo extraurbano (15 *Mode*) e por um ciclo combinado que se inicia com o ciclo 15 *Mode*, seguido de três ciclos 10 *Mode* e termina outra vez com um ciclo 15 *Mode*, este designa-se por 10-15 *Mode*.

- **Ciclo 10-15 Mode**

O ciclo japonês 10-15 *Mode* está a ser usado no teste de controlo de emissões poluentes e no de consumo de combustível na homologação de veículos no Japão. Este teste simula

um ciclo de condução urbano e em autoestrada, incluindo marcha lenta, acelerações, velocidade de cruzeiro e desacelerações. As medições são realizadas enquanto o motor estiver quente, depois de um processo de aquecimento modelo.

Este ciclo tem as mesmas desvantagens do **NEDC**. Por essa razão é que as autoridades japonesas e fabricantes de automóveis resolveram alterar os testes de homologação para um ciclo mais realista a partir de 2011, o ciclo **JC08**.

- **Ciclo JC08**

O **JC08** é um ciclo transiente que é muito mais exigente do que o ciclo **10-15 Mode**. É realizado tanto com arranques a frio como a quente e representa a condução em estradas congestionadas, com fortes acelerações e desacelerações.

3.5. Ciclo de condução mundial - WLTP

Introdução

As normas e regulamentos que regem as emissões e consumo de combustível de veículos ligeiros variam significativamente entre regiões e países do mundo. Uma grande variedade de veículos são projetados para distribuição global e serão vendidos em diversos mercados e por isso terão de estar de acordo os diferentes métodos de teste e com as normas e regulamentos de cada um. Por estas razões os fabricantes enfrentam custos adicionais para certificar os seus veículos nos diversos procedimentos e normas, mesmo que todas as normas e regulamentos tenham o mesmo propósito fundamental, o de reduzir as emissões de poluentes e melhorar a eficiência de combustível. Tendo isto em conta foi desenvolvido uma metodologia de ensaio e um ciclo de condução mundial com o objetivo de harmonizar as diversas normas e regulamentos com a finalidade de reduzir custos para benefício dos fabricantes e consequentemente do consumidor final.

O Fórum Mundial para a Harmonização das Regulamentações de Veículos da Comissão Económica das Nações Unidas (UNECE), na sua sessão realizada em Novembro de 2007, criou um grupo informal sob a tutela do Grupo de Trabalho sobre a Poluição e Energia (GRPE) para preparar um roteiro para o desenvolvimento de um procedimento harmonizado de teste para veículos ligeiros, denominado **WLTP** (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*).

Procedimento de Teste

O procedimento do teste segue uma rígida orientação em relação às condições de teste no dinamómetro, do tipo de carga da estrada (resistência ao movimento), relação de caixa engrenada, peso total do veículo (inclui equipamento opcional, carga e passageiros), qualidade do combustível utilizado, temperatura ambiente e o tipo de pneu utilizado assim como a sua pressão.

Existem três tipos de ciclos de teste WLTC que são utilizados e depende da classe do veículo a ser testado. As classes de veículos são definidas pelo rácio entre a potência e o peso do veículo, ou seja **PWr**, em kW/t (potência nominal do motor / peso):

- ❖ **Classe 1** – veículos de baixa potencia $PWr \leq 22$;
- ❖ **Classe 2** – veículos com $22 < PWr \leq 34$;
- ❖ **Classe 3** – veículos de alta potencia com $PWr > 34$.

Em cada classe existe diferentes períodos de condução desenvolvidos para representar o funcionamento do veículo na realidade em estradas urbanas, estradas nacionais e autoestradas. A duração de cada período é fixo dentro de cada classe, no entanto a aceleração e curvas de velocidade são ajustadas de forma diferente. A sequência de testes é restringida ainda pela velocidade máxima do veículo.

O aumento do número de mudanças das caixas de velocidade manuais com 4, 5, 6 e 7 engrenagens torna impossível especificar os pontos de troca de mudança. O procedimento de teste **WLTP** fornece um algoritmo para calcular os pontos ótimos de troca de mudança, que toma em conta o peso do veículo total e a sua curva de potência dentro da velocidade de motor normal, cobrindo assim a larga variação de velocidades de motor e de potências permitidas pela tecnologia atual do mercado. Para refletir o uso normal e o consumo de combustível eficiente, as trocas de mudanças frequentes ocorridas em menos de 5 segundos são descartadas.

Características do ciclo de condução mundial

WLTC Class 3

O ciclo de condução WLTC para a classe 3 de veículos é dividido em quatro períodos: *Low*, *Medium*, *High* e *Extra High Speed*. Se a velocidade máxima for inferior a 135 km/h, o período de *Extra High Speed* é substituído por um período de *Low Speed*.

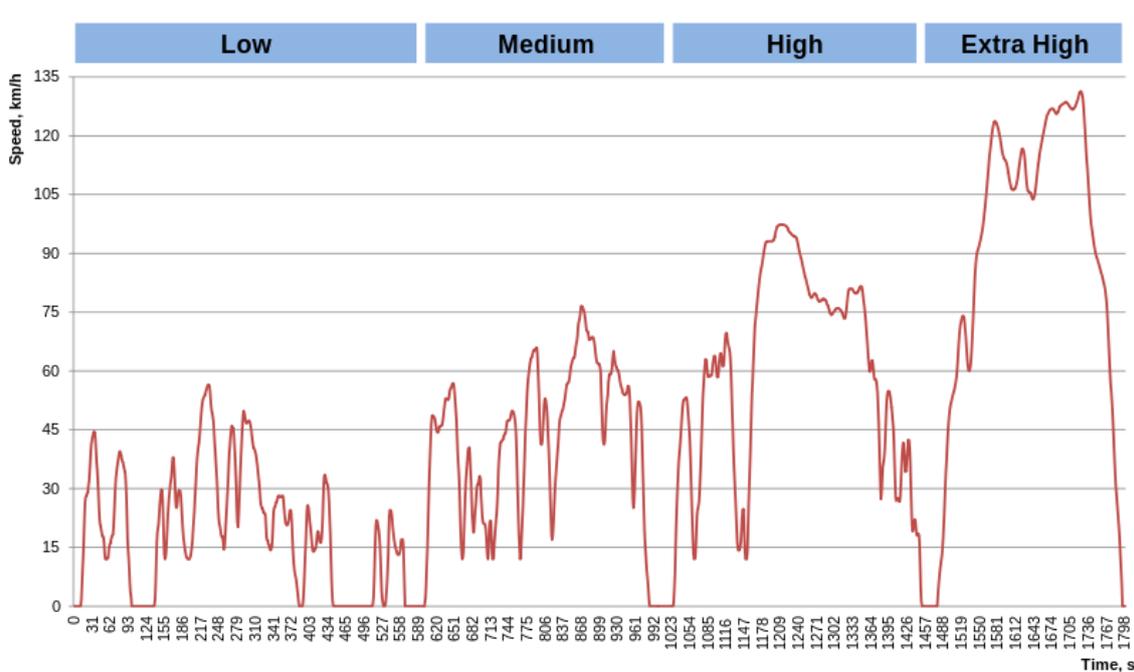


Figura 3.4 - Ciclo WLTC Class 3

As características desta classe são:

Tabela 3.4 - Características do ciclo WLTC Class 3

	Low	Medium	High	Extra High	Total
Duração [s]	589	433	455	323	1800
Duração das paragens [s]	156	48	31	7	242
Distância [m]	3095	4756	7158	8254	23262
Velocidade máxima [km/h]	56.5	76.6	97.4	131.3	
Aceleração máxima [m/s ²]	1.5	1.6	1.6	1.0	

WLTC Class 2

A classe 2 do ciclo de teste tem três períodos: *Low*, *Medium* e *High Speed*. Se a velocidade máxima for inferior a 90 km/h, o período de *High Speed* é substituído por um período de *Low Speed*.

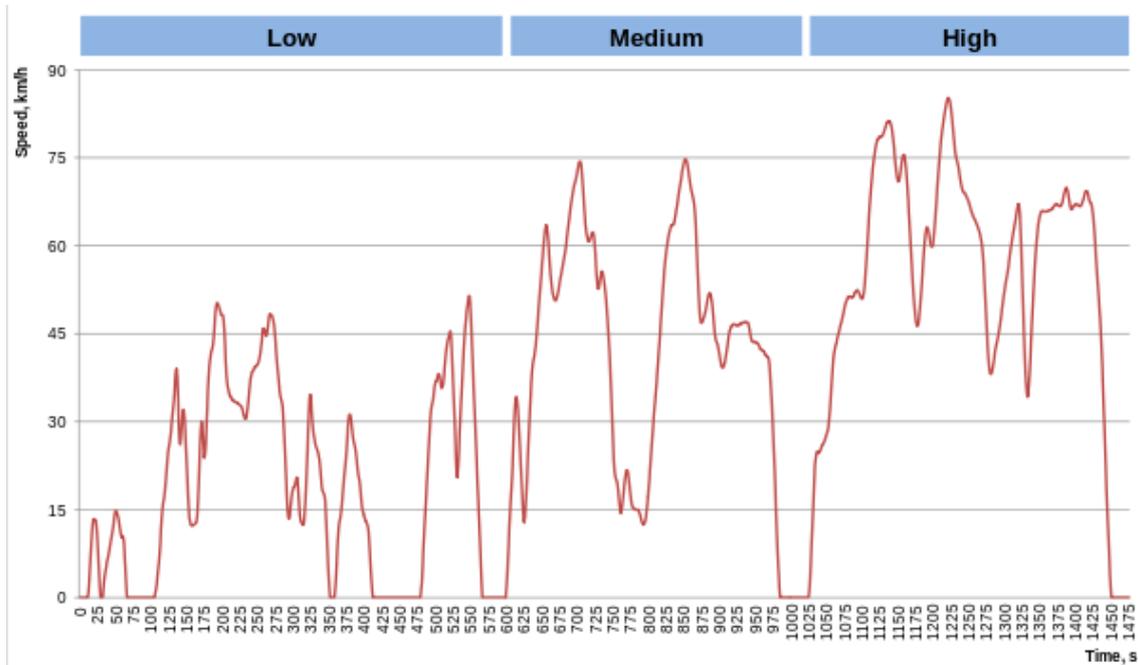


Figura 3.5 - Ciclo WLTC Class 2

As características desta classe são:

Tabela 3.5 - Características do ciclo WLTC Class 2

	Low	Medium	High	Total
Duração [s]	589	433	455	1477
Duração das paragens [s]	156	48	30	233
Distância [m]	3132	4712	6820	14664
Velocidade máxima [km/h]	51.4	74.7	85.2	
Aceleração máxima [m/s²]	0.9	1.0	0.8	

WLTC Class 1

A classe 1 do ciclo de teste tem períodos de *Low* e *Medium Speed*, que são realizados na sequência *Low-Medium-Low*. Se a velocidade máxima for inferior a 70 km/h o período de *Medium Speed* é substituído por um período de *Low Speed*.

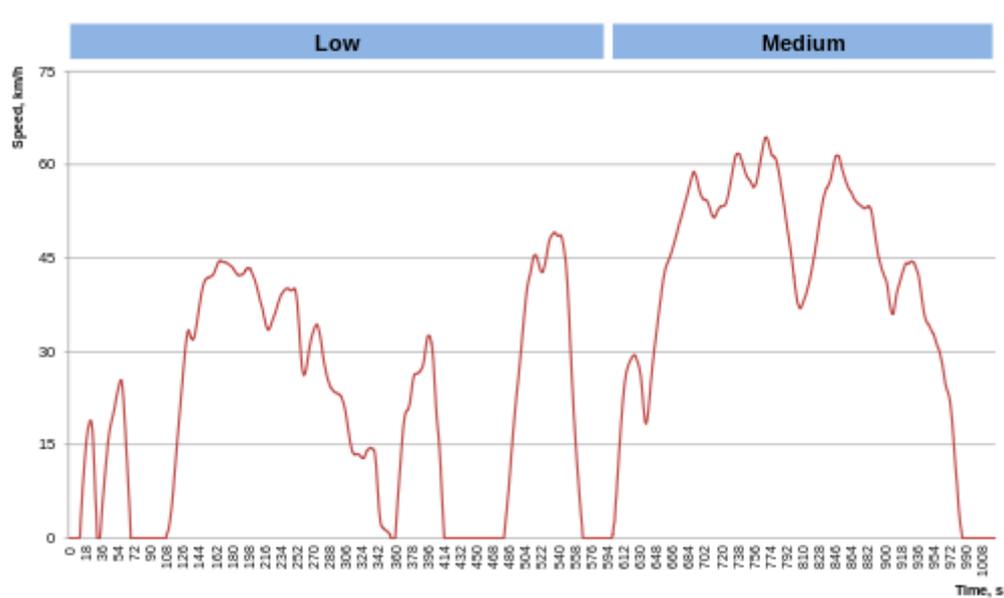


Figura 3.6 - Ciclo WLTC Class 1

As características desta classe são:

Tabela 3.6 - Características do ciclo WLTC Class 1

	Low	Medium	Total
Duração [s]	589	433	1022
Duração das paragens [s]	156	48	203
Distância [m]	3324	4767	8091
Velocidade máxima [km/h]	49.1	64.4	
Aceleração máxima [m/s²]	0.8	0.6	

4. PERCURSOS DE CONDUÇÃO REAIS

4.1. Introdução

Os percursos de condução reais escolhidos são três. Um citadino, um em estrada nacional e um outro em autoestrada. Estes três tipos de percursos contempla todos os tipos de condução a que um condutor no seu quotidiano pode encontrar.

Os três percursos têm início comum mas destinos diferentes. O primeiro trata-se de um circuito citadino com início e fim no polo da Universidade do Minho em Guimarães. O segundo trata-se de um percurso em estrada nacional com início na cidade de Guimarães e destino final na cidade de Braga na zona de S.º Victor. O terceiro trata-se de um percurso em autoestrada com início no mesmo ponto que o primeiro e final na cidade de Braga mas na zona de Lamações.

A descrição detalhada de estes percursos pode ser consultada no ANEXO A.

4.2. Aquisição e tratamento de dados de entrada

Os dados dos percursos em estudo foram adquiridos através de um sistema de GPS (*Global Positioning System*) equipado no veículo, através do qual se obtêm a longitude, latitude, aceleração longitudinal, aceleração lateral, velocidade e altitude em cada instante de tempo. Contudo os dados recolhidos pelo sistema têm um erro associado, razão pela qual, se torna necessário a realização de um tratamento de dados, antes de estes serem utilizados no projeto, de modo a que os resultados obtidos sejam os mais reais possíveis.

Assim este capítulo é organizado da seguinte forma:

- Em primeiro lugar, será feita uma breve introdução e descrição do funcionamento de um sistema GPS, assim como os principais erros característicos, previstos e observados;
- De seguida, será feita uma descrição dos métodos de tratamento aplicados aos erros referidos, assim como a comparação dos dados pré e pós tratamento;

4.3. Introdução ao sistema GPS

O GPS é um sistema que nos dá a posição, velocidade e altitude de um veículo a cada instante. Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA, originalmente criado com fins militares estratégicos. A partir de meados da década de setenta o seu uso foi estendido para aplicações civis, tendo passado por uma contínua evolução desde então, principalmente no que diz respeito à precisão dos dados recolhidos.

O sistema conta com 24 satélites, sendo três de reserva. Estes satélites denominados NAVISTAR (*Navigation System with Time and Ranging*) estão distribuídos em 6 órbitas distintas, a uma altitude aproximada de 20 mil km, com um plano orbital a uma inclinação de 55° em relação ao plano equatorial e um período de revolução de 12 horas siderais. Com esta configuração em qualquer ponto da superfície da Terra há no mínimo 4 satélites acima da linha do horizonte 24 horas por dia.

Com os rápidos avanços nos sistemas de navegação por satélite e nos sistemas de informação geográfica, espera-se um aumento da fiabilidade e precisão do sistema de GPS, assim como, uma redução no preço dos equipamentos (Junior, 2008)

A precisão do sistema de GPS é um dos pontos-chave deste tipo de equipamento. Atualmente, os dados recolhidos pelos sistemas de GPS existentes apresentam grande precisão, contudo, ainda são afetados por fatores atmosféricos e por outras fontes de erro, tais como nas grandes cidades onde são comuns edifícios altos, que acabam por diminuir um pouco a precisão e aumentar o erro.

Principais fontes de erros dos sistemas de GPS

Os principais fatores que podem afetar a precisão dos sistemas de GPS são os seguintes (Junior, 2008):

- Sinal com caminhos múltiplos: isto ocorre quando o sinal GPS é refletido por objetos tais como prédios altos ou montanhas, antes de alcançarem o recetor. Isto aumenta o tempo que o sinal leva do satélite até ao recetor, causando erros;
- Número de satélites visíveis: quanto maior o número de satélites que o recetor do GPS conseguir detetar o sinal, maior será a sua precisão. Prédios, terrenos, interferências eletrónicas ou uma cobertura densa, como por exemplo uma floresta, podem bloquear a receção do sinal, causando erros nos dados recebidos;
- Erros relativos ao relógio do recetor: o relógio interno do recetor não é tão preciso quanto o relógio atómico dos satélites GPS. Assim, podem ocorrer pequenos erros na medição do tempo. Este erro pode ser eliminado pelo posicionamento diferencial;
- Refração na ionosfera e troposfera: os sinais dos satélites diminuem de intensidade à medida que atravessam a atmosfera e ocorrem variações na velocidade da luz. No entanto, o sistema é capaz de calcular uma média do atraso para corrigir parcialmente esse tipo de erro;

- Geometria dos satélites: isto refere-se à posição relativa dos satélites a qualquer hora. A geometria ideal dos satélites é alcançada quando estão localizados em grandes ângulos em relação a outros satélites.

Descrição do Sistema de GPS utilizado na recolha de dados

Para fazer a aquisição de dados dos circuitos reais foi utilizado um sistema da Marca *MaxQData*, do modelo MQGPS. A utilização deste, em conjunto com um PDA ou computador portátil, permite fazer a aquisição dos dados pretendidos com uma frequência de 5 Hertz. A interface entre o Sistema de GPS e o PDA é realizada através de um protocolo *Bluetooth*.

Dos dados obtidos através do sistema de GPS, serão utilizados pelo modelo os dados da velocidade do veículo e da aceleração lateral.

Este sistema de aquisição de dados disponibiliza ainda um programa que permite a visualização dos dados recolhidos (Figura 4.1). A partir deste *software* é possível efetuar uma análise detalhada da performance do veículo ao longo de um determinado percurso.

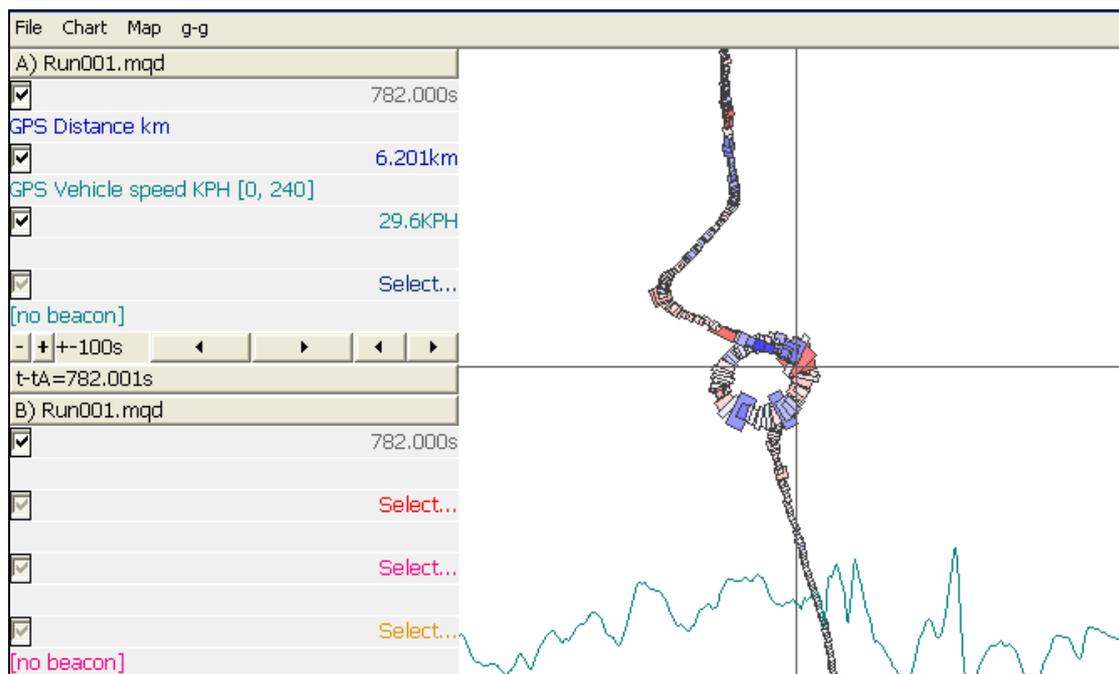


Figura 4.1 - Representação do ambiente gráfico do programa MQGPS.

A linha azul apresentada na parte de baixo da Figura 4.1 é representada a velocidade do veículo mas o programa permite que seja apresentada outras variáveis tais como a aceleração lateral, aceleração longitudinal ou altitude. No esquema do percurso, a azul estão representadas as acelerações e a vermelho as travagens, a dimensão lateral dos

retângulos representa a aceleração lateral e a dimensão longitudinal representa a aceleração longitudinal do veículo.

A precisão dos dados recolhidos pelo sistema de GPS é extremamente importante para a análise dos circuitos reais pois tem grande influência nos resultados obtidos pelo modelo de análise desenvolvido no *Matlab/Simulink*.

A partir da análise dos dados recolhidos nos trabalhos realizados anteriormente, denota-se que para o mesmo trajeto com pontos inicial e final coincidentes e definidos, os dados obtidos necessitam de maior exatidão, revelando por vezes até tendências opostas, como elevações de altitude máxima diferentes de medição para medição, entre outros, sendo que no caso do presente trabalho a altitude será tratada manualmente através de mapas topográficos.

Assim, para que os resultados do modelo de atrito sejam o mais fidedignos e reais possível, fez-se um estudo dos dados, impondo-lhes filtros e correções para minimizar os efeitos dos erros.

4.4. Análise e correção dos dados recolhidos pelo GPS

No seguimento do trabalho realizado em teses de dissertação de anos anteriores, e na perspectiva de contínuo melhoramento, denotou-se nos trabalhos anteriores uma dificuldade considerável em criar um método de tratamento de dados capaz de minimizar erros do sistema de aquisição. Assim como um dos objetivos do presente trabalho tentou-se enveredar por uma investigação mais profunda sobre o tratamento dos dados recolhidos pelo sistema de aquisição.

Esta análise e correção foi dividida em duas partes. Uma incidiu sobre o tratamento dos dados de velocidade e aceleração lateral recolhidos pelo GPS. A segunda incidiu sobre os dados de altitude que foram recolhidos manualmente. Estes tratamentos irão ser descritos de seguida separadamente.

Análise e tratamento dos dados da velocidade e aceleração lateral

Para tomar uma decisão sobre quais o tipo de tratamento a efetuar aos dados tomou-se em consideração as filtragens efetuadas nos trabalhos anteriores e após cuidada análise optou-se pelo método LOESS aplicado no Matlab através de função específica.

LOESS, inicialmente desenvolvido em 1979 por Cleveland e posteriormente desenvolvido em 1988 por Cleveland e Devlin, um método que também é conhecido por

regressão polinomial localmente ponderada (*Locally Weighted Polynomial Regression*). (Wikipedia, 2014)

Este método é aplicado através da função *Smooth* no Matlab. Esta função suaviza os dados na coluna dos dados a analisar usando um filtro de média móvel. Os passos para a aplicação desta função são os seguintes:

- ❖ A versão básica desta função é escrever na linha de comandos: $yy=smooth(y)$;
 - y é o vetor coluna que contem os dados de entrada a filtrar e os resultados são posteriormente devolvidos num vetor coluna sob yy . O *span standard* para a média móvel é de 5 pontos.
- ❖ Para definir um *span* diferente escreve-se na linha de comandos $yy=smooth(y,span)$. O número do *span* deve ser impar;
- ❖ Existem diferentes métodos de filtragem que a função *smooth* pode aplicar. Para definir o método a utilizar aplica-se o mesmo tipo de definição que na linha anterior, ou seja, $yy=smooth(y,method)$;
- ❖ Ao combinar estes dois últimos pontos é possível definir o método de filtragem a aplicar assim como o *span* da média móvel. A versão a escrever na linha de comandos será: $yy=smooth(y,span,method)$.

Este último foi o que foi utilizado para a filtragem da velocidade e aceleração lateral. O método utilizado foi o LOESS, como descrito anteriormente, e o *span* utilizado foi de 25 pontos no caso da aceleração lateral e de 15 pontos no caso da velocidade. É importante referir que os dados recolhidos pelo sistema de GPS são definidos por pontos de 0,2 em 0,2 segundos, por isso 1 segundo corresponde a um *span* de 5 pontos. Assim o *span* de 25 pontos da aceleração lateral corresponde a um intervalo de tempo de 5 segundos e o *span* de 15 pontos corresponde a um intervalo de tempo de 3 segundos.

Ao observar o Gráfico 4.1 podemos perceber melhor a filtragem que foi efetuada aos dados da aceleração lateral obtidos pelo GPS, no percurso citadino.

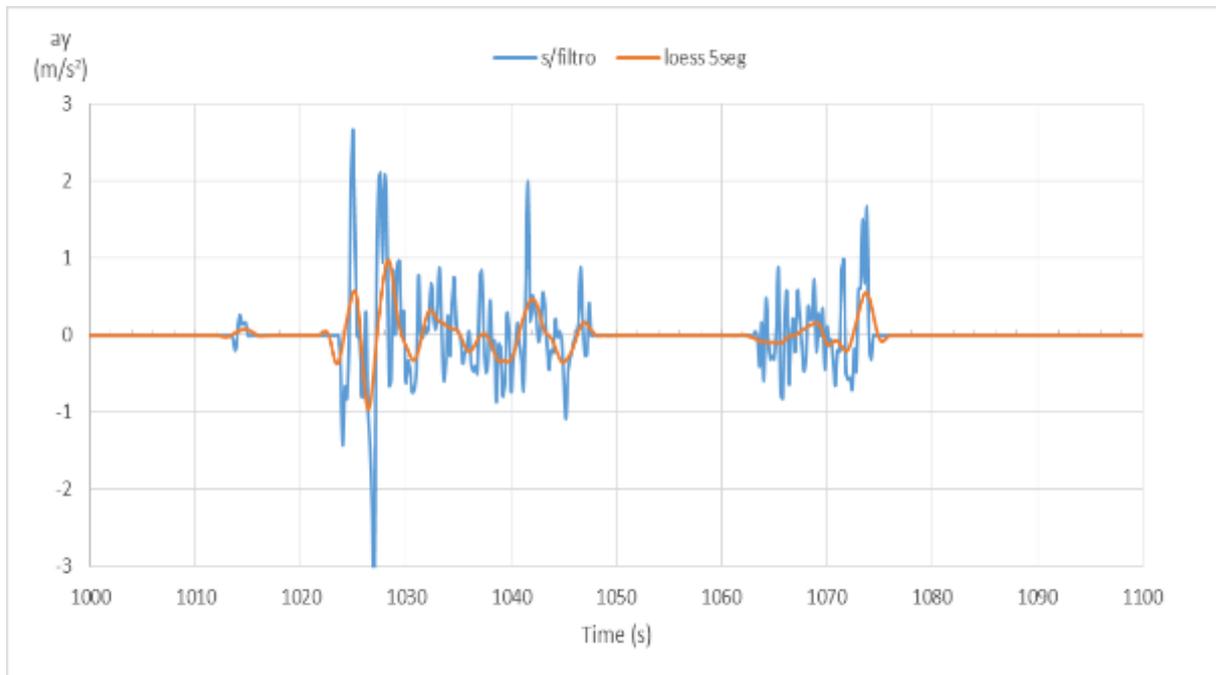


Gráfico 4.1 - Aproximação da filtragem efetuada aos dados de aceleração lateral do percurso citadino

Nos dados da velocidade foi efetuada o mesmo tipo de filtragem mas o *span* utilizado foi de 15 pontos, ou seja 3 segundos (Gráfico 4.2).

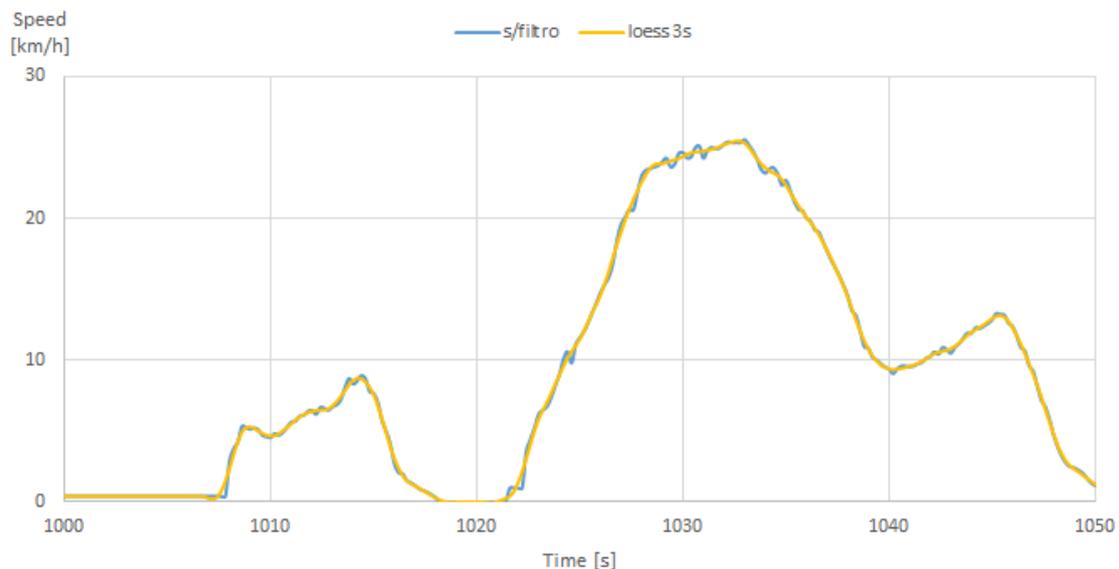


Gráfico 4.2 - Aproximação da filtragem efetuada aos dados da velocidade do percurso citadino

Para uma melhor comparação entre os circuitos normalizados e os percursos reais, foram definidos pontos iniciais e finais de modo a que a comparação entre os dois tipos de percursos, reais e normalizados, seja de mais fácil interpretação.

Como os três percursos reais começam no mesmo local, o ponto inicial definido foi a entrada do Pólo de Azurém da Universidade do Minho, na passadeira dos peões. No caso dos pontos finais depende do percurso, já que os três acabam em locais diferentes.

Antes do ponto inicial foi introduzido manualmente uma rampa de aceleração com uma duração de 4 segundos, onde a aceleração lateral e a velocidade foram interpoladas até ao 4º segundo, e a partir deste é usado os dados do GPS.

No final de cada percurso foi também definida manualmente uma rampa de desaceleração até à imobilização do veículo com uma duração de 4 segundos, onde a velocidade e aceleração também foram interpoladas.

4.5. Levantamento e tratamento dos dados da altitude

Os dados de altitude dos circuitos reais foram levantados manualmente usando cartas topográficas do exército adquiridas para essa finalidade. Convém referir que a topografia do território nacional português é feita pelo IGeoE -Instituto Geográfico do Exército. O território nacional está dividido em sectores e os utilizados neste trabalho foram os números 70, 71, 84 e 85.

As cartas topográficas são publicadas periodicamente mas infelizmente algumas estão desatualizadas, tais como a nº70 utilizada neste trabalho que foi publicada em 1997. Neste caso algumas das estradas não estão disponíveis mas pode-se fazer o levantamento das curvas de nível necessárias ao trabalho.

Leitura de Mapas Topográficos

Introdução à Cartografia

Os mapas mais antigos de que há conhecimento foram achados na cidade de Çatal Hüyük, na Turquia, e datam de cerca de 6200 a.C., encontrando-se pintados numa parede.

Existem também formas de representação do terreno, isto é, mapas em outras culturas ancestrais tais como na antiga civilização azteca ou na civilização mesopotâmica, entre outras.

A invenção do papel permitiu que os mapas passassem a ser desenhados em folhas. O termo grego que designava as folhas de papiro usadas na execução dos mapas denomina-se *karte*, daí que persista até hoje a palavra carta referindo-se aos mapas topográficos.

A grande evolução da cartografia dá-se a partir do século XV, com a época dos Descobrimentos, devido à necessidade de obter uma maior precisão para garantir a

segurança das rotas de navegação marítima. É nesta época que surge a palavra mapa, do latim *mappa* que significa lenço, uma vez que as representações eram desenhadas em grandes lenços, tais como o *mappa mundi*.

Tipos de Mapas

Normalmente, a representação do terreno assume duas perspectivas: a representação planimétrica e a representação altimétrica. Um modelo topográfico poderá conter apenas uma destas formas de representação do terreno, ou ambas em simultâneo.

A representação planimétrica consiste na representação das projeções de elementos de interesse sobre planos horizontais, normalmente implicam escalas maiores devido à necessidade de um maior rigor e detalhe.

A representação altimétrica tem por objeto a representação do relevo do terreno, isto é, dos desníveis existentes entre os pontos que constituem a superfície desse terreno.

Os denominados Mapas Planimétricos mostram as posições dos elementos sem os relacionar com o relevo. Exemplos de elementos nos mapas planimétricos são os rios, os lagos, as estradas e fronteiras.

Incluem-se em Mapas Planimétricos:

- Mapas de estrada - atlas de estrada e mapas da cidade; (Figura 4.2)
- Mapas específicos - plantas de saneamento, plantas da rede viária, plantas da rede pluvial, etc;
- Mapas esquemáticos - cartas de aeronáutica.

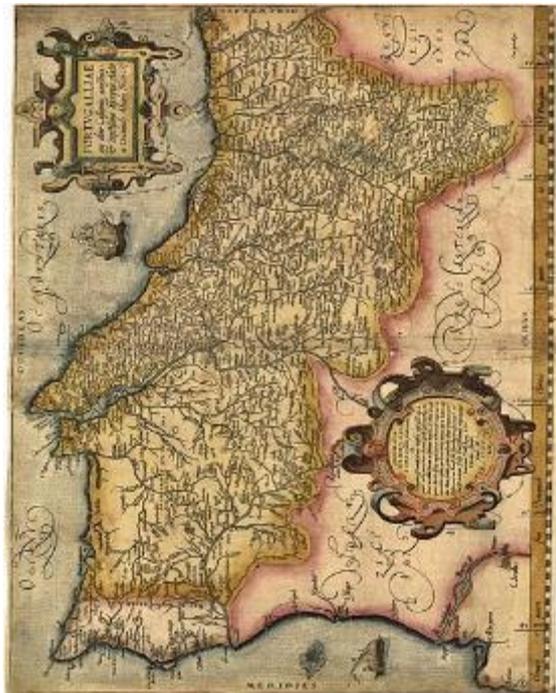


Figura 4.2 - "Tabula Geographica Portugalliae". Feito por Álvaro Seco

Mapas Topográficos

Os mapas topográficos são diferentes de mapas planimétricos pois representam as características verticais e horizontais de um determinado espaço (relevo). O Datum usado na maior parte da cartografia operacional em Portugal é o Datum WGS84, uma vez que permite o cruzamento da informação obtida no terreno, através de GPS ou de cartografia preparada para o efeito e os recursos tecnológicos existentes, como o Google Earth. Existem dois tipos de mapas topográficos:

Mapas de Curvas de Nível: são a forma mais comum de mostrar a forma e a elevação da terra. São os mapas mais usuais que encontramos nas operações de combate aos incêndios florestais, denominados como cartas militares.

Mapas de Sombras e Relevo: estes mapas, elaborados em gabinetes de combate aos incêndios dos bombeiros, utilizam uma gradação de cor com vista a simular o efeito da sombra do terreno. Recorre-se a diferentes tonalidades de cor para acentuar a forma das características físicas. Quanto mais escuro seja o sombreado mais declivoso é o terreno.

A Carta Militar

Como já foi anteriormente referenciado, os mapas topográficos que mais se utilizam em Portugal são as denominadas Cartas Militares. A Carta é uma representação gráfica da superfície da Terra ou parte dela, desenhada num plano e em determinada escala. Os pormenores naturais e artificiais do terreno são representados por símbolos, linhas e cores. As cartas topográficas mais utilizadas possuem escalas de: 1/20 000, 1/25 000, 1/50 000, e 1/100 000.

No ANEXO B é descrito em mais pormenor as informações marginais que uma carta militar apresenta.

As Coordenadas

Cada ponto da superfície terrestre possui as suas respetivas coordenadas, diferentes de qualquer outro ponto no globo. As coordenadas constituem o modo mais correto de determinar um dado ponto sobre um plano, ao qual não se pode atribuir um nome porque pode estar desprovido de topónimo ou não ter algum detalhe de destaque ao nível do relevo, por exemplo como um cume. Uma determinada posição pode ser definida com base em coordenadas geográficas ou por coordenadas retangulares.

Nas **Coordenadas Geográficas** a medida de um grau de latitude é de 111,18 km, a de um minuto é de 1853 metros (1 milha náutica) e a de um segundo é de 31 metros. A medida de um grau de longitude no paralelo 0° é de 111,18 km e no paralelo 80° é de 19,4 km.

A latitude é a distância angular (medida em graus) a partir do Equador até ao paralelo do lugar. A latitude varia entre 0° (Equador) e +90° N (Hemisfério Norte) ou - 90° Sul (Hemisfério Sul).

A longitude é a distância angular (medida em graus, ao longo do Equador), entre o meridiano de referência (meridiano de Greenwich) e o meridiano do lugar. Na Conferência Internacional Meridiana, realizada em Washington, em 1884, foi definida como variando de 0° a +180° (Oeste de Greenwich) e 0° a - 180° (Este de Greenwich).

As **Coordenadas Retangulares** são uma das primeiras coisas que se destaca numa carta militar. É que esta é completamente coberta por uma malha de quadrados com linhas azuis, denominada Grade de Coordenadas. As linhas que correm no sentido vertical representam os meridianos e as que correm no sentido horizontal representam os paralelos.

Nas cartas militares que utilizamos, a grade de coordenadas está relacionada com um sistema de coordenadas retangulares métricas, ou seja, as distâncias entre as linhas são medidas em metros e não em graus, o que permite a fácil medição das distâncias, diretamente na carta.

Portugal Continental, segundo o sistema de quadrícula UTM, situa-se na zona 29T. Cada zona é subdividida em quadrados de 100 km que no sistema UTM se designam por duas letras (ex.: NG). A primeira letra significa a distância à meridiana e a segunda letra a

distância à paralela. Existindo ainda mais subdivisões até chegar à quadrícula das cartas militares à escala 1: 25 000.



Figura 4.3 - Localização de Portugal Continental na Projeção de Mercator

A projeção UTM é provavelmente a projeção mais utilizada no mundo, devido à facilidade na interpolação de coordenadas, medida de distâncias, cálculo de ângulos e cálculo de áreas.

Antes de mais convém saber que as coordenadas UTM não correspondem a um ponto, mas sim a um quadrado. Geralmente, existe uma “especial” tendência para pensar que o valor da coordenada UTM corresponde a um ponto determinado ou a uma situação geográfica concreta. Contudo, pensar assim não é correto, pois uma coordenada UTM corresponde sempre a uma área quadrada, cujo lado depende do grau de resolução da coordenada, logo qualquer ponto compreendido dentro deste quadrado tem o mesmo valor de coordenada UTM.

Processo de leitura de coordenadas numa Carta Militar

Existem dois processos muito simples para localizarmos uma posição: por estimativa, dividindo a quadrícula em 10 partes iguais, quer a linha horizontal quer a linha vertical e por meio do esquadro de coordenadas. Para podermos localizar ou referir uma posição na carta com maior precisão é necessário recorrer ao esquadro de coordenadas. Este instrumento permite dividir um quadrado da quadrícula UTM mais rigorosamente do que por estimativa, sendo por isso os resultados mais dignos de confiança.

Para usar um esquadro de coordenadas colocamos o zero da escala no canto inferior esquerdo do quadrado da quadrícula e conservando a escala sobre a linha inferior do quadrado, fazendo a leitura nas subdivisões do esquadro, cujo quadrado equivale a 2500 m² (50 m x 50 m). Estes valores adicionados às coordenadas do canto do quadrado dão-nos as coordenadas perpendiculares.

No presente trabalho foi adquirido um esquadro de coordenadas para se obter as coordenadas com a melhor fiabilidade possível.

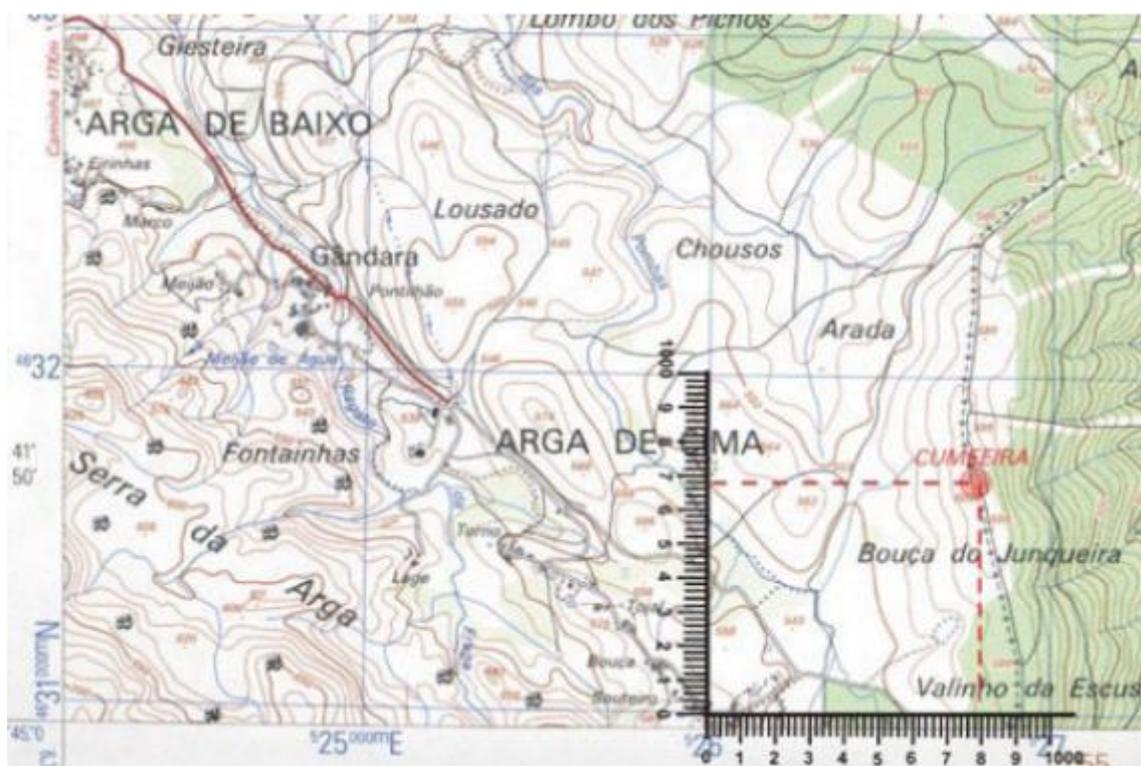


Figura 4.4 - Localização de uma posição por estimativa diretamente na Carta Militar (IGeoE) 1:25 000

A melhor maneira para perceber como se obtém as coordenadas de uma carta militar topográfica é através de um exemplo.

Assim, para o ponto indicado na Figura 4.4 o primeiro passo é alinhar o esquadro de coordenadas com o vértice da quadrícula onde queremos ler a coordenada. Segundo passo

é ler os números indicativos da latitude, a azul, que neste caso é o 526. De seguida retira-se a distância, que neste caso é 800m. Sendo assim a latitude em coordenadas UTM para o ponto indicado é 526800. Para a longitude o processo é o mesmo, sendo o valor da longitude em coordenadas UTM 4631680.

Com este tipo de coordenadas não é possível obter uma localização no Google Earth, já que este apenas permite a introdução de coordenadas geográficas. Por isso torna-se necessário converter as coordenadas UTM em geográficas. Para isso utilizou-se o sistema de conversão de coordenadas as IGeoE disponível *online* (IGeoE, 2014). Este sistema permite transformar as coordenadas UTM em outros diversos tipos de coordenadas, nos diferentes DATUM.

Metodologia utilizada

Para se obter as cotas de altitude corretas nos percursos reais foi feito o levantamento manual das mesmas em cartas militares. Sempre que uma linha de cota de altitude atravessa a estrada em questão retirou-se as coordenadas correspondentes e o valor da altitude e fez-se um ficheiro onde apenas consta a coordenada e a cota de altitude. Após isto fez-se a conversão das coordenadas UTM para coordenadas geográficas no portal do IGeoE, obtendo assim coordenadas que são possíveis de utilizar no Google Earth e Google Maps.

Em paralelo efetuou-se a exportação dos dados recolhidos através do GPS, através do programa *MaxQData Chart*, para o formato XML. Este formato não é reconhecido pelo Google Earth, por isso fez-se a conversão para o formato KMZ no portal *GPS Visualizer* (GPS Visualizer, 2014), que se pode abrir com as ferramentas do Google.

Abrindo este tipo de ficheiro com o Google Earth consegue-se obter a visualização do percurso efetuado pelo GPS e também ver a distância de cada ponto desde o início até ao fim do percurso em análise.

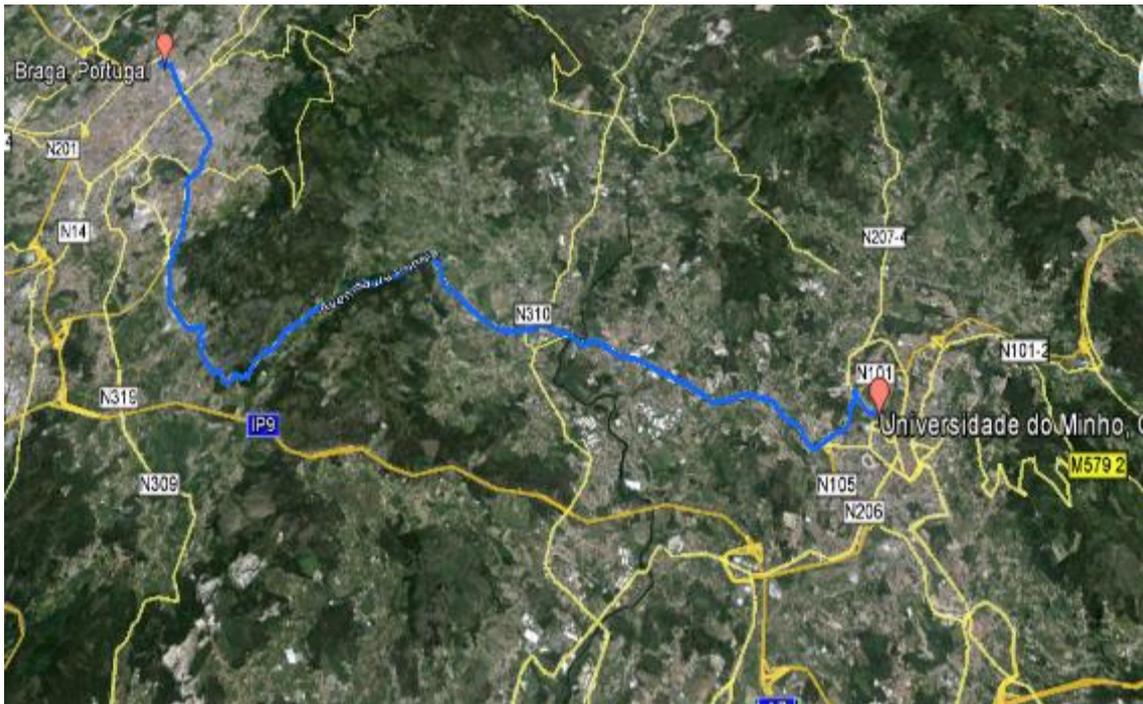


Figura 4.5 - Aspeto da visualização do percurso recolhido em GPS no Google Earth

Ao colocar no Google Earth cada coordenada geográfica, que se tinha retirado das cartas militares, conseguiu-se saber qual a distância correspondente no percurso registado pelo MQGPS.

Tabela 4.1 - Exemplo da correspondência dos dados retirados das Cartas Militares com distância no percurso

UTM	GEOGRAFICAS	ALTITUDE	Distância (m)
559000	41°27'00.842"	201	0
4588980	-8°17'37.107"		
558840	41°27'05.099"	210	375
4589980	-8°17'43.957"		
558810	41°27'08.674"	220	486
4589220	-8°17'45.211"		

Para preencher dados de altitude entre cada ponto retirado das cartas militares fez-se uma interpolação linear com os dados da distância retirados do MQGPS, como se pode verificar na Tabela 4.2 (a verde estão representados os dados retirados dos mapas).

Tabela 4.2 - Exemplo da interpolação efetuada aos dados de altitude

Distância	Altitude
1686,5	200,4
1691,1	200,0
1695,8	199,3
1700,4	198,6
1705,1	197,9
1709,8	197,2
1714,5	196,5
1719,3	195,8
1724,0	195,1
1728,8	194,4
1733,6	193,6
1738,5	192,9
1743,3	192,2
1748,2	191,5
1753,1	190,7
1758,0	190,0
1762,9	189,8

No Capítulo 6 são apresentadas as diferenças dos dados de altitude entre o sistema MQGPS e os dados recolhidos manualmente.

Será ainda se salientar que, como os dados de entrada para o modelo de simulação se baseiam numa série no tempo da velocidade obtida pelo MQGPS mas filtrada, teve de ser garantida a integridade dos dados, ou seja, as altitudes interpoladas foram associadas às distâncias obtidas, não diretamente dos dados do MQGPS, mas da integração no tempo da velocidade filtrada.

5. MODELO ENERGÉTICO

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e expressões que foram necessários para a elaboração do modelo matemático inserido no programa *MatLab/Simulink*. Este modelo foi desenvolvido para determinar as energias envolvidas num circuito de condução normalizado e em circuitos reais, quando este é percorrido por um veículo predefinido.

Em primeiro lugar, são descritos os fundamentos teóricos utilizados no modelo físico de atrito, desenvolvido anteriormente, juntamente com as alterações a este efetuadas, seguido da definição de todos os parâmetros geométricos e energéticos a utilizar na caracterização dos ciclos de condução.

O capítulo termina com uma descrição da estrutura do programa e explicações sobre a sua utilização.

5.2. Fundamentos teóricos

O modelo desenvolvido em *MatLab/Simulink* tem como objetivo determinar as energias envolvidas no movimento de um veículo genérico, como por exemplo, a energia total que o motor tem que fornecer às rodas (Energia Propulsora) para um dado percurso, a energia gasta para vencer o atrito (Energia de Atrito) e a energia desperdiçada nas travagens (Energia de Travagem).

No modelo são feitas certas considerações e simplificações que facilitam o cálculo forças, potências e energias sem comprometer a fiabilidade dos resultados. Sendo assim, o modelo:

- Considera apenas transferência de peso longitudinal, utilizando um modelo de duas rodas em que as rodas do mesmo eixo estão sempre sujeitas a solicitações dinâmicas idênticas;
- O veículo tem travagem equilibrada (travagem proporcionalmente distribuída pelas rodas da frente e de trás);
- Não considera a transferência de peso lateral, a rotação segundo o eixo longitudinal, os efeitos da suspensão e o aumento da deformação do pneu nas acelerações e travagens, mas inclui os efeitos do escorregamento longitudinal e lateral dos pneus.

Apesar do modelo contabilizar a transferência de peso longitudinal, isto é contabilizando diferentes cargas nos pneus da frente e nos pneus traseiros (e correspondentes escorregamentos longitudinais e laterais) consoante o veículo está em aceleração, travagem, em curva e/ou subida ou descida, na exposição seguinte as forças nas quatro rodas são somadas e apresentadas como uma força única, apenas por uma questão de clareza da explicação. Para mais detalhes veja-se o trabalho de Brito (2007) baseado nos de Milliken e Milliken (1995) e Gillespie (1992).

Sistema de Eixos

A descrição do movimento do veículo depende da escolha do sistema de eixos, neste caso, o sistema de eixos escolhido é uma simplificação do adotado pela SAE para o pneu (ver Figura 5.1) (MILLIKEN, 1995).

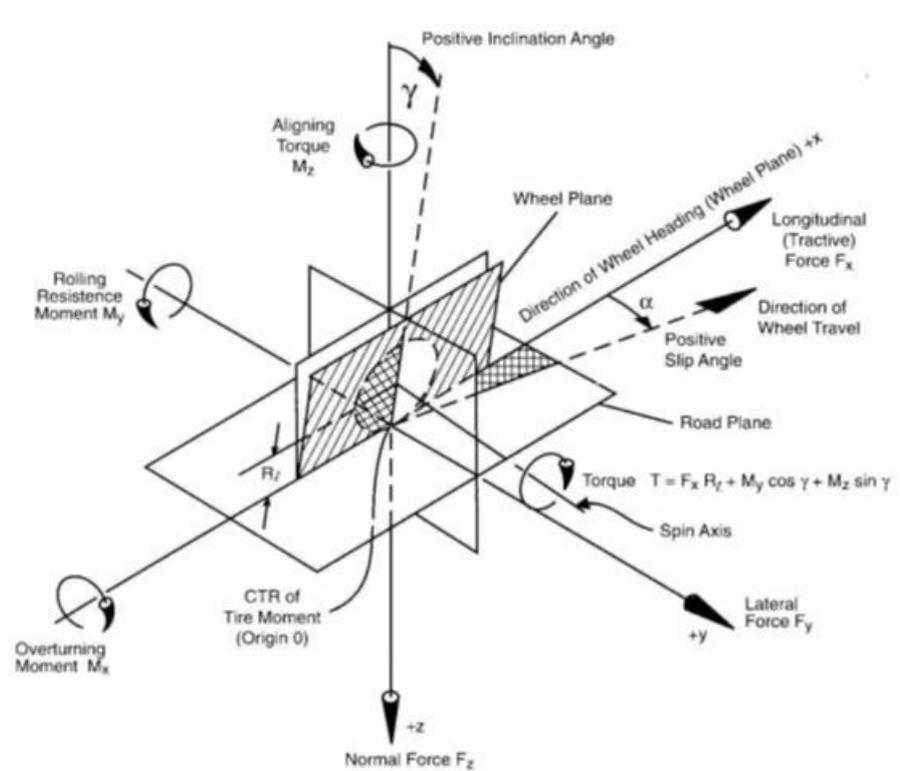


Figura 5.1 - Sistema de eixos da SAE para o pneu (MILLIKEN, 1995)

Tal como referido anteriormente, o modelo de duas rodas considera que as forças são iguais para as duas rodas do mesmo eixo, mas diferentes para rodas traseiras e dianteiras. Isto equivale a dizer que o ângulo de inclinação γ e o momento longitudinal M_x são desprezados (Figura 5.1).

Assim, no sistema de eixos adotado a origem é coincidente com centro de massa do veículo e não com o centro da zona de contacto do pneu com o solo, Figura 5.2. O eixo

dos xx (longitudinal) coincide com a direção do movimento e é paralelo ao plano da estrada, o eixo dos yy é horizontal (é considerada nula a rotação longitudinal do veículo e da estrada), passando pelo centro instantâneo de rotação da trajetória, e o eixo dos zz é perpendicular ao eixo dos xx e dos yy, fazendo um ângulo θ com o eixo da gravidade, em que θ é a inclinação da estrada.

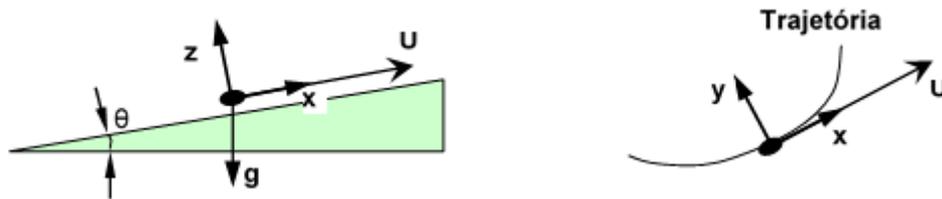


Figura 5.2 - Sistema de eixos utilizado coincidente com o centro de massa do veículo

Modelo físico

Por forma a fazer-se o balanço energético de um veículo automóvel ao longo de um percurso, é necessário analisarem-se as forças instantâneas em jogo na direção xx do movimento. Estas forças principais que actuam no veículo podem ser esquematizadas, conforme ilustrado na Figura 5.3.

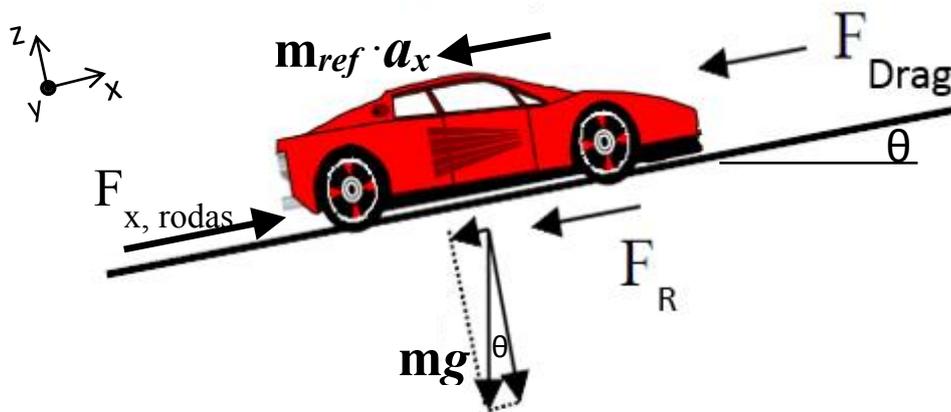


Figura 5.3 – Principais forças exteriores na direção do movimento

Num dado instante t , a força de tração nas rodas F_X tem de equilibrar todas as resistências ao movimento,

$$F_X = m_{ref} a_x + F_{Drag} + F_{Grade} + F_R \quad (5.1)$$

onde,

m_{ref} - massa do veículo multiplicada por coeficiente de inércia de rotação IR [kg];

a_x - aceleração longitudinal do veículo [m/s²];

F_{Drag} - força de resistência aerodinâmica [N];

F_{Grade} - componente do peso que actua na direcção longitudinal, causada pela inclinação da estrada [N];

F_R - somatório das forças de atrito de rolamento dos pneus [N].

A primeira parcela do segundo membro da equação representa a força de inércia a que o veículo está sujeito sempre que a sua velocidade varia, tendo o sentido indicado na figura 5.3 nas acelerações e o sentido contrário durante as reduções de velocidade.

A força F_{Drag} devido ao arrasto aerodinâmico depende da área frontal do veículo A_F , da sua velocidade relativa ao vento u_∞ , da massa volúmica do ar ρ_{ar} e do coeficiente de arrasto C_D , que é uma medida da qualidade aerodinâmica da forma do veículo, sendo dada pela equação:

$$F_{Drag} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot C_D \cdot A_F \cdot u_\infty^2 \quad (5.2)$$

Na prática, o C_D depende do ângulo entre a velocidade do vento e a velocidade do veículo mas, segundo Hucho (1998), se este um ângulo não ultrapassar os 8° para ambos os lados, o coeficiente de arrasto pode ser considerado constante e igual ao seu valor para um escoamento relativo longitudinal, $C_D(0^\circ)$, habitualmente determinado em túnel de vento. Se a velocidade do vento for reduzida, a velocidade relativa ao vento u_∞ pode ser substituída pela velocidade do veículo u , que foi o considerado no presente estudo.

F_{Grade} , a componente do peso que actua na direcção longitudinal pode ser positiva ou negativa, consoante o ângulo de inclinação da estrada θ corresponda, respectivamente, a uma subida ou a uma descida e é dada pela equação:

$$F_{Grade} = W \cdot \sin \theta = mg \cdot \sin \theta \quad (5.3)$$

Finalmente, resistência dos pneus ao rolamento F_R é constituída pelas seguintes parcelas:

$$F_R = F_{R1} + F_{R2} + F_{RY} \quad (5.4)$$

onde F_{R1} é a resistência ao rolamento livre, F_{R2} é a resistência devido ao escorregamento longitudinal do pneu quando submetido à tracção ou travagem e F_{RY} surge quando o veículo está a curvar.

A resistência ao rolamento livre F_{R1} , ocorre quando não existe binário motor ou de travagem aplicado às rodas de tracção, o que significa dizer que a força de tracção F_X é nula e pode ser calculada para o veículo inteiro pela equação (Gillespie, 1992), desde que os 4 pneus sejam iguais:

$$F_{R1} = RRC \cdot \left(1 + \frac{3.6u}{161}\right) \cdot W \cdot \cos \alpha \quad (5.5)$$

onde RRC representa o coeficiente quasi-estático de resistência ao rolamento do pneu ($u \cong 0$) e W é o peso do carro e α o ângulo do escorregamento lateral do pneu (apenas quando em curva). Esta equação, linear com a velocidade, é válida para velocidades até 120 km/h e foi a utilizada no presente trabalho.

Para velocidades superiores, a equação do coeficiente de resistência de rolamento cresce aproximadamente com a velocidade ao quadrado. Neste caso, o “*Institute of Technology in Stuttgart*” desenvolveu a seguinte equação empírica para o caso de rolamento numa superfície de alcatrão (GILLESPIE, 1992):

$$F_{R1} = f_r \cdot W \cdot \cos \alpha \quad \text{com} \quad f_r = f_0 + 3,24 f_s \left(\frac{3,6u}{161}\right)^{2,5} \quad (5.6)$$

Os dois coeficientes f_0 e f_s dependem do pneu e da sua pressão e, como exemplo, podem ser determinados para um determinado pneu através da Figura 5.4.

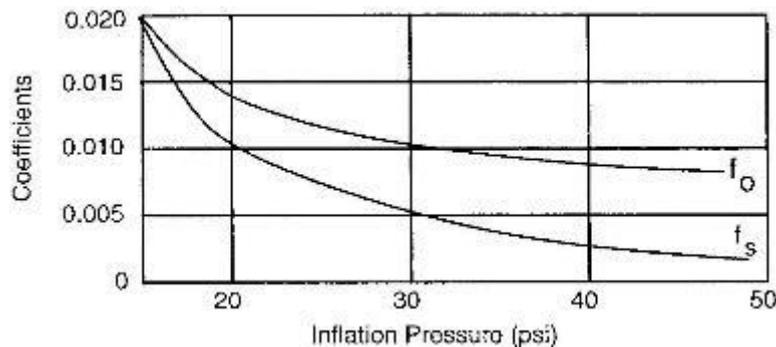


Figura 5.4 - Variação dos coeficientes f_0 e f_s em função da pressão dos pneus (GILLESPIE, 1992)

Para calcular F_{R2} é necessário definir-se o rácio de escorregamento longitudinal (S) dado pela equação:

$$S = \frac{\Omega \cdot Re}{u} - 1 \quad (5.7)$$

Onde Ω é a velocidade angular da roda, R_e é o raio efectivo da roda e u é a velocidade do veículo.

Neste modelo, apresentado primeiro por Brito (2007) foi assumido que o rácio de escorregamento longitudinal S varia linearmente com o quociente da força de tracção ou de travagem F_X pela carga vertical dinâmical sobre o pneu W_Z , ou seja :

$$S = K \cdot \frac{F_X}{W_Z} \quad (5.8)$$

em que K é a constante de proporcionalidade do pneu.

F_{R2} pode assim ser considerada como uma força fictícia correspondente à potência dissipada pelo escorregamento longitudinal do pneu quando submetido à tracção (igual ao produto do binário da roda pela velocidade angular de escorregamento longitudinal) e é dada pela equação:

$$F_{R2} = S \cdot F_X = K \cdot \frac{F_X^2}{W_Z} \quad (5.9)$$

Para a constante de proporcionalidade K foi assumido o valor de 0.15, correspondente a um rácio de escorregamento de 15% para uma desaceleração máxima de 1.0g, considerada próxima do limite de intervenção do ABS, o que pode ser considerado uma boa aproximação à primeira parte da curva apresentada na Figura 5.5.

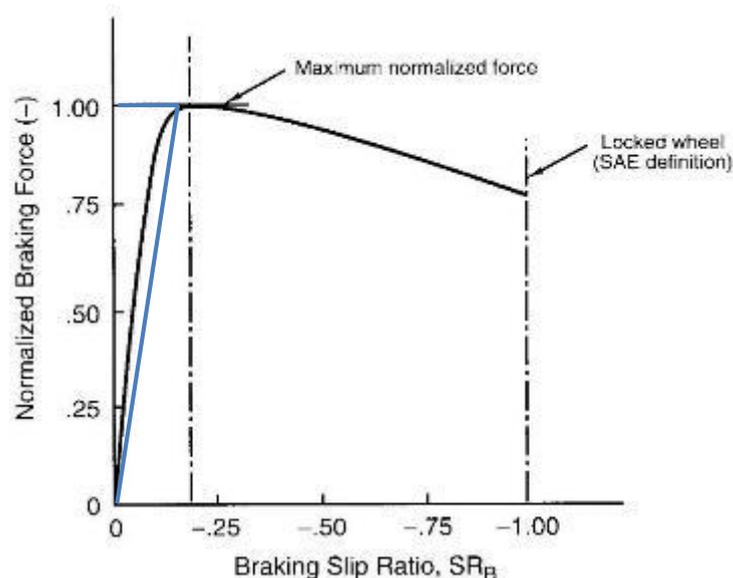


Figura 5.5 - Variação da força de travagem normalizada F_x/W_z com a relação de escorregamento longitudinal S (Milliken e Milliken, 1995) e recta para um coeficiente K de 0.15.

A força F_{RY} é função das forças laterais F_Y (imposta pela aceleração lateral do veículo a_Y quando o veículo curva) e do ângulo de escorregamento lateral do pneu α , que surge

quando este está sujeito a uma força lateral, ilustrados na Figura 5.6 e na equação seguinte (válida para 4 pneus iguais):

$$F_{RY} = F_Y \cdot \sin \alpha = m a_Y \cdot \sin \alpha \quad (5.10)$$

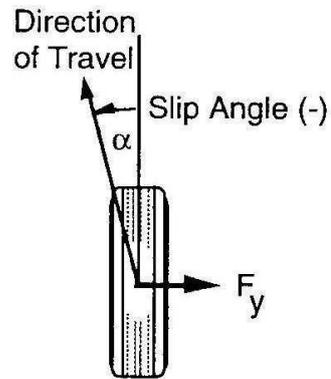


Figura 5.6 - Ângulo de escorregamento lateral e força lateral imposta no pneu quando o veículo curva
 Mais uma vez, pode estabelecer-se uma relação linear entre o rácio das forças laterais F_Y e vertical F_Z que actuam sobre os pneus e o ângulo de escorregamento lateral, dada por:

$$a_Y / g = F_Y / F_Z = CC_\alpha \cdot \alpha \quad (5.11)$$

para valores de α inferiores a 5° . A constante de inclinação CC_α (*Cornering Stiffness Coefficient*) é denominada de coeficiente de rigidez em curva do pneu e, neste modelo, assumiu-se o valor de 0.2 deg^{-1} , que equivale a um ângulo de 5° para uma aceleração lateral de $1.0g$ e que compara bem com as curvas apresentadas por Milliken e Milliken (1995) para um pneu desportivo, veja-se a Figura 5.7.

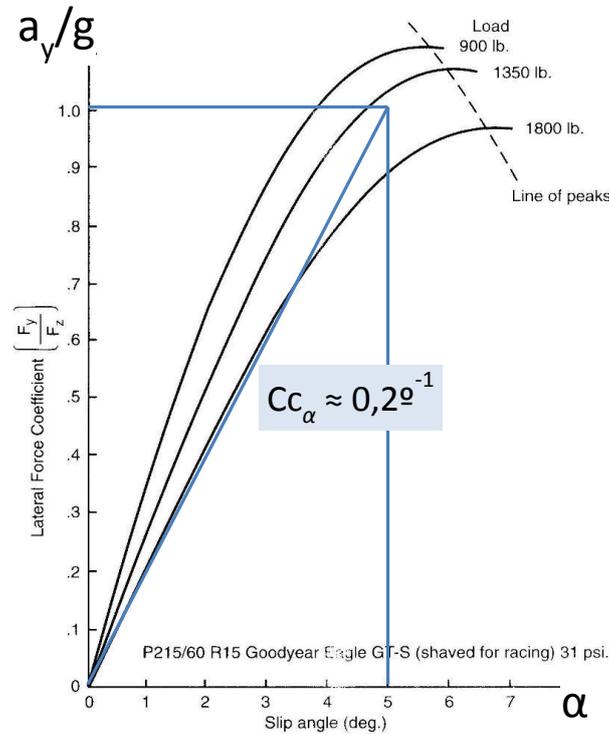


Figura 5.7 – Variação do ângulo de escorregamento lateral com a aceleração lateral para um pneu desportivo (Milliken e Milliken, 1995) e recta utilizada no presente modelo.

Finalmente, explicitando na equação 5.11, substituindo na equação 5.10 e sabendo que o ângulo α tem sempre valores pequenos pelo que $\sin\alpha \approx \alpha$, obtém-se:

$$F_{RY} = m a_Y \cdot \sin\left(\frac{a_Y}{g \cdot CC_\alpha}\right) \approx m \frac{a_Y^2}{g \cdot CC_\alpha} \quad (5.12)$$

Na Figura 5.8 é apresentado o valor de F_{RY} , adimensionalizado pela carga F_Z (para o conjunto dos quatro pneus F_Z é igual ao peso do veículo mg), em função da aceleração lateral a_Y , para um CC_α de 0.2 deg^{-1} . Verifica-se que o valor de 0.01, aproximadamente o *RRC* habitual dos pneus, apenas é ultrapassado para uma aceleração lateral superior a $0.34g$, ou seja, o atrito adicional de rolamento em curva apenas ultrapassa o valor do atrito de rolamento livre em recta, para acelerações laterais superiores aquele valor. Isto

significa que um CC_α de $0.2^{\circ-1}$ talvez seja demasiado elevado para os pneus habituais e mais adequado para pneus de competição

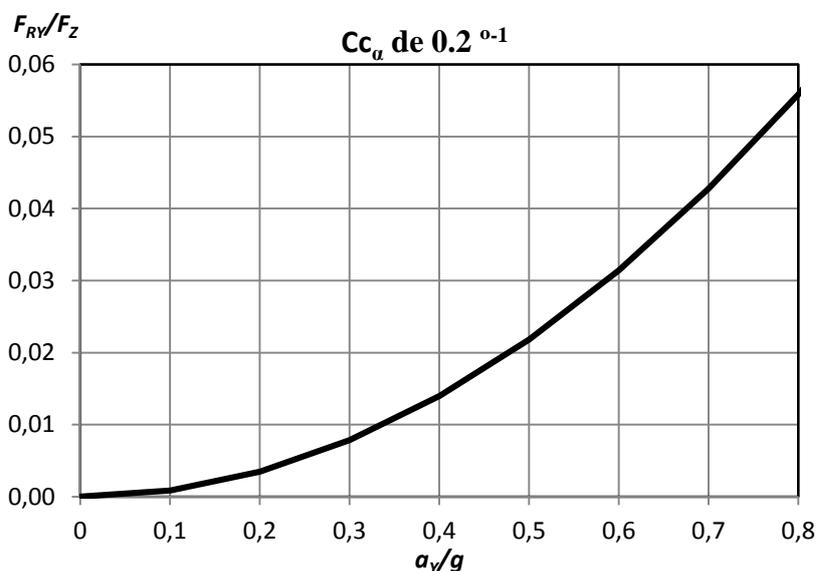


Figura 5.8 – Variação do atrito de rolamento em curva com a aceleração lateral

De seguida descreve-se a forma como o modelo físico foi implementado computacionalmente.

5.3. Modelo computacional

A implementação computacional do modelo matemático foi feita na plataforma Matlab[®]/Simulink[®], visando a determinação dos fluxos energéticos do veículo durante um ciclo de condução pré-definido, nomeadamente:

- a energia total que o motor tem fornecer às rodas (energia motora ou de propulsão);
- a energia dissipada por atrito (arrasto aerodinâmico + resistência ao rolamento)
- a energia dissipada na travagem;
- a energia potencial (se as altitudes inicial e final forem diferentes), etc.

O programa e todas as suas variáveis foram definidas em inglês, por forma a evitar ambiguidades e a garantir a universalidade do mesmo.

Relativamente aos dados do percurso, os parâmetros de entrada do modelo computacional, diferem consoante o tipo de ciclo de condução utilizado:

- **Ciclo Real** – como os dados foram recolhidos pelo sistema MQGPS com uma frequência de aquisição de 5 Hz,
- as variáveis são definidas na base de uma série temporal discreta, com intervalos regulares de 0.2 segundos:

- Velocidade do veículo, u , ou *speed* [km/h];
 - Altitude da estrada, *altitude* [m];
 - Aceleração lateral a_y [m/s²].
- **Ciclo Normalizado** – a única variável de entrada é a velocidade do veículo u , sendo definida na base de uma série temporal discreta, com intervalos regulares de 1.0 segundos.

Em ambos os casos, as variáveis são definidas como uma função linear dentro de cada intervalo de tempo. Através destas funções é possível calcular todas as quantidades relevantes, nomeadamente, a distância que o veículo percorre entre os instantes t_1 e t_2 ,

$$L_{t_1 \rightarrow t_2} = \int_{t_1}^{t_2} u \, dt \quad (5.13)$$

a aceleração longitudinal “instantânea” a_x ,

$$a_x \, t = \frac{du \, t}{dt} \quad (5.14)$$

a força genérica $F_i(t)$, onde o subscrito i representa qualquer uma das forças descritas no modelo físico, *e.g.* na equação 5.1. A potência correspondente pode ser obtida por,

$$P_i \, t = F_i \, t \cdot u \, t \quad (5.15)$$

e, finalmente, a energia genérica $E_i(t)$, correspondente ao percurso entre os instantes instantes t_1 e t_2 pode ser obtida pela integração:

$$E_i = \int_{t_1}^{t_2} P_i \, t \, dt \quad (5.16)$$

Uma análise mais detalhada deste modelo pode ser encontrada na dissertação de mestrado de Brito (2007).

Para além dos dados do percurso, existem outros parâmetros de entrada necessário para o programa correr, relacionados com as características do veículo, pneus e local, apresentadas de seguida:

as especificações do veículo,

- Massa do veículo, M [kg];
- Coeficiente de Inércia de rotação do veículo, IR ;
- Distância entre-eixos, *wheelbase length*, L_{wb} [m];

- Distância horizontal do centro de massa ao eixo da frente sobre a distância entre eixos, b/L_{wb} ;
- Coeficiente de resistência aerodinâmica, C_D ;
- Área frontal, A_F [m^2];
- Altura do veículo em relação ao solo, *Height*, H [m];
- Altura do fundo do veículo em relação ao solo, *Ground Clearance*, GC [m];
- Largura do veículo, *width* w [m];

as constantes que dependem dos pneus e da superfície de contacto,

- Coeficiente de escorregamento longitudinal do pneu, *Slip ratio coefficient* K ;
- Coef. de rigidez em curva do pneu, *Cornering stiffness coeffic.* CC_α [$N_Y/(N_z \cdot ^\circ)$];

e as variáveis que dependem do local

- Aceleração da gravidade, g [m/s^2];
- Pressão atmosférica [Pa];
- Constante do gás para o ar como mistura de gases perfeitos, \bar{R} [$J/(kg \cdot K)$];
- Temperatura do ar, T_{ar} [$^\circ C$].

Estas três últimas variáveis são utilizadas no cálculo da massa volúmica do ar, necessária para a determinação do arrasto aerodinâmico. A temperatura do ar pode variar de local para local, no entanto o modelo assume que esta é constante.

O programa apresenta a seguinte opção: se a área frontal for conhecida, a constante de entrada no programa é a área frontal, caso contrário, esta pode ser calculada a partir da altura do veículo, a altura do fundo do veículo e a largura deste. Para tal o programa utiliza a equação aproximativa seguinte:

$$A_F = H - GC \cdot w \cdot 0,93 \quad (5.17)$$

5.4. Parâmetros para a caracterização dos ciclos de condução

Como já foi referido, o modelo computacional foi inicialmente desenvolvido para fazer o balanço energético de um dado veículo ao longo de um determinado percurso. Os resultados são assim directamente dependentes das características do veículo e da dimensão do percurso, nomeadamente no caso das potências ou energias genéricas referidas nas equações 5.15 e 5.16.

No entanto, para a caracterização de ciclos de condução, devem ser definidos parâmetros que sejam independentes do veículo ou que, pelo menos, mesmo sendo dependentes de algumas características do veículo, não dependam do tamanho do percurso e da massa do veículo.

Como exemplo, em vez de potências e energias absolutas será importante passar a determinar,

- Potências específicas por unidade de massa do veículo - $(P_i/m(t))$ em W/kg;
- Energias específicas por unidade de massa e de comprimento – $(E_i/m/L)$ em J/kg/m ou kWh/Ton/100km.

Assim, no trabalho presente foram definidos uma série de parâmetros para a caracterização de ciclos normalizados e reais, os quais foram implementados no código Matlab[®]/Simulink[®] e representaram um significativo acrescento, sendo apresentados de seguida.

Será também de referir que atualmente, mesmo no caso dos ciclos normalizados, há uma deficiente caracterização energética dos mesmos, a qual raramente ultrapassa a mera enunciação de alguns valores como velocidade e acelerações máximas e tempos de paragem, manifestamente insuficiente para permitir uma comparação objectiva entre deferentes ciclos e para aferir da sua concomitância com a circulação real.

Parâmetros independentes do veículo

Começaram por ser definidos os parâmetros que habitualmente aparecem na literatura na apresentação dos ciclos de condução normalizados, a saber:

- o comprimento do percurso, L [m];
- o tempo total do percurso, *Total Duration Time*, *TotalTime* [s];
- tempo total das paragens em percentagem do tempo total, *StopTime* [%];
- velocidade máxima, *maximum velocity*, V_{max} [km/h] (durante 1 segundo, no caso dos circuitos reais implica uma *five point average*);
- velocidade média sem paragens, *non-stop mean velocity*, V_{mean_ns} [km/h]
- aceleração máxima positiva; *maximum positive acceleration*, A_{max} [m/s²] (durante 1 segundo, no caso dos circuitos reais implica uma *five point average*);
- aceleração máxima negativa, *maximum negative acceleration*, A_{min} (idem);

Seguiram-se parâmetros geométricos relacionados as **variações de altitude** e com a **sinuosidade** dos percursos reais.

No caso da **altitude**, num circuito real importa não só saber a diferença entre o início e o fim do percurso, mas também os valores correspondentes às subidas acumuladas e descidas acumuladas, bem como as respetivas quantidades específicas em metros por quilómetro de percurso.

No exemplo fictício da Figura 5.9, num percurso de 20 km a variação de altitude entre o início e o fim é de apenas +20 m, ou +1 m/km em termos específicos, mas o total acumulado de variação de altitude nas subidas é de 270 m (ou 13.5 m/km) e o total acumulado nas descidas é de 250 m (ou 12.5 m/km).

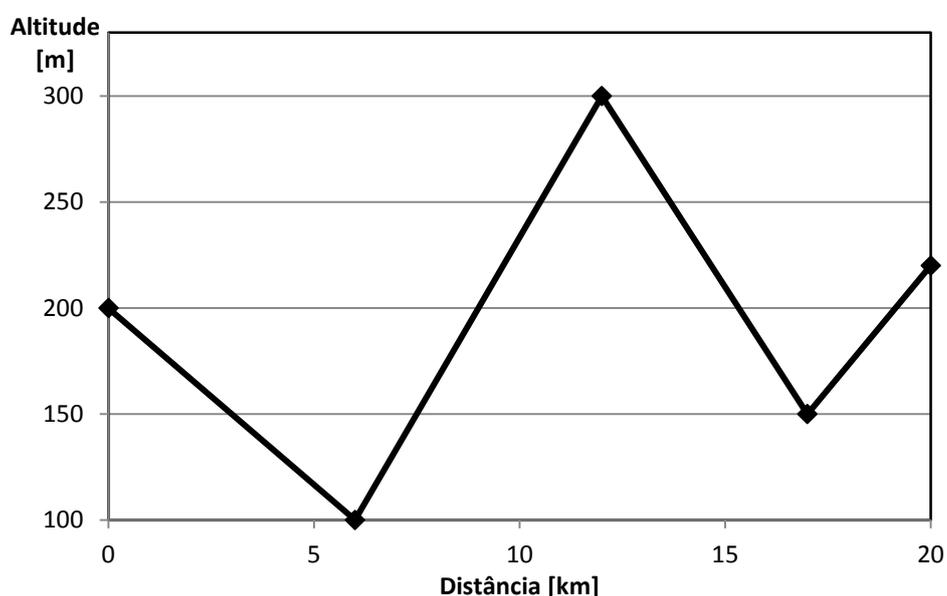


Figura 5.9 – Exemplo de perfil de altitudes de um percurso fictício de 20 km, com 270 m de subidas acumuladas, 250 m de descidas e variação final positiva de 20 m.

Assim, o *software* foi completado de modo a calcular e apresentar os parâmetros seguintes:

- Altitude máxima, *maximum altitude*, *Alt_max* [m];
- Altitude mínima, *minimum altitude*, *Alt_min* [m];
- Variação de altitude, *net altitude variation*, *DeltaZ* [m];
- Variação específica de altitude, *net specific altitude variation*, *SpecDeltaZ* [m/km];
- Subidas acumuladas por km, *Specific Accumulated Rises*, *SACRise* [m/km];
- Descidas acumuladas por km, *Specific Accumulated Descents*, *SACDesc* [m/km];

Relativamente à **Sinuosidade**, foram definidos dois tipos de parâmetros, um geométrico, o número de voltas completas que o veículo efetua para a direita e para a esquerda, por quilómetro de percurso, e o outro energético relacionado com o atrito em curva.

A sinuosidade geométrica foi calculada através da determinação da velocidade angular instantânea $\omega(t)$ do veículo em torno do seu eixo vertical⁶,

$$\omega(t) = a_y(t) / R(t)^{0.5} \quad (5.18)$$

em que $R(t)$ é o raio de curvatura instantâneo da trajetória em metros, separando os valores positivos (rotação para a direita) dos valores negativos (rotação para a esquerda) seguido da sua integração e divisão pelo comprimento do percurso obtém-se, respetivamente, a **Sinuosidade para a direita** e a **Sinuosidade para a esquerda**,

$$\text{Sinuosidade } p / \text{ direita, } \textit{sinuosity_R} \text{ voltas / km} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}{2\pi L} \quad \text{se } \omega > 0 \quad (5.19)$$

$$\text{Sinuosidade } p / \text{ esquerda, } \textit{sinuosity_L} \text{ voltas / km} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}{2\pi L} \quad \text{se } \omega < 0 \quad (5.20)$$

em que L é o comprimento total do percurso em km. Estes dois parâmetros foram calculados em folha de cálculo excel mas deverão, como trabalho futuro, ser introduzidos no código MatLab.

Quanto ao parâmetro energético de sinuosidade, ele foi definido com base nas equações 5.12 e 5.15, com a potência de atrito em curva a ser dada por,

$$P_{RY} \text{ } t = m \frac{a_y^2}{g \cdot Cc_\alpha} \cdot u \text{ } t \quad (5.21)$$

dividindo pela massa m do veículo e multiplicando pelo coeficiente de rigidez em curva do pneu Cc_α , obtém-se uma potência específica que é independente do veículo. Integrando ao longo do tempo e dividindo pelo comprimento do percurso obtém-se então o **Fator energético de sinuosidade**,

$$\textit{Sinuosity energy factor, Sinuosity_EF} \text{ J/ kg/ m} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} a_y^2(t) u(t) dt}{gL} \quad (5.22)$$

⁶ Alternativamente a esta equação poderá ser utilizada seguinte: $\omega(t) = a_y(t)/u(t)$

Este fator é proporcional à energia de atrito em curva, por unidade de massa do veículo e por unidade de comprimento do percurso, mas não inclui qualquer característica do veículo, ou seja, apenas depende das características dinâmicas do percurso. Para obter o valor efetivo da energia específica de atrito em curva basta dividi-lo pelo Cc_a em radianos⁻¹.

Será de salientar que como $a_y = u^2/R$ e $L = \int u \cdot dt$, a potência de atrito em curva é proporcional a u^5/R^2 e a correspondente energia por unidade de comprimento a u^4/R^2 .

Isto significa que para uma curva com um dado R , a energia de atrito aumenta rapidamente com a velocidade. Assim é normal que o atrito em curva seja maior em curvas de autoestrada (apesar dos grandes raios de curvatura) do que em curvas apertadas na cidade. Uma dada curva de raio R em cidade e a 40 km/h terá a mesma energia de atrito, por unidade de comprimento, do que uma curva em AE a 120 km/h com um raio de curvatura de raio $9R$.

Finalmente foram definidos outros parâmetros específicos de potência e energia, desprezando os atritos aerodinâmico e de rolamento. Utilizando as equações 5.1 e 5.3 e assumindo que o coeficiente de inércia de rotação IR tem o valor 1.0, a força motora (ou de travagem consoante o sinal) sem atrito nas rodas $F_{X,friction\ free}$ pode ser expressa por,

$$F_{X,friction\ free}(t) = m \cdot a_x(t) + mg \cdot \sin\theta(t) \quad (5.23)$$

pelo que a respetiva potência específica instantânea não depende do veículo,

$$P_{X,friction\ free}(t) / m \quad [\text{W/kg}] = a_x(t) + g \cdot \sin\theta(t) \cdot u(t) \quad (5.24)$$

Percorrendo todo o ciclo de condução, o programa determina então os seus valores máximo positivo e máximo negativo definindo assim os seguintes dois parâmetros:

- Máxima potência específica motora sem atrito, *maximum Friction Free specific Pulling Power, FFsPP_max* [L^2T^{-3} ou W/kg], (avaliada no intervalo de 1 segundo, no caso dos circuitos reais implica uma “five point average”);
- Máxima potência específica de travagem sem atrito, *maximum Friction Free specific Braking Power, FFsBP_max* [L^2T^{-3} ou W/kg], (avaliada no intervalo de 1 segundo, no caso dos circuitos reais implica uma “five point average”);

Da integração da equação 5.24 ao longo do tempo, seguida da divisão pelo comprimento do percurso resulta a energia específica por unidade de comprimento,

$$\text{Friction free specific energy [J/kg/m]} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} a_x + g \cdot \sin \theta \cdot u \, dt}{L} \quad (5.25)$$

que deverá ser separada na componente positiva (motora ou de propulsão) e negativa (travagem), sendo assim definidos mais os dois seguintes parâmetros de caracterização:

- energia específica motora sem atrito, *Friction Free specific Pulling Energy, FFsPE* [LT⁻² equivalente a J/kg/m ou kWh/ton/100km];
- energia específica de travagem sem atrito, *Friction Free specific Braking Energy, FFsBE* [LT⁻² equivalente a J/kg/m ou kWh/ton/100km];

A lei da conservação da energia obriga a que estes dois parâmetros tenham valores iguais, no caso da altitude final ser igual à inicial e as velocidades inicial e final do veículo serem iguais ou nulas, o que ocorre sempre no caso dos ciclos normalizados mas pode não acontecer nos ciclos reais.

Estes dois parâmetros assumem uma importante relevância na caracterização energética de ciclos de condução normalizados ou reais, pois são um **minorante** da **energia motora** necessária para que um veículo realize o percurso e um **majorante** da **energia de travagem** que poderá ser eventualmente recuperada por um veículo híbrido ou elétrico.

Parâmetros dependentes do veículo

Os parâmetros que incluem as características do veículo são baseados nos termos completos da equação 5.1 e semelhantes aos últimos apresentados no ponto anterior: ou seja, são potências por unidade de massa, aqui designadas genericamente de *VSP's* (*Vehicle Specific Powers*), ou energias por unidade de massa e por unidade comprimento, designadas de *SE's* (*Specific Energies*). Isto significa que, embora dependam de algumas características do veículo (coeficientes de atrito aerodinâmico, de rolamento, etc) não dependem da sua massa nem do comprimento do percurso, pelo que os resultados variam pouco com o peso ou dimensão do veículo.

Na prática quanto maior e mais pesado é o automóvel, menores serão os atritos em termos relativos (e.g. o *RRC* e o *C_D* tendem a diminuir e a área frontal não é proporcional à massa do veículo), pelo que, para um mesmo ciclo de condução, os valores dos parâmetros a seguir apresentados tendem a baixar ligeiramente.

Os resultados apresentados no capítulo seguinte utilizam um veículo denominado “de referência”, cujas características e dimensões se aproximam do atual carro médio Europeu mas com baixos RRC e C_D .

Assim sendo, estes parâmetros são obviamente muito relevantes para a comparação entre os diversos ciclos de condução normalizados e para a caracterização energética de percursos reais.

Os parâmetros calculados pelo programa e utilizados para a caracterização dos ciclos de condução são então seguintes:

- Máxima potência específica motora do veículo, *maximum Vehicle Specific pulling Power*, $VSpP_{max}$ [L^2T^{-3} ou W/kg], (avaliada no intervalo de 1 segundo, no caso dos circuitos reais implica uma “five point average”);
- Máxima potência específica de travagem de veículo, *maximum Specific braking Power*, $VSbP_{max}$ [L^2T^{-3} ou W/kg], (avaliada no intervalo de 1 segundo, no caso dos circuitos reais implica uma “five point average”);

Finalmente, as várias **energias específicas, por unidade de massa e por unidade de comprimento** (*Specific Energies*, $SE's$), com dimensões de [LT^{-2}], equivalente a J/(kg.m) ou a kWh/(Ton.100km):

- Energia específica motora, *Specific pulling Energy* - SpE;
- Energia específica de travagem, *Specific braking Energy* - SbE;
- Energia específica de atrito aerodinâmico, *Specific drag friction Energy* - SdfE;
- Energia específica de atrito de rolamento, *Specific rolling friction Energy* – SrfE. Esta tem três componentes, *free rolling, slip e cornering friction*,
 - Energia específica dissipada no rolamento se o veículo executasse o circuito sem binário de entrada nas rodas, SrfEfree;
 - Energia específica dissipada no rolamento devido ao binário motor ou de travagem, *Specific slip friction Energy* – SrfEslip;
 - Energia específica dissipada no rolamento devido às curvas, *Specific cornering friction Energy* – SrfEcornering;
- Energia específica devido à variação da energia potencial do veículo entre o início e o fim do percurso, *Specific Energy due to altitude change* – SEaltitude.

Embora não sendo parâmetros diretos para a caracterização dos percursos, o programa tem mais variáveis de saída, muito úteis para a análise de resultados, de onde se destacam as seguintes:

- Variação da energia potencial associada às subidas, E_{grade_s} [W.h];
- Variação da energia potencial associada às descidas, E_{grade_d} [W.h];
- Potência Específica útil motora, SP_{prop} [W/kg];
- Potência Específica de travagem, SP_{brake} [W/kg];
- Potência Específica do atrito, $SP_{friction}$ [W/kg];
- Potência Específica devido ao declive da estrada, SP_{grade} [W/kg];
- Declive da estrada, $Road_slope$ [%].

Será de salientar que o veículo obedece à lei da conservação da energia, quer em termos instantâneos (potências ou potências específicas) quer na integração ao longo do percurso (energias ou energias específicas).

Assim, reescrevendo a equação 5.1 sob a forma de potências (não inserindo a variável t por uma questão de simplificação) obtém-se,

$$P_{X,pull\ or\ brake} = F_X \cdot u = m_{ref} a_X \cdot u + mg \cdot \sin \theta \cdot u + F_{Drag} \cdot u + F_R \cdot u \quad (5.26)$$

equivalente a,
$$P_{X,pull\ or\ brake} = m_{ref} u \cdot \frac{du}{dt} + mg \cdot \frac{dh}{dt} + F_{Drag} \cdot u + F_R \cdot u \quad (5.27)$$

em que h é a altitude instantânea do veículo, resultando em,

$$P_{X,pull\ or\ brake} = \frac{dE_C}{dt} + \frac{dE_G}{dt} + P_{Drag} + P_R \quad (5.28)$$

com E_C e E_G a serem, respetivamente, a energia cinética e a energia potencial gravítica do veículo num dado instante.

Esta equação indica que em qualquer instante t , a potência motora nas rodas (ou de travagem) que “entra” (ou sai) no veículo, é igual às taxas de acumulação de energia cinética e de energia potencial gravítica, somada com as potências de atrito aerodinâmico e de rolamento (saídas), ou seja, não é mais do que uma equação de conservação da energia. O mesmo se pode concluir no caso das potências específicas VSP 's.

Da mesma forma se pode obter, após a integração no tempo de todo o percurso,

$$\text{Pulling Energy} = \text{Braking Energy} + \text{Drag Frict.E} + \text{Rolling Frict.E} + \Delta E_C + \Delta E_G \quad (5.29)$$

ou seja, no total do percurso, a energia motora fornecida nas rodas (entrada) é igual à soma das energias dissipadas (travagem, atrito aerodinâmico e atrito de rolamento) mais as eventuais variações de energia cinética e de energia potencial gravítica do veículo entre o início e o fim do percurso.

Obviamente, esta afirmação também é válida para as energias específicas $SE's$.

5.5. Estrutura e utilização do programa Driving Cycle

Neste sub-capítulo é descrita a estrutura do program e explicados os procedimentos principais para a sua correta utilização, nomeadamente relativamente aos seus *inputs* e *outputs*.

Inicialmente o programa implicava a utilização de dois modelos simulinks diferentes, para os ciclos normalizados e para os ciclos reais, além de ter um a entrada de dados complexa e morosa e *outputs* insuficientes.

Para solucionar estes aspectos, foi pedido ao colega José Miguel Alves Pires, a concepção de uma interface gráfica para o programa, vulgo *Front-end*, mais intuitiva e que permitisse uma melhor e mais rápida interacção do utilizador com o modelo (mais “*user-friendly*”).

Vantagens:

- Automatização de processos;
- Diminuição de erros devido ao utilizador;
- Mais intuitivo, simples e rápido;
- Universalidade do modelo (modelo único em vez de dois distintos);
- Versatilidade (possibilita a interacção com outros modelos);
- Possibilidade da integração de outros módulos.

Com esse intuito, foi re-escrito a parte do programa em Matlab[®]. O programa, denominado *Driving Cycle Program*, permite agora a interligação da interface gráfica *Front-end* (criada com recurso ao GUIDE do Matlab[®]) e o modelo Simulink[®]. Seguidamente, será abordado o modo de funcionamento do *Front-end*, a sua estrutura base, as funcionalidades incluídas e algumas particularidades.

Estrutura

- O programa computacional é composto pela sua estrutura principal:
 - Inputs
 - Modelo Simulink
 - Outputs
- Pela sua estrutura do Front-End (figura)
 - Compreende todo o código que permite a manipulação do conteúdo introduzido pelo utilizador no Front-end, passagem desses parâmetros ao modelo Simulink e posterior visualização dos resultados na interface gráfica (p. ex. funcionalidades dos botões e demais elementos gráficos).

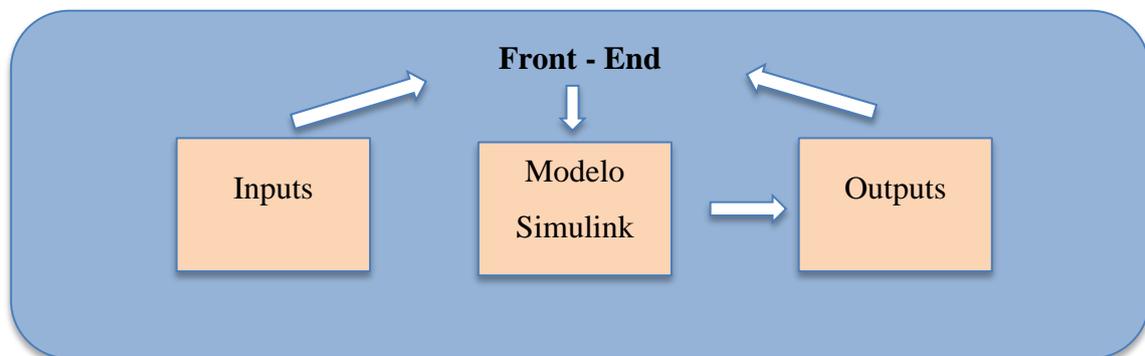


Figura 5.10 - Estrutura principal do programa *Driving Cycle*

Para facilitar a compreensão do modo de funcionamento do *Driving Cycle Program* apresentar-se-á, de seguida, uma imagem do “*front-end*” final (figura) e tecer-se-ão alguns comentários.

Notas prévias de utilização

1. O programa foi inteiramente escrito em inglês, por forma a evitar ambiguidades e a garantir a universalidade do mesmo;
2. O programa, cujo directório, é o da raíz do Matlab, foi compartimentado em pastas com nomes específicos, por duas razões principais: permitir a procura dos ficheiros em pastas específicas e por forma a facilitar a sua compreensão e manipulação futuras.
3. Aquando da inicialização do programa, surge uma caixa de diálogo que explicará sucintamente o funcionamento do mesmo.
4. Para mais informações, é possível clicar nos botões “*Help*” disponíveis, que farão aparecer um ficheiro de texto, com a explicação daquela secção. Os ficheiros de texto são uma boa opção para conferir versatilidade ao programa, na medida em

que, o ficheiro pode ser alterado (incluindo novas informações ou eliminando algum erro contido) e desde que seja mantido o nome original, da próxima vez que o programa iniciar, será apresentado esse novo conteúdo.



Universidade do Minho

Driving Cycle Front End

INPUTS

1. Select entry Excel file

Standard Cycle Real Cycle

Altitude Choose File

Lateral Acceleration Choose File

Speed Choose File

2. Vehicle Mass and Geometrical Properties

Vehicle Choose File

Gravity (g) [m/s²] Rotational Inertia Coef. (Ri)

Vehicle Mass (M) [kg] Tyre RRC

Distance between Axes (L) [m] Slip Ratio Coef. (K)

Centre of Mass

Height (h) [m] Cornering Stiffness Coef. (CCa)

Distance to Front Axis (CG_L) [m] Front Wheels [°⁻¹]

Rear Wheels [°⁻¹]

3. Aerodynamics

Frontal Area (Af) [m²] Drag Coefficient (Cd)

Air Density Calculation

Ambient Pressure (P_amb) [Pa] Air Density [kg/m³]

Air Temperature (T_air) [°C] Calculated

Ideal Gas Constant for Air (R) 0.287 [kJ/(kmolK)]

4. Simulink Model

Choose File

OUTPUTS

1. Route

Total distance [km] Total time [s]

Real Route

Altitude

<p>Uphill and Downhill</p> <p>Specific Accumulated Uphill <input type="text"/> [m / km]</p> <p>Specific Accumulated Downhill <input type="text"/> [m / km]</p> <p>Maximum Road Slope <input type="text"/> [%]</p>	<p>Difference</p> <p>Maximum <input type="text"/> [m]</p> <p>Minimum <input type="text"/> [m]</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------

2. Vehicle Specific Power [W/kg]

Propulsion Max

Braking Max

Friction Max

Gravitic

Maximum

Minimum

3. Specific Energy

[J/m³-kg⁻¹] [kWh/100km] [L/100km]

Propulsion

Braking

Gravitic

Drag

Rolling Resistance

Free

Slip

Cornering

Generated Excel File

Generated Excel File

Generated Excel File

Generated Excel File

Graphics

Torque

José Pees & Bruno Araújo, Minho University, Version 1.0

Figura 5.11- "Print Screen" do Front-End

Utilização

Inputs

1. *Select entry Excel File*

1. Selecciona-se o ciclo de condução pretendido: normalizado (“*Standard*”) ou real (“*Real*”)
2. Em função disso, o *front-end* indica qual(ais) o(s) ficheiro(s) Excel que devem ser importados;
3. Ao clicar no botão “Choose File” surgirá uma caixa de diálogo, que nos reencaminhará directamente para o directório específico do ciclo em questão, por forma, a evitar confusões ou erros devidos ao utilizador. Isto é válido para todas as caixas de diálogo que forem abertas. O seu directório é único, garantido-se assim a validade dos *inputs* introduzidos.

2. *Vehicle Mass and Geometrical Properties*

1. Selecciona-se o ficheiro Excel com todas as especificações técnicas relevantes do veículo automóvel. Optou-se por esta estratégia, para evitar o preenchimento moroso e repetitivo de todos estes parâmetros, que para um mesmo veículo são constantes. Dado que se optou pela compartimentação em subpastas, a adição de novos veículos fica facilitada, pois basta replicar o ficheiro original, renomeá-lo com o nome do veículo, e colocá-lo nesta pasta.
2. Serão preenchidos no *front-end*, todos os parâmetros geométricos do veículo e aerodinâmicos do veículo.

3. *Aerodynamics*

1. É apenas necessário preencher as condições ambientais (temperatura e pressão).

4. *Simulink Model*

1. Selecciona-se o modelo Simulink pretendido. O modelo utilizado foi tornado universal para ambos os ciclos, mas salvaguardando a possibilidade de alguma alteração futura, foi incluído este aspecto também.

5. *Run Simulation*

Premindo este botão, inicia-se a simulação do modelo. O *front-end* utiliza a informação introduzida da seguinte forma:

1. O modelo Simulink é carregado para a Workspace do Matlab, sendo no entanto “invísivel”, i.e., “corre” em “*background*”.
2. Ao importar o ficheiro de Excel velocidade/tempo (comum a ambos os tipos de ciclos), a variável tempo é lida e passada ao modelo Simulink como parâmetro de entrada, o que juntamente com a selecção de quais os dados devem ser utilizados consoante o ciclo escolhido, assegura a universalidade do modelo;
3. Ocorre todo o processamento do modelo Simulink;
4. Surgirão duas caixas de diálogos relativas, respectivamente, às potências específicas de saída (VSP's) e às energias específicas (SE's), que solicitarão ao utilizador que grave estes dados para ficheiros Excel, no directório de raiz do Matlab e que prontamente serão abertos na aplicação Excel. Ao serem gravados neste formato, podem ser posteriormente abertos e comparados com outros, de uma forma simples e rápida.
5. Todos os outputs relevantes surgirão na interface gráfica, nomeadamente:
 - i.* Tempo e distância total;
 - ii.* Subidas e descidas acumuladas e inclinação máxima da estrada (indicador da “agressividade do percurso” e que pode ser utilizado para rapidamente avaliar a coerência dos resultados). Na altura que foi tirado este “print screen” (figura 5.12), o valor que consta da inclinação máxima, estava errado, e foi facilmente detectado.
 - iii.* Altitude mínima, máxima e a variação entre o instante inicial e final
 - iv.* Potências específicas [W/kg]
 - v.* Energias específicas ([$J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$] e [kWh/100km/ton]). Deixou-se também o espaço reservado para o cálculo destas em [L/100km].
 - vi.* Surgirão também os nomes dos ficheiros onde foram gravados estes dados.

Outputs Gráficos

Para esta implementação, foi necessário adicionar mais um módulo ao programa. Este módulo é uma interface gráfica subordinadas à principal e que permite a apresentação imediata dos principais outputs sob a forma de gráficos.

Com este módulo, é concluída a versão do programa, que diz respeito à interface entre o modelo Simulink e os resultados obtidos da evolução dinâmica do veículo ao longo do percurso. O módulo dos gráficos exibirá os gráficos dos *outputs* mais relevantes neste contexto (figura 5.12), nomeadamente (todos em função do tempo):

- Velocidade
- Altitude
- Inclinação da estrada (%)
- Distância
- Potências específicas do veículo (VSPs)

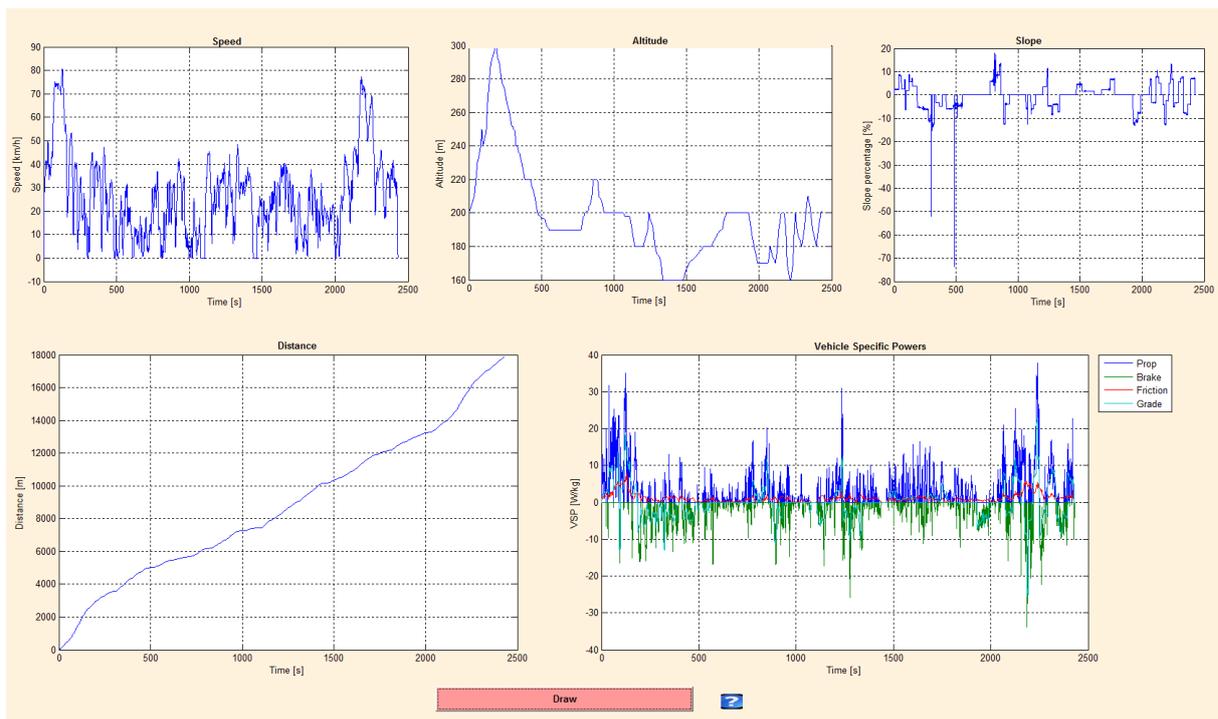


Figura 5.12 - Interface gráfica do módulo dos gráficos

Isto permite uma rápida análise das simulações e a detecção de inconsistências nos resultados. A inclinação percentual da estrada é um bom indicador disso, já que permite identificar pontos parasitas, o que poderá indiciar erros na filtragem inicial dos dados. Para facilitar e auxiliar na escrutinação dos dados, foi incluída ainda outra funcionalidade (canto superior esquerdo da barra de ferramentas), que permite ao utilizador identificar

as coordenadas desses pontos e, com isso, rapidamente encontrá-los no respectivo ficheiro Excel de entrada.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo modelo descrito anteriormente nos diferentes percursos de condução e é efetuada uma comparação com os resultados obtidos nos ciclos de condução normalizados.

O resultado destas análises é calculado através do modelo físico desenvolvido na plataforma *Matlab/Simulink*, através dos dados de entrada de cada percurso de condução real ou ciclo de condução normalizado. Os dados de entrada de cada percurso real necessários são os que sofreram tratamento na primeira parte do trabalho, que são carregados através de um ficheiro em Excel em função do tempo, e são eles:

- Velocidade;
- Aceleração Lateral;
- Altitude.

Para os ciclos de condução normalizados o ficheiro em Excel terá que ser no formato descrito anteriormente mas visto que estes ciclos não contabilizam a altitude nem a aceleração lateral, apenas se torna necessário carregar na plataforma o ficheiro de velocidade correspondente.

Veículo de Referência

Na análise efetuada aos ciclos foram utilizadas as características de um veículo de referência do mercado europeu como dados de entrada. O veículo selecionado foi da categoria com mais presença no mercado europeu, a dos veículos de passageiros ligeiro compacto, do segmento C. As características utilizadas como dados de entrada foram:

- | | |
|-----------------------------------------------------|------------------------|
| – Vehicle Mass, M [kg] | 1400 |
| – Rotational Inertia Coef., IR | 1,05 |
| – Distance between Axes, L_{wb} [m] | 2,637 |
| – Centre of Mass height, h [m] | 0,594 |
| – Centre of Mass distance to front-axis, CG_L [m] | 0,5 |
| – Rolling Resistance Coef., RRC | 0,008 |
| – Vehicle Frontal Area, A_F [m ²] | 2,22 |
| – Drag Coef., C_D | 0,27 |
| – Slip Ratio Coef. (K) | 0,15 |
| – Cc_α Front Wheels | 0,2 [° ⁻¹] |
| – Cc_α Rear Wheels | 0,2 [° ⁻¹] |

Será de salientar que as características acima equivalem a um veículo moderno com massa reduzida (tara inferior a 1250 kg para uma massa com dois passageiros de 1400 kg), um baixo coeficiente estático de resistência ao rolamento (RRC) dos pneus de 0.008 (que corresponde ao limiar entre as classes de eficiência energética B e C, sendo a maioria dos pneus actuais da classe E ou superior, vide o regulamento CE-1222/2009) e uma baixa resistência aerodinâmica ($C_D \cdot A_F = 0.60$).

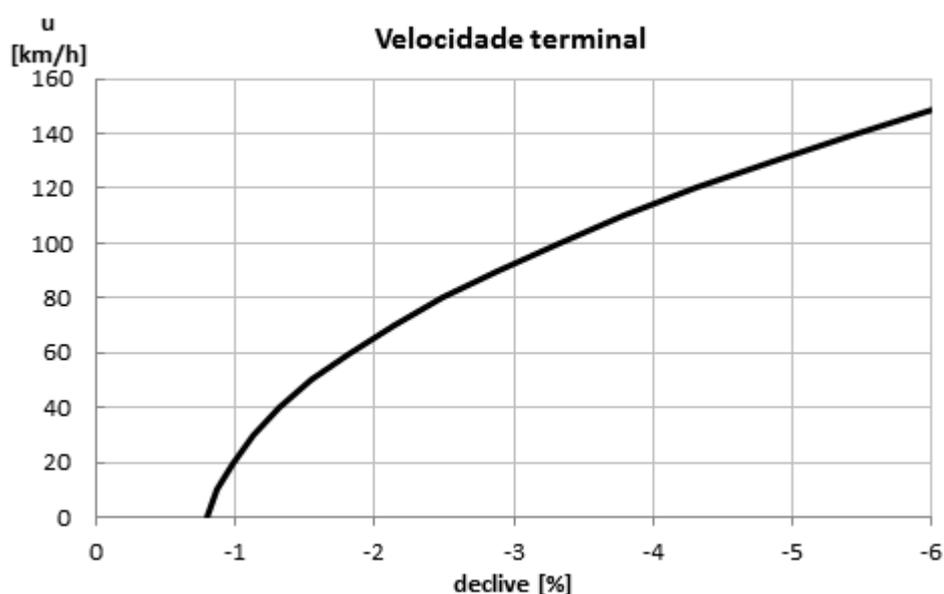


Gráfico 6.1 - Velocidade terminal do veículo de referência quando em descida em rolamento livre, em função do declive da estrada.

O gráfico 6.1 mostra a relação entre a velocidade terminal (situação de equilíbrio em que a componente da gravidade é anulada pelos atritos de rolamento livre e aerodinâmico) e o declive em descida da estrada, para o veículo de referência. Esta informação é relevante pois, para uma dada velocidade, indica o valor do declive a partir do qual começa a haver travagem. Se num dado percurso em circuito (altitude final igual à inicial) o declive da estrada for sempre inferior ao declive de “equilíbrio”, então não deverá haver aumento da energia motora, por comparação com igual percurso mas horizontal.

6.1. Perfis de Altitude

Neste subcapítulo podemos verificar o trabalho que foi efetuado no tratamento dos dados de altitude dos percursos reais.

Nos Gráficos 6.1, 6.2 e 6.3 pode-se observar as diferenças entre os dados de altitude recolhidos pelo GPS e os dados recolhidos manualmente através das cartas militares.

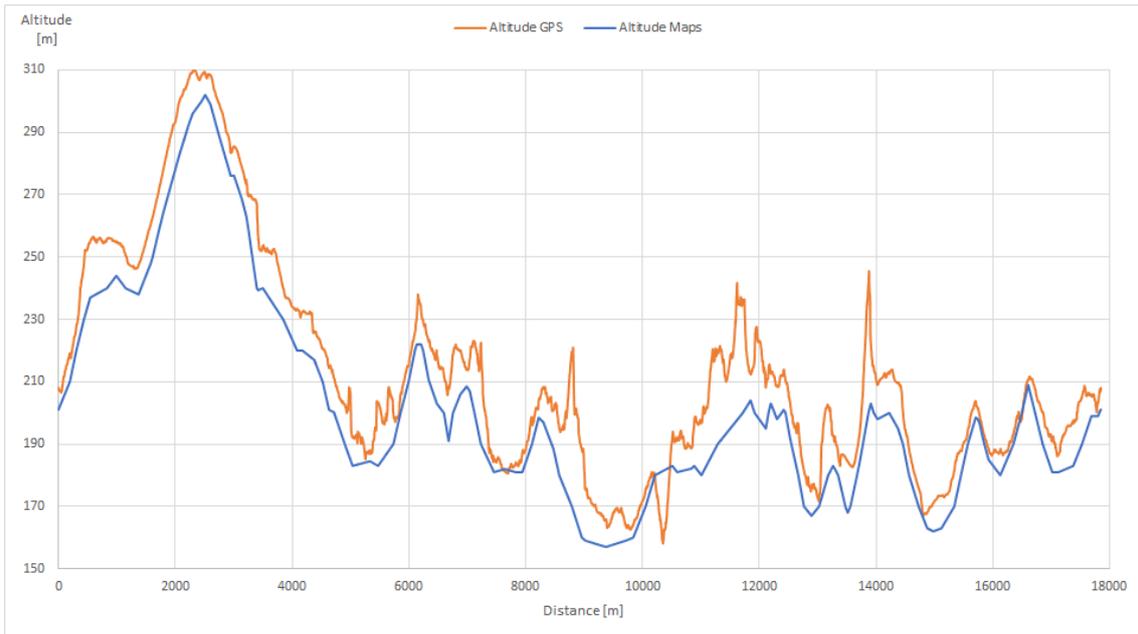


Gráfico 6.2 - Diferença dos dados de altitude no percurso Cidadino

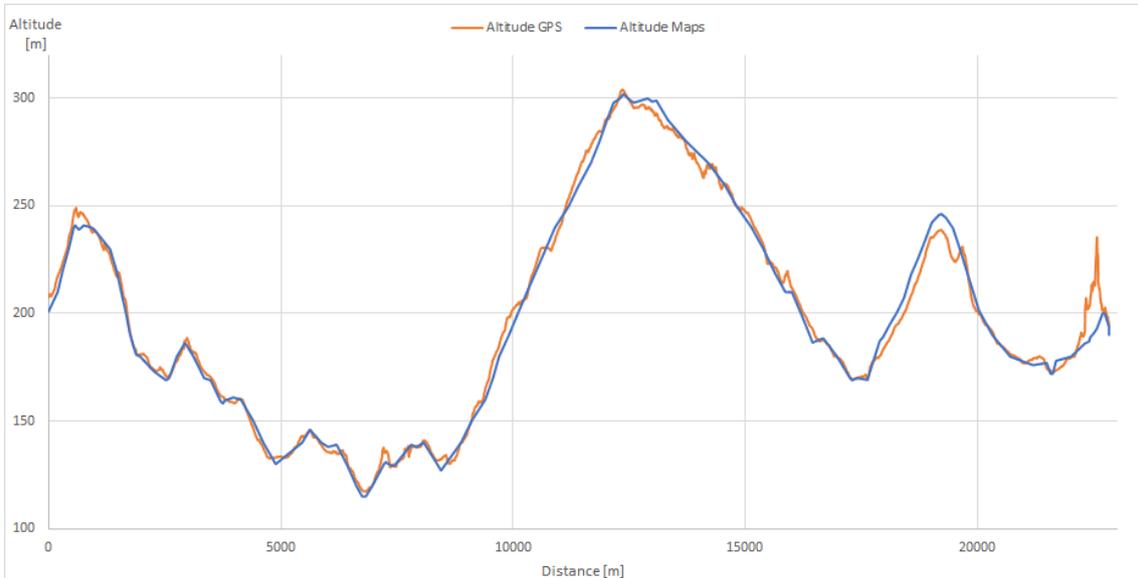


Gráfico 6.3 - Diferença dos dados de altitude no percurso realizado em EN

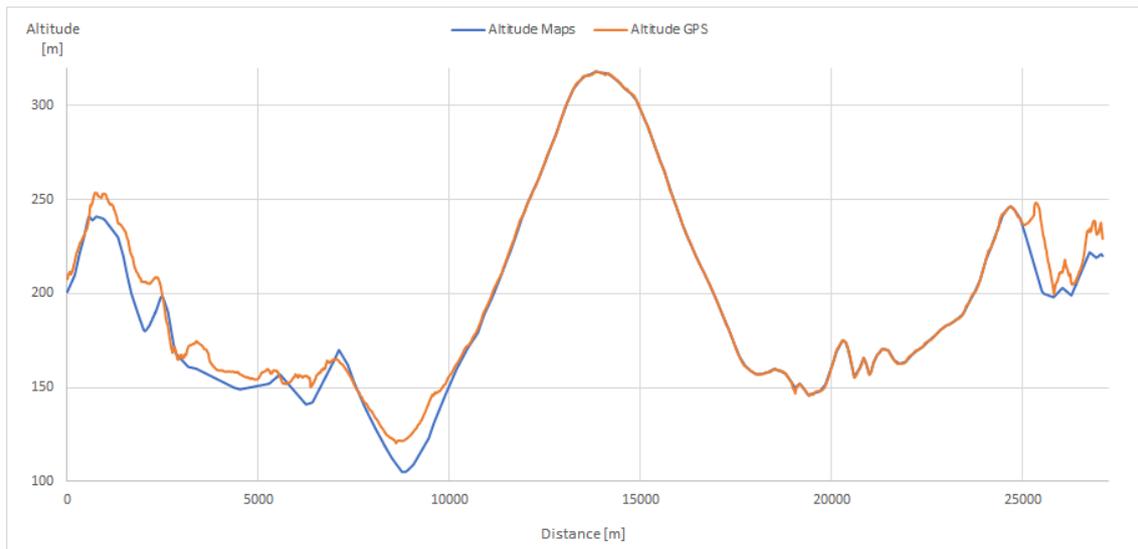


Gráfico 6.4 - Diferença dos dados de altitude no percurso realizado em AE

Estas diferenças são significativas, sobretudo no caso do percurso urbano. Face a estes resultados, pode-se concluir que com um GPS normal a precisão na medição da altitude é geralmente baixa, pelo que os valores de altitude ao longo do percurso não poderiam ser utilizados diretamente no modelo energético, pois levariam a resultados irreais, aumentando artificialmente as potências motoras e de travagem. No futuro este tipo de dados poderão ser recolhidos com outro tipo de sensor, por exemplo, um sensor barométrico.

Quanto aos dados retirados manualmente dos mapas e interpolados, mostraram-se convenientes para a utilização no modelo, não introduzindo oscilações artificiais, antes pelo contrário, quando muito serão algo conservadores em termos de variações de potência e energia. Esta metodologia tem no entanto a desvantagem de ser muito laboriosa.

6.2. Análise dos percursos de Condução Reais

Nos Gráficos 6.5, 6.6 e 6.7 podemos observar a variação das diferentes potências específicas envolvidas no movimento ao longo de cada um dos percursos reais aqui analisadas e a sua variação com a velocidade do veículo.

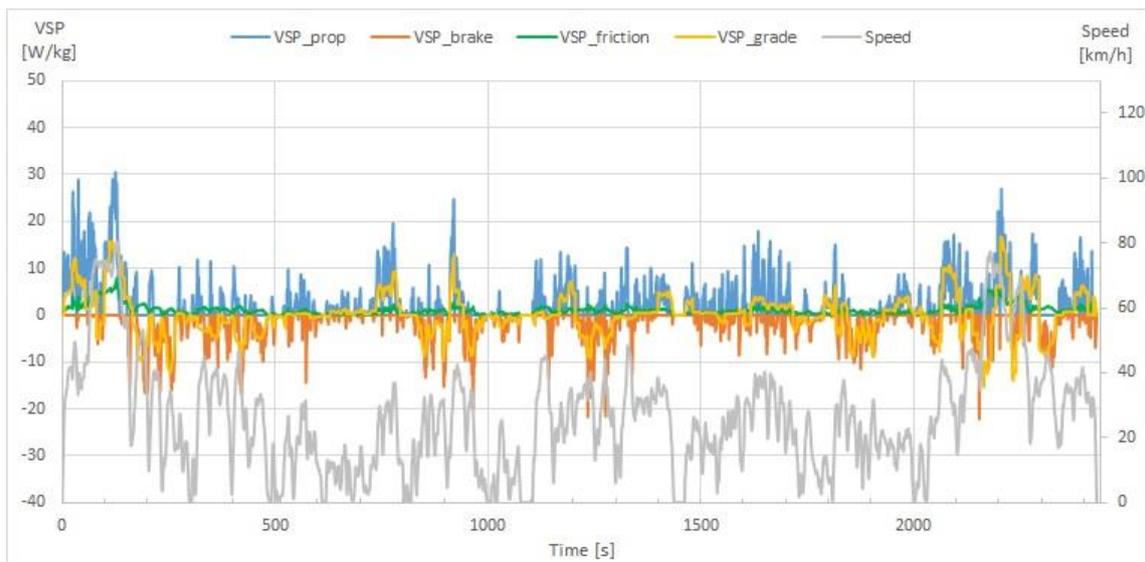


Gráfico 6.5 - Variação das diferentes potências específicas ao longo do percurso Citadino

Como podemos verificar pela observação do Gráfico 6.5, o percurso Citadino contempla muitas acelerações e travagens, com baixa velocidade e onde a potência específica de atrito é muito próxima de zero, apenas aumentando ligeiramente durante os períodos de maior velocidade, devido ao aumento da resistência aerodinâmica. Este percurso tem muitas variações de altitude pois a respectiva potência específica (*VSP_grade*) representa frequentemente a maior parcela no valor total (*VSP_prop* ou *VSP_brake*).

Podemos perceber melhor a distribuição dos valores de VSP no percurso Citadino ao observarmos o histograma da Figura 6.1

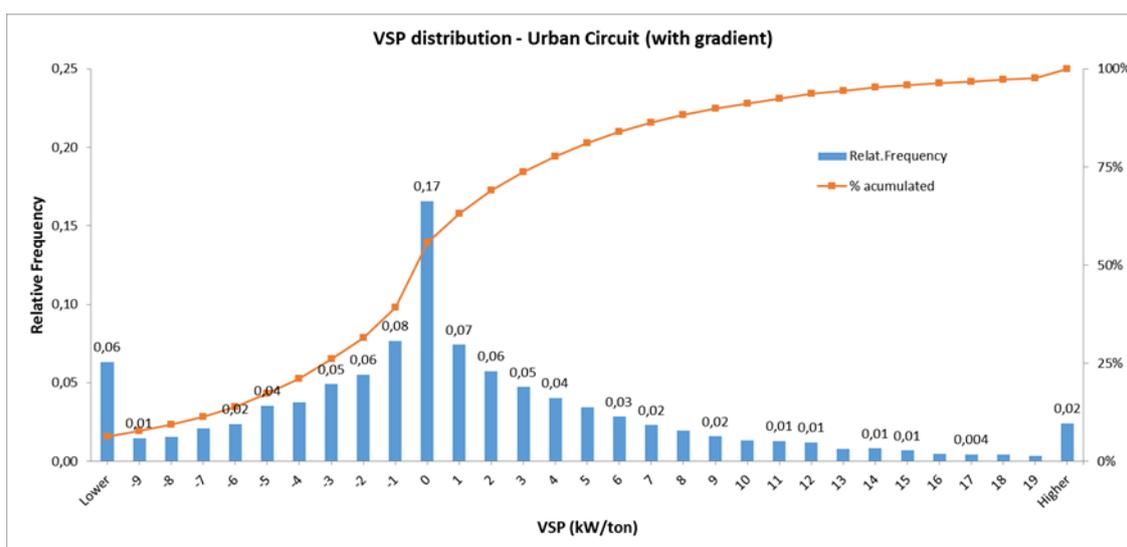


Figura 6.1 – Distribuição VSP no percurso Citadino

Pela observação do Gráfico 6.6, o percurso em Estrada Nacional, entre as cidades de Guimarães e Braga, apresenta um perfil mais linear das potências específicas de propulsão

e de travagem, visto que a velocidade se mantém mais constante ao longo do percurso aumentando apenas perto do final, na secção em via rápida já na cidade de Braga.

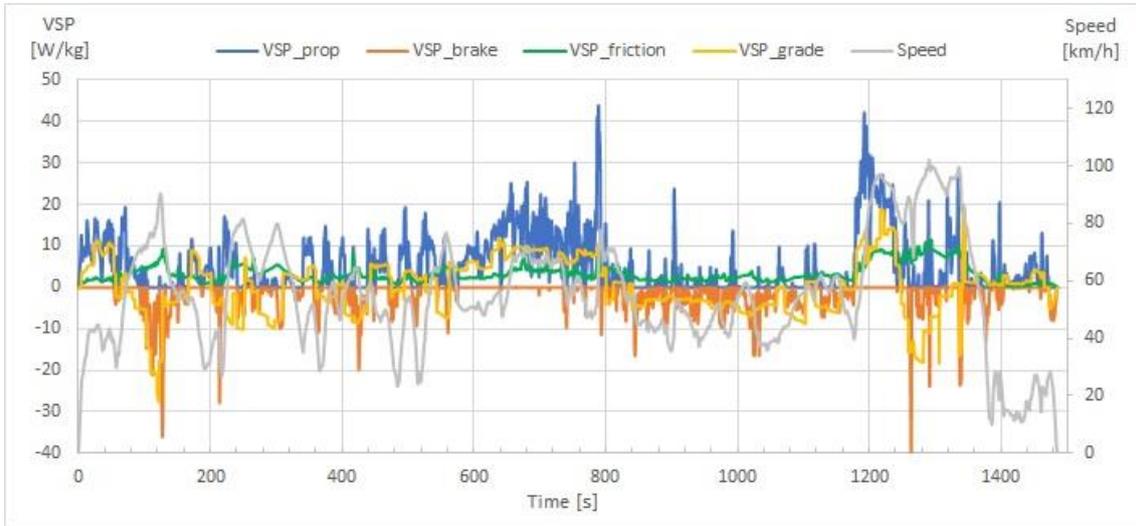


Gráfico 6.6 - Variação das diferentes potências específicas ao longo do percurso em EN

A potência específica de atrito mantém-se baixa ao longo do percurso, enquanto a *VSP_grade* oscila entre valores positivos e negativos consoante a inclinação da estrada, com um período positivo correspondente à subida, a meio do percurso, que leva à passagem da portela (Morreira) com cerca de 300 metros de altitude da portela ($t=800$ s.)

Ao observar o histograma da Figura 6.2 podemos perceber que a distribuição de valores de VSP é mais uniforme neste percurso e não se concentra tanto à volta do valor nulo.

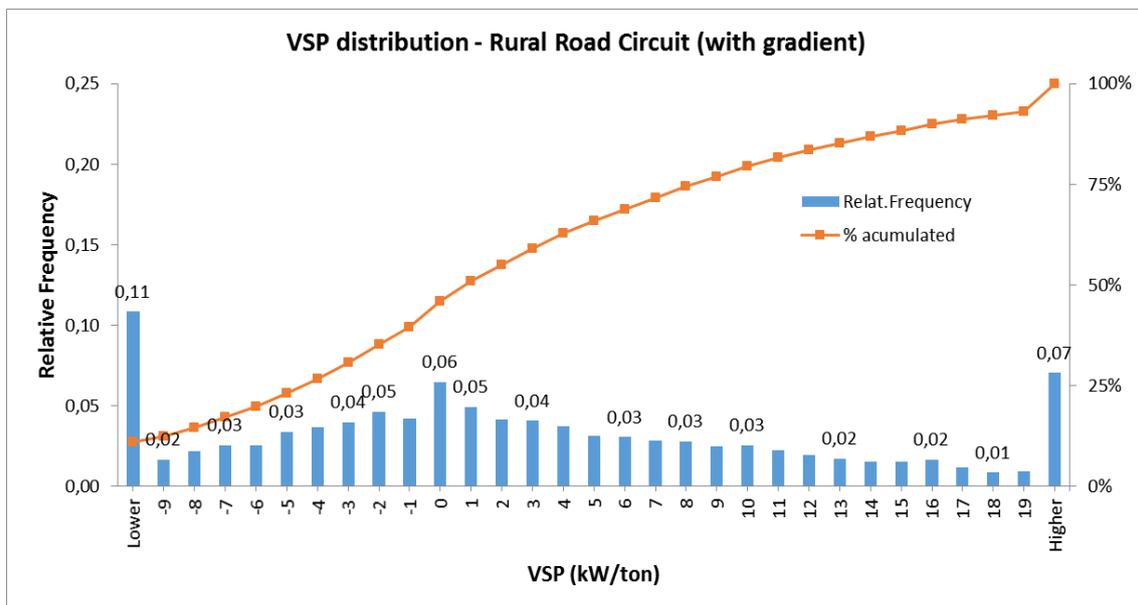


Figura 6.2 – Distribuição VSP no percurso em EN

Pela observação do Gráfico 6.7, o percurso em Autoestrada, como se tem velocidades mais elevadas em conjunto com declives acentuados, o espectro das diferentes potências específicas é mais variado, com picos de VSP_{prop} e VSP_{brake} mais elevados e onde a $VSP_{friction}$ apresenta valores mais elevados do que nos percursos anteriores, devido à maior resistência aerodinâmica.

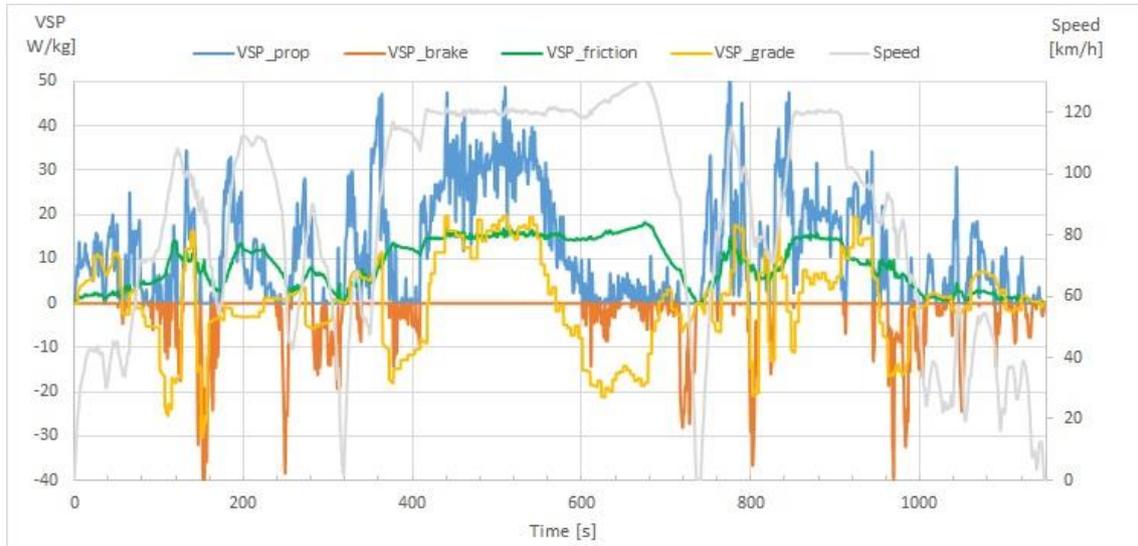


Gráfico 6.7 - Variação das diferentes potências específicas ao longo do percurso em AE

O perfil de VSP_{grade} tem um espectro mais variado que nos outros percursos e consegue-se perceber mais facilmente o perfil de altitudes. Na subida, a uma velocidade constante de 120 km/h ($430 < t < 570s$), a potência de atrito é aproximadamente igual à devido ao declive (≈ 18 W/kg) resultando numa potência de propulsão de cerca de 35 W/kg).

Observando o seguinte histograma (Figura 6.3), neste percurso a distribuição de valores de VSP também é mais uniforme com valores muito elevados ou baixos devido às velocidades superiores.

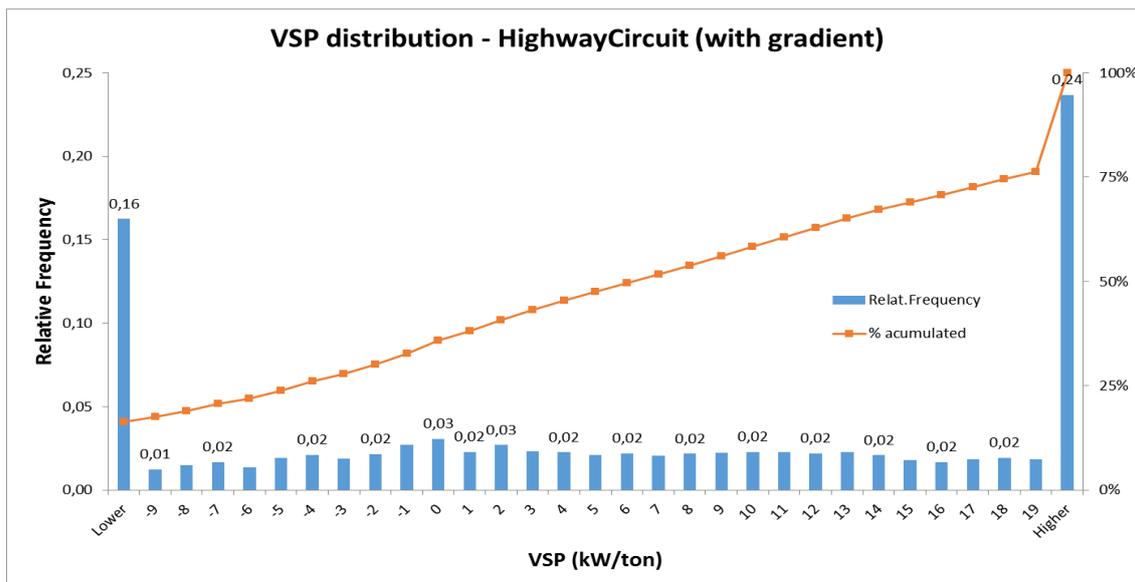


Figura 6.3 – Distribuição VSP no percurso em AE

A comparação dos diferentes percursos, em termos de valores máximos de potência específica de propulsão e travagem, é apresentada na Tabela 6.1, onde se pode verificar que o percurso onde estas potências são mais elevadas é o de Autoestrada.

Tabela 6.1 - Comparação dos valores de potências específicas dos percursos reais

Reference Vehicle Specific Powers [W/kg]	Citadino	EN	AE
maximum Pulling Power	30,5	43,9	57,8
maximum Braking Power	-23,2	-43,6	-49,7

Caso se tire da equação o termo de altitude e do atrito em curva, os valores máximos das potências específicas diminuem significativamente, como se pode verificar na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Valores máximos de potências específicas dos percursos reais sem variação da altitude e sem atrito em curva

Reference Vehicle Specific Powers [W/kg]	Citadino (alt.0)	EN (alt.0)	AE (alt.0)
maximum Pulling Power	20,8	34,1	55,6
maximum Braking Power	-18,0	-30,6	-39,2

Para compreender melhor as diferenças entre as diferentes energias específicas gastas pelo veículo de referência, em cada um dos percursos reais, pode observar-se a Gráfico 6.8, onde se tem em conta além das energias de propulsão e travagem, a energia gasta para ultrapassar a resistência aerodinâmica, a necessária para ultrapassar a resistência de atrito de rolamento, que é dividida entre o *slip* e o rolamento livre, assim como a energia específica de atrito em curva.

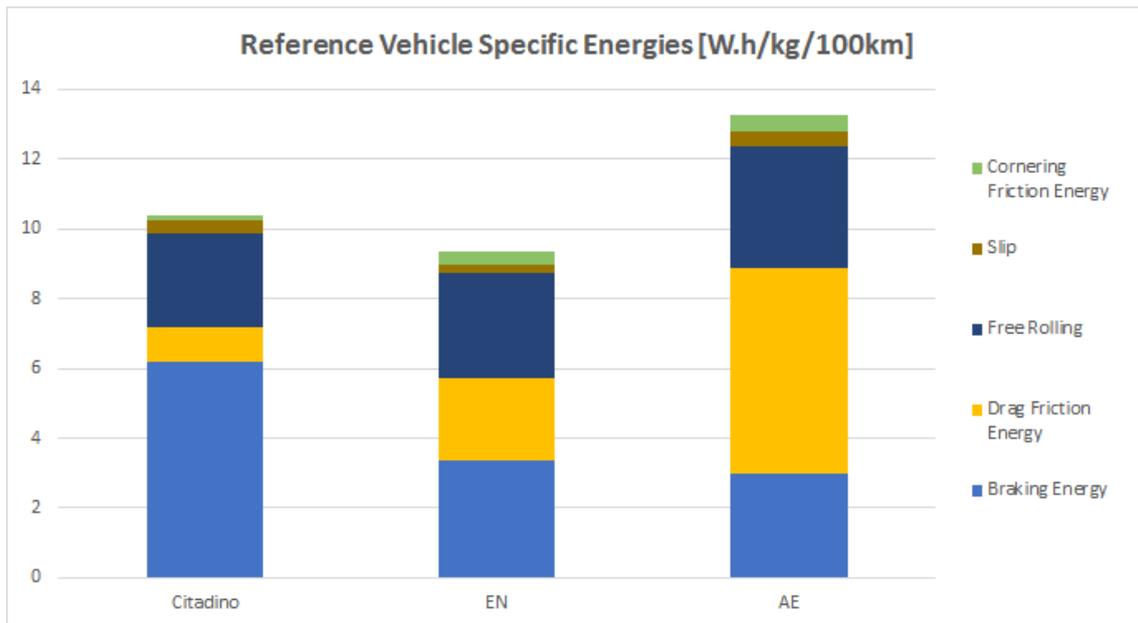


Gráfico 6.8 - Comparação das diferentes energias específicas envolvidas nos percursos reais

Foi efetuado o mesmo que no caso das potências específicas, retirou-se da equação o termo da variação da altitude (e do atrito em curva), e verificou-se igualmente uma adiminuição significativa em relação aos valores com influência da altitude. Esta diminuição pode-se verificar na Gráfico 6.9.

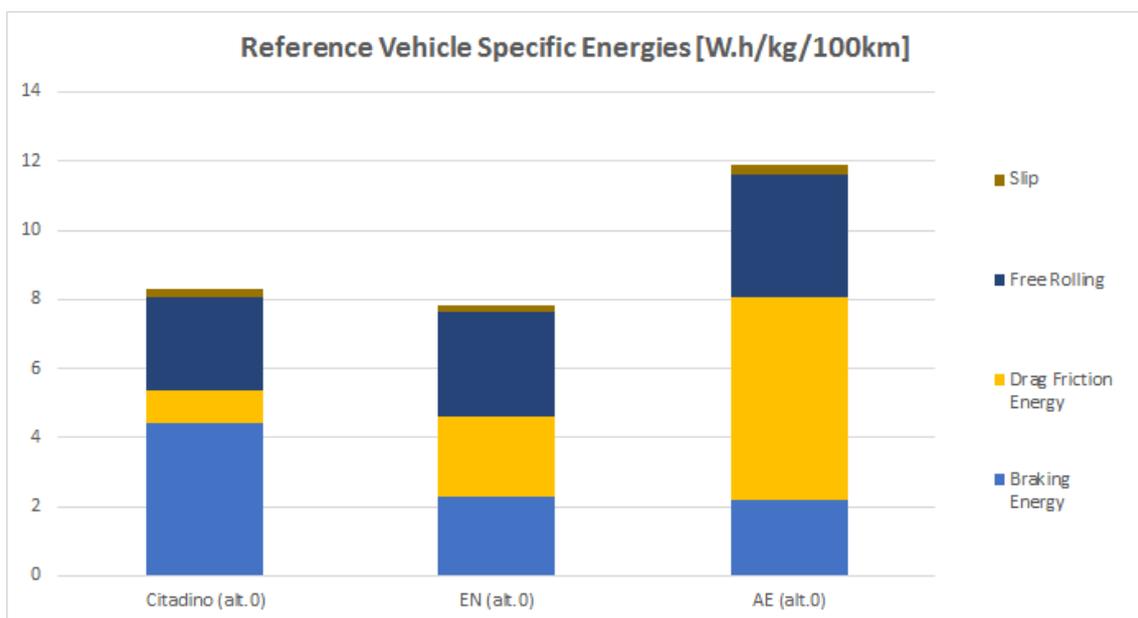


Gráfico 6.9 - Diferentes energias específicas envolvidas nos percursos reais sem influência da altitude e atrito em curva

Também se pode classificar os percursos retirando da equação o veículo de referência, e assim avaliá-los atendendo apenas às suas características geométricas e dinâmicas, independentemente do veículo que os percorra. Os resultados, para os percursos reais, estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Classificação dos percursos reais considerando apenas as características do percurso

	Citadino	EN	AE
Total Length [m]	17856	22825	27077
Total Time [s]	2519	1498	1209
Total Stop Time [%]	5,8%	0,1%	0,6%
Maximum Velocity [km/h]	81	102	131
Non-stop Mean Velocity (km/h)	28,0	55,4	85,5
Maximum Positive Acceleration [m/s ²]	2,32	2,42	2,35
Maximum Negative Acceleration [m/s ²]	-2,12	-2,36	-3,11
Maximum Friction Free Specific Pulling Power [W/kg]	25,2/17,3 *	36,9/27,2 *	41,4/39,4 *
Maximum Friction Free Specific Braking Power [W/kg]	24,3/18,5 *	49,0/35,2 *	57,3/42,0 *
Friction Free Specific Pulling (or braking) Energy [W.h/kg/100km]	7,76/5,71 *	5,87/3,99 *	6,67/4,15 *
Specific Accumulated Rises (m/km)	21,6/-*	15,1/-*	17,1/-*
Specific Accumulated Descents (m/km)	21,6/-*	-15,6/-*	-16,4/-*
Net altitude variation (m)	0/-*	-11/-*	19/-*
Specific Altitude variation (m/km)	0/-*	-0,48/-*	0,70/-*
Sinuosity to the right (Sinuosity_R) [voltas/km]	0,88	0,35	0,23
Sinuosity to the left (Sinuosity_L) [voltas/km]	-0,83	-0,32	-0,16
Sinuosity Energy Factor [J/kg/rad]	1,74	3,06	5,22

* - Valores sem variação de altitude

A tabela inclui valores específicos de potência máxima de propulsão e de travagem, para um *veículo ideal sem atrito (Friction Free)* bem como a energia específica de propulsão (que é igual à de travagem) para o mesmo veículo. Esta última, é um minorante da energia específica de propulsão necessária para movimentar qualquer veículo real ao longo do respectivo percurso e um majorante da sua energia específica de travagem. Os valores marcados com (*) correspondem a não considerar a influência da altitude e, como anteriormente, houve uma diminuição dos valores por comparação com os obtidos quando considerando o declive dos percursos.

6.3. Análise dos Ciclos de Condução Normalizados

Na análise dos ciclos de condução normalizados iremos apenas destacar os mais importantes tais como o *NEDC*, o *EPA 5 cycle* e o *WLTC*. Neste último irá ser apenas descrito a classe 3 que é a mais completa e agressiva das 3 classes do ciclo mundial *WLTC*. No ANEXO C estão representados os restantes ciclos normalizados estudados neste trabalho.

Nos Gráficos 6.10, 6.11 e 6.12 podemos observar o perfil das potências específicas de cada um dos ciclos, para o veículo de referência, e assim começar a perceber as diferenças entre este tipo de ciclos e a condução na vida real descrita no ponto anterior pelos percursos reais.

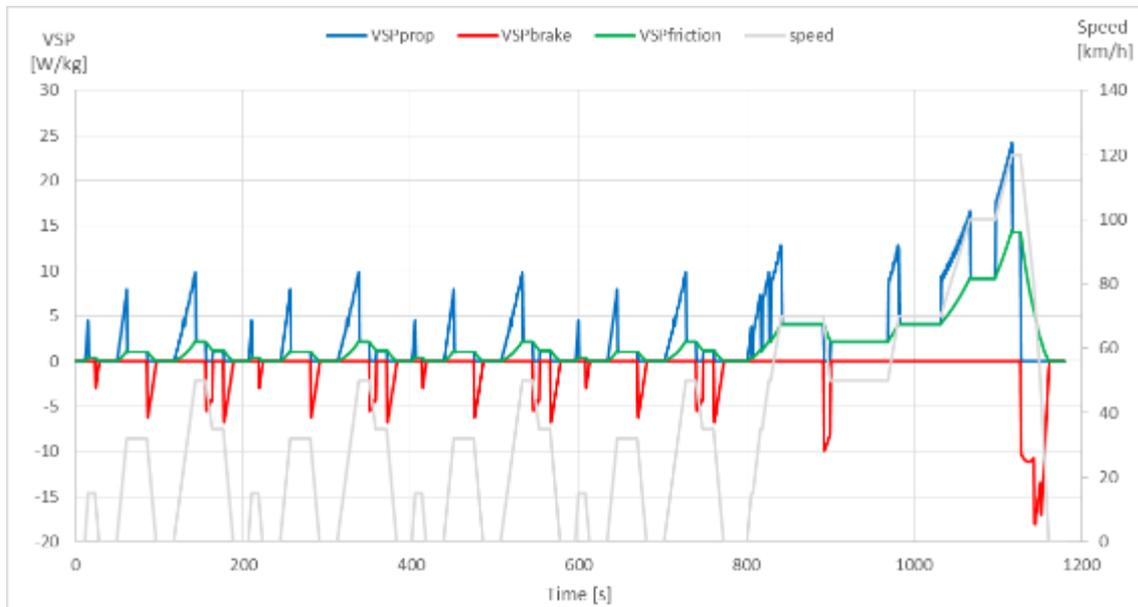


Gráfico 6.10 - Variação das diferentes potências específicas no ciclo NEDC

No caso do *NEDC (New European Driving Cycle)*, como se pode verificar no Gráfico 6.10, a potência específica de propulsão acompanha os aumentos de velocidade quase linearmente e o mesmo se verifica com a potência específica de travagem, não havendo variações abruptas de velocidade como acontece com os percursos reais. Quando a velocidade se mantém constante a potência específica de propulsão decresce abruptamente e iguala a de fricção, dando lugar a um patamar constante, geralmente de valor muito reduzido, exceto perto do final, quando se atingem os 120 km/h. Podemos assim perceber que o ciclo normalizado *NEDC* é um ciclo pouco agressivo, com acelerações muito suaves, logo seguidas de um patamar de velocidade constante e de travagens também pouco agressivas.

Ao observar o histograma da Figura 6.4 podemos perceber que o ciclo de condução *NEDC* apresenta uma distribuição de potência específica muito próximo do valor nulo, ou seja, não é necessário uma potência específica muito elevada para este ciclo de condução.

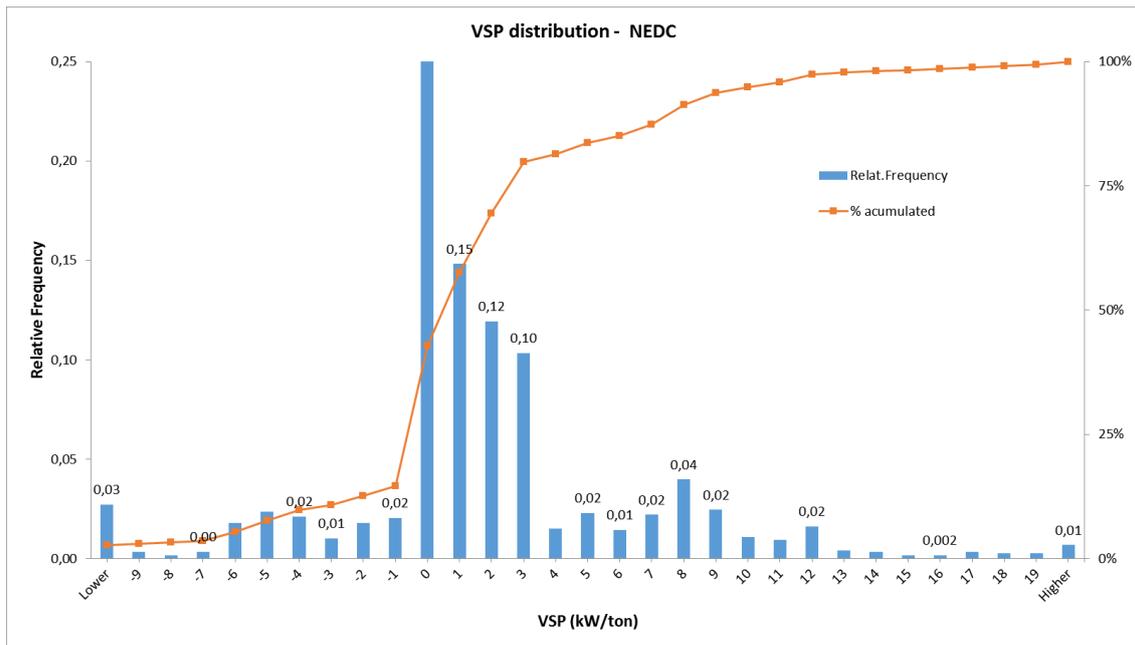


Figura 6.4 – Distribuição VSP no ciclo NEDC

Durante a parte citadina do ciclo ($t < 800s$) a potência específica de propulsão não ultrapassa os 10 W/kg e a de travagem os 7 W/kg, valores que podem ser considerados realmente baixos. Na fase de estrada ($t > 800s$), apenas há uma aceleração até aos 120 km/h (a que corresponde um VSP de propulsão máximo de 24 W/kg, mas esta velocidade é mantida apenas durante 10 segundos).

A distribuição das potências específicas da parte citadina do NEDC (ECE 15) pode ser observado no histograma da Figura 6.5.

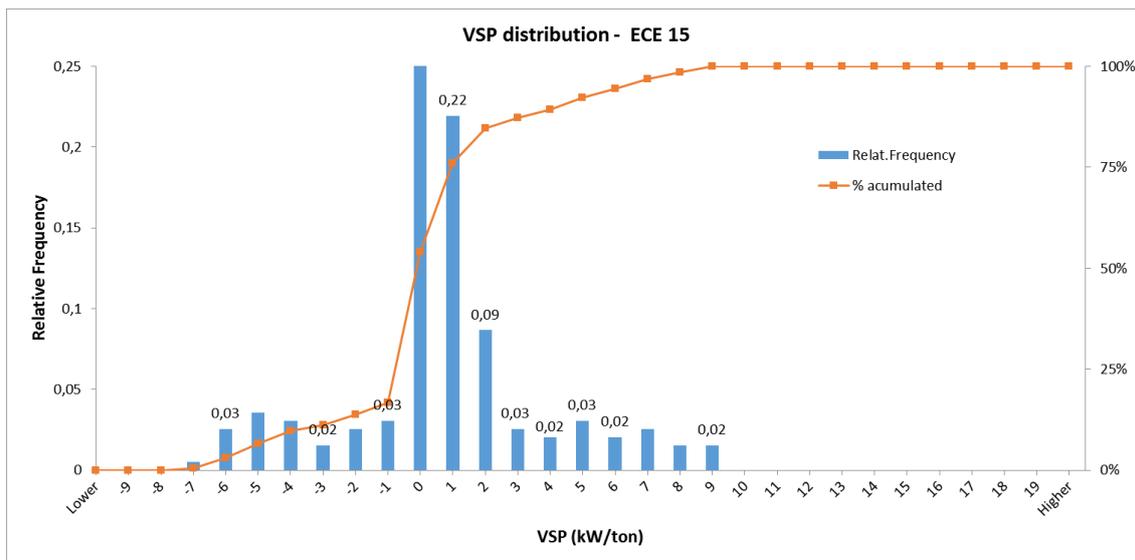


Figura 6.5 – Distribuição VSP no ciclo ECE 15

Ao observar o Gráfico 6.11 pode-se verificar que este ciclo normalizado, utilizado na homologação dos automóveis nos EUA, está mais próximo do que acontece na condução

na vida real, com acelerações e travagens frequentes, cobrindo todas as situações que possam acontecer ao longo de um percurso real, tal como a condução a velocidade elevada ao longo de um certo período de tempo e a condução em cidade a velocidades mais baixas.

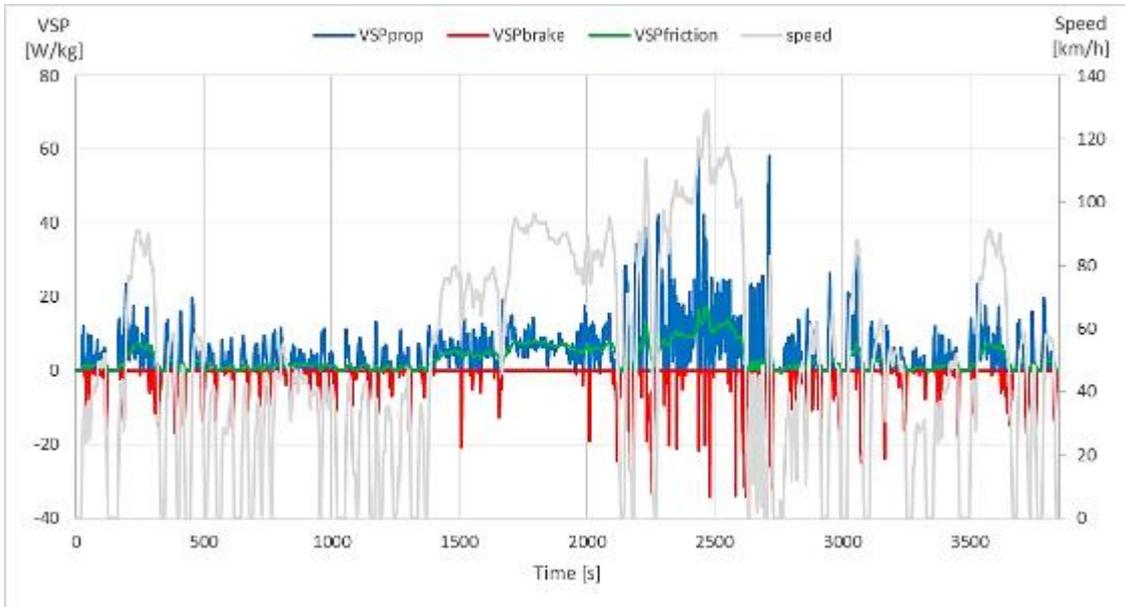


Gráfico 6.11 - Variação das diferentes potências específicas no ciclo EPA 5 cycle

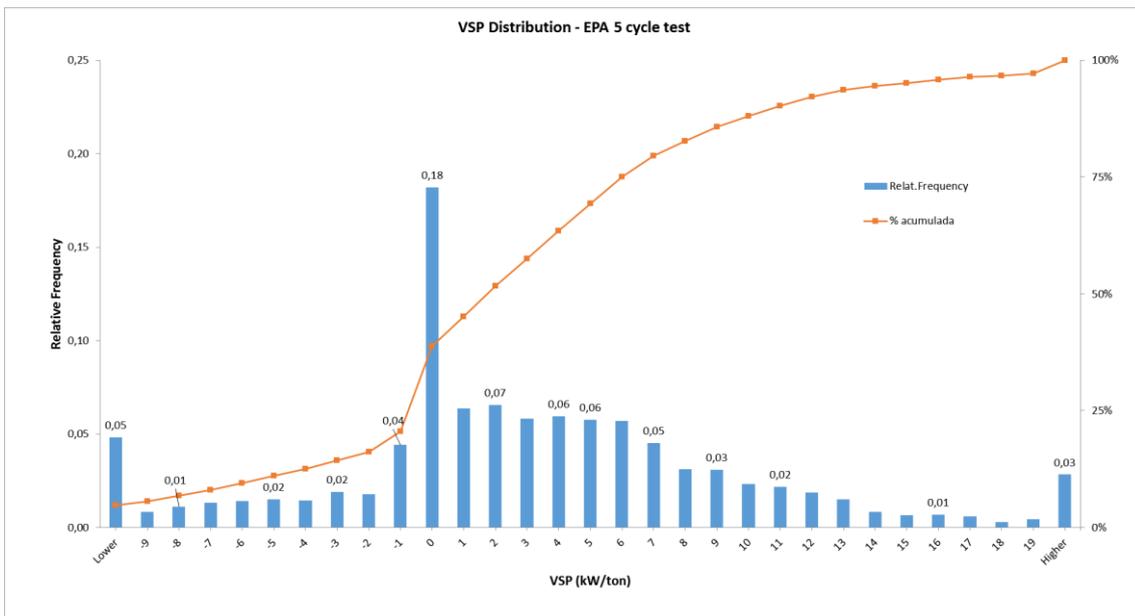


Figura 6.6 – Distribuição VSP no ciclo EPA 5 cycle

O *EPA-5cycle* é considerado muito agressivo pois apenas veículos bastante potentes o conseguem cumprir. O ciclo normalizado *WLTP* foi criado com a intenção de melhor representar a condução em vida real de um “veículo médio global” e como se pode verificar ao observar o Gráfico 6.12, o objetivo parece ter sido conseguido, com acelerações e travagens como se tratasse da condução em vida real, mas sem grandes picos de potência propulsora.

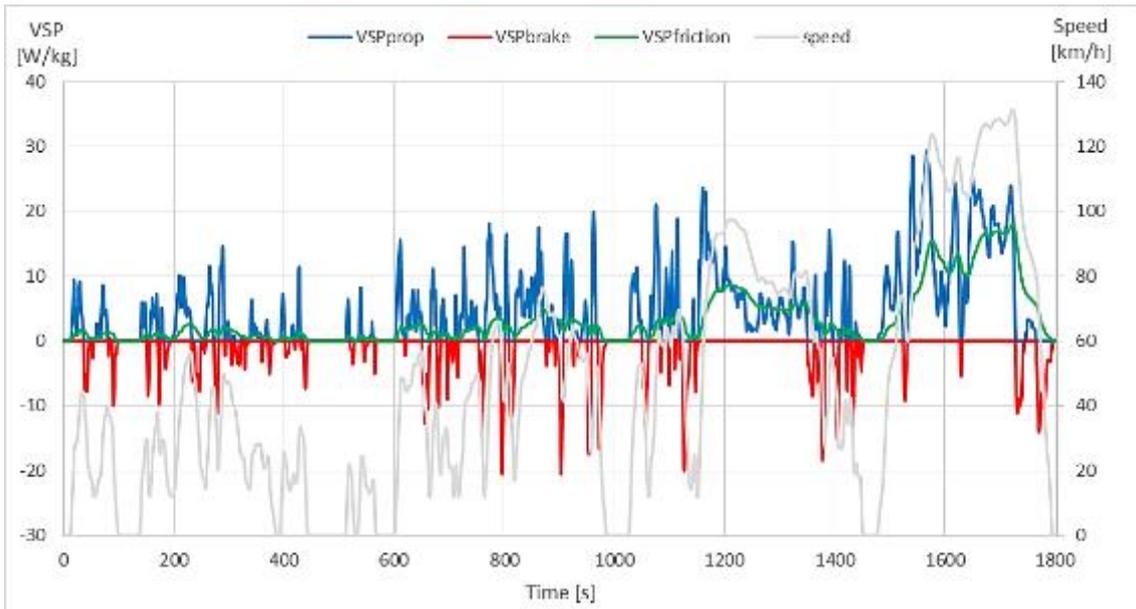


Gráfico 6.12 - Variação das diferentes potências específicas no ciclo WLTP (classe 3)

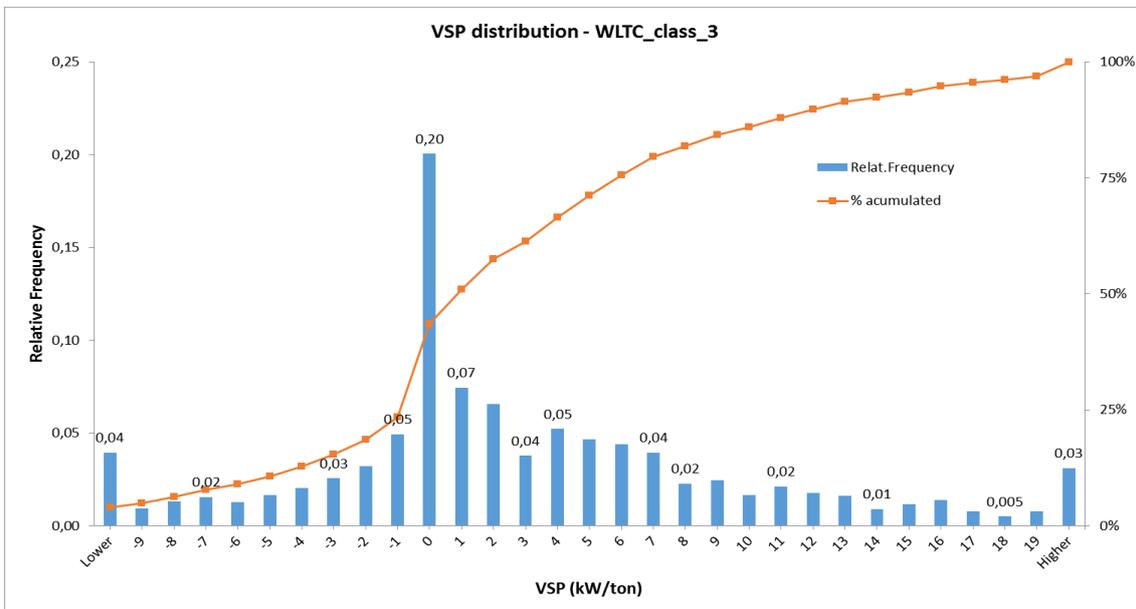


Figura 6.7 – Distribuição VSP no ciclo WLTP (classe 3)

Com base nestes gráficos pode ser efetuada uma comparação entre estes três ciclos em função das suas potências específicas máximas de propulsão e travagem. Sendo assim pode-se observar na Tabela 6.4 que o ciclo norte-americano é o que apresenta as mais elevadas potências específicas seguido pelo ciclo mundial e por último o ciclo europeu *NEDC*.

Tabela 6.4 - Potências específicas máximas dos ciclos normalizados

Reference Vehicle Specific Powers [W/kg]	NEDC	EPA 5 cycle	WLTP class3
maximum Pulling Power	24,2	59,6	29,3
maximum Braking Power	-18,0	-34,1	-20,5

Na Tabela 6.5 podemos encontrar as características dos ciclos normalizados, sem considerar um veículo de referência permitindo assim uma melhor percepção do tipo de ciclo em estudo.

Tabela 6.5 - Classificação dos ciclos normalizados considerando apenas as características do percurso

	NEDC	EPA 5 cycle	WLTP class3
Total Length [m]	10931	52924	23262
Total Time [s]	1108	3768	1769
Total Stop Time [%]	24,9%	13,7%	13,1%
Maximum Velocity [km/h]	120	129	131
Non-stop Mean Velocity (km/h)	44,4	57,4	53,5
Maximum Positive Acceleration [m/s ²]	1,06	3,76	1,75
Maximum Negative Acceleration [m/s ²]	-1,39	-3,08	-1,50
Maximum Friction Free Specific Pulling Power [W/kg]	9,3	48,9	21,5
Maximum Friction Free Specific Braking Power [W/kg]	-22,7	-43,2	-23,9
Friction Free Specific Pulling Energy [W.h/kg/100km]	3,10	4,27	4,29

Ao observar a tabela percebemos que o *NEDC* é um ciclo muito suave com uma aceleração máxima inferior à dos outros dois ciclos em estudo, com uma velocidade máxima também inferior e com uma percentagem de tempo parado superior às dos outros dois ciclos normalizados aqui representados. O *NEDC* apresenta também uma força de propulsão livre de fricção muito inferior em relação aos outros dois ciclos o que representa da melhor maneira o que foi dito anteriormente, que o ciclo *NEDC* é um ciclo que não representa o que passa na condução na vida real.

Em termos de energias específicas, os ciclos de condução normalizados apresentam a mesma situação que nas potências descritas anteriormente, em que o ciclo *NEDC* é o com os valores mais baixos de entre os três ciclos em estudo, como se pode verificar no Gráfico 6.13.

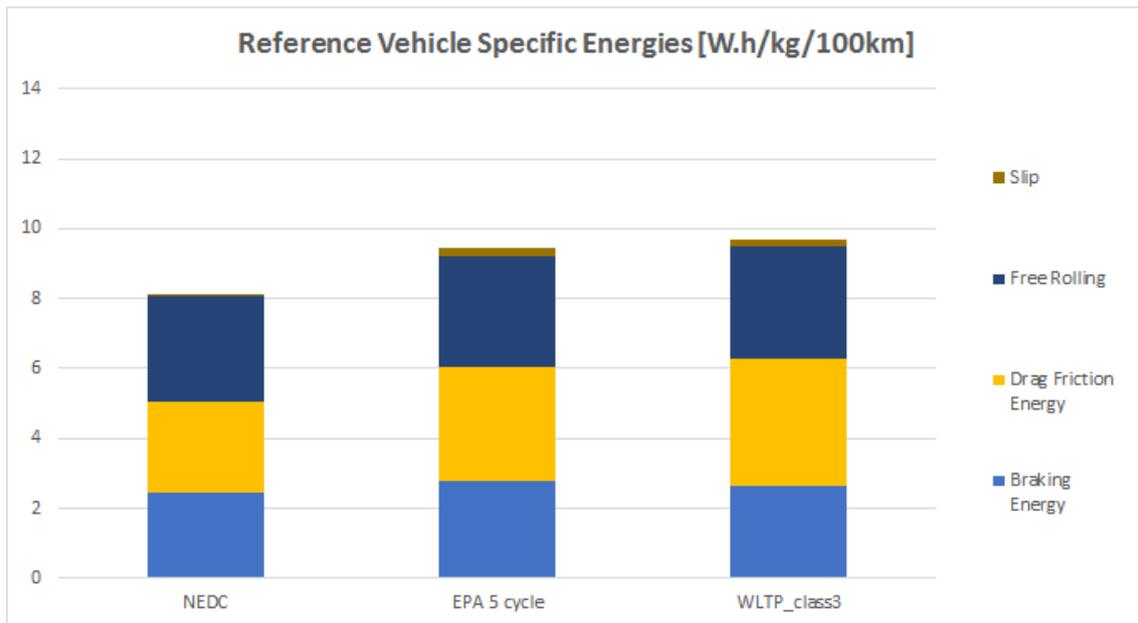


Gráfico 6.13 - Energias específicas dos ciclos de condução normalizados

6.4. Comparação de resultados entre os Ciclos Normalizados e percursos Reais

Como se pôde verificar nos pontos anteriores existem várias diferenças entre os ciclos de condução normalizados e a condução na vida real. As diferenças que se destacam entre os dois tipos de são a ausência de contabilização por parte dos ciclos normalizados do fator de atrito em curva e da altitude. Caracterizando os ciclos só em função das suas características, ou seja, sem ter em conta um carro de referência, estas diferenças podem ser observadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Comparação das características entre os ciclos normalizados e os percursos reais

	Citadino	EN	AE	NEDC	EPA 5 cycle	WLTP class3
Total Length [m]	17856	22825	27077	10931	52924	23262
Total Time [s]	2519	1498	1209	1108	3768	1769
Total Stop Time [%]	5,8%	0,1%	0,6%	24,9%	13,7%	13,1%
Maximum Velocity [km/h]	81	102	131	120	129	131
Non-stop Mean Velocity (km/h)	28	55,4	85,5	44,4	57,4	53,5
Maximum Positive Acceleration [m/s ²]	2,32	2,42	2,35	1,06	3,76	1,75
Maximum Negative Acceleration [m/s ²]	-2,12	-2,36	-3,11	-1,39	-3,08	-1,50
Maximum Friction Free Specific Pulling Power [W/kg]	25,2/17,3*	37,0/27,2*	41,4/39,4*	9,3	48,9	21,5
Maximum Friction Free Specific Braking Power [W/kg]	24,3/18,5*	49,9/35,2*	57,3/42,0*	22,7	43,2	23,9
Friction Free Specific Pulling Energy [W.h/kg/100km]	7,76/5,71*	5,87/3,99*	6,67/4,15*	3,10	4,27	4,29
* - Valores sem variação de altitude e atrito em curva (sem aceleração lateral)						

Como se pode verificar nenhum dos ciclos normalizados representa o que se passa na condução na vida real. A aceleração positiva e negativa, em qualquer um dos ciclos normalizados, apresentam valores inferiores às dos percursos reais. Em termos de velocidade não se podem comparar diretamente porque os ciclos normalizados são ciclos combinados, que contemplam a condução citadina, a baixa velocidade, com velocidade mais elevada seja em autoestrada ou em estrada nacional, enquanto os reais apenas contempla um dos casos.

Tendo em conta a comparação apenas do tempo de paragem de cada ciclo pode-se verificar que a percentagem de tempo com velocidade nula é muito superior no caso dos ciclos normalizados.

Observando todas as outras características chega-se à mesma conclusão, que os ciclos normalizados não representam a condução na vida real.

Mesmo fazendo a comparação entre os percursos reais, sem contabilizar a altitude e a aceleração lateral, e os ciclos normalizados, podemos verificar que a conclusão é a mesma, como se pode verificar também através da Tabela 6.7.

Comparando os valores obtidos através do modelo energético com o carro de referência, podemos comparar os ciclos de condução normalizados com os percursos reais.

Considerando os valores das potências específicas de propulsão e travagem máximos pode-se verificar mais uma vez as diferenças entre os dois tipos de ciclos. Estas diferenças estão visíveis na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Comparação dos valores máximos das potências específicas entre ciclos normalizados e reais

Reference Vehicle Specific Powers [W/kg]	Citadino	EN	AE	NEDC	EPA 5 cycle	WLT P class3
maximum Pulling Power	30,5/20,8 *	43,9/34,1 *	57,8/55,6 *	24,2	59,7	29,3
maximum Braking Power	22,2/18,0 *	43,6/30,6 *	49,7/39,2 *	-18,0	-34,1	-20,5

* - Valores sem variação de altitude e sem aceleração lateral

Comparando os valores das energias específicas entre os dois tipos de ciclos, a situação é a mesma. (Gráfico 6.14)

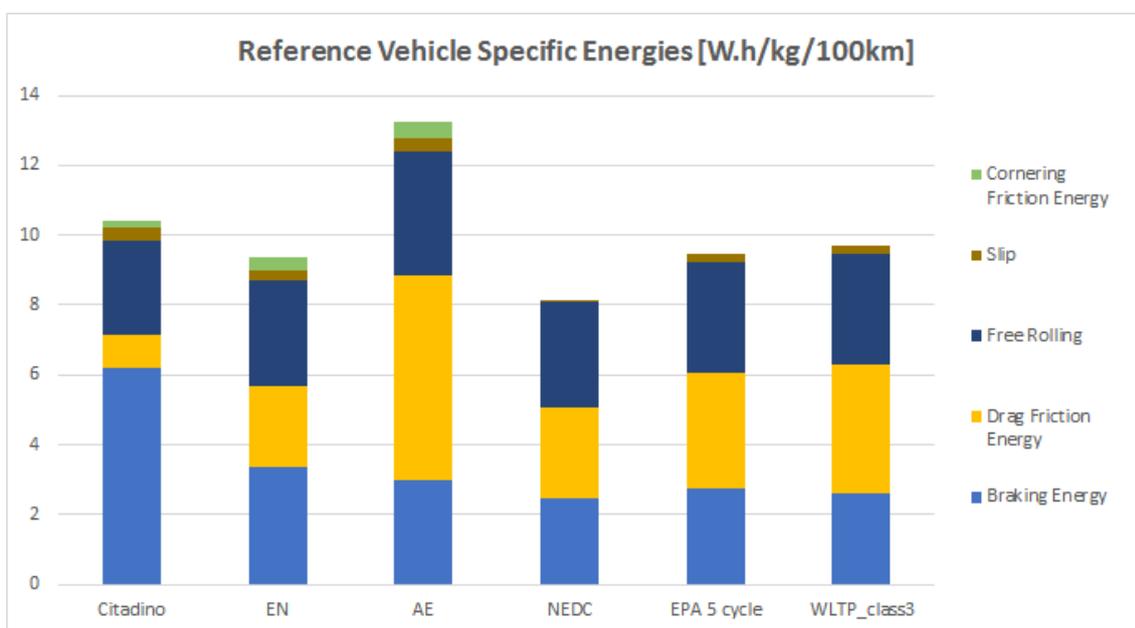


Gráfico 6.14 - Comparação dos valores máximos das energias específicas entre ciclos normalizados e reais

Claro que ao fazer a comparação entre ciclos de condução normalizados, que são ciclos combinados, e os percursos reais não se pode chegar a uma conclusão consensual, porque os percursos reais não se tratam de percursos que combinem condução citadina e condução em autoestrada ou estrada nacional.

Assim no Gráfico 6.15 é efetuada uma comparação entre o percurso citadino, com influencia da altitude e aceleração lateral e sem, e o excerto do ciclo de condução normalizado *NEDC* correspondente à condução citadina que é descrita pelo ciclo de condução normalizado *ECE15*.

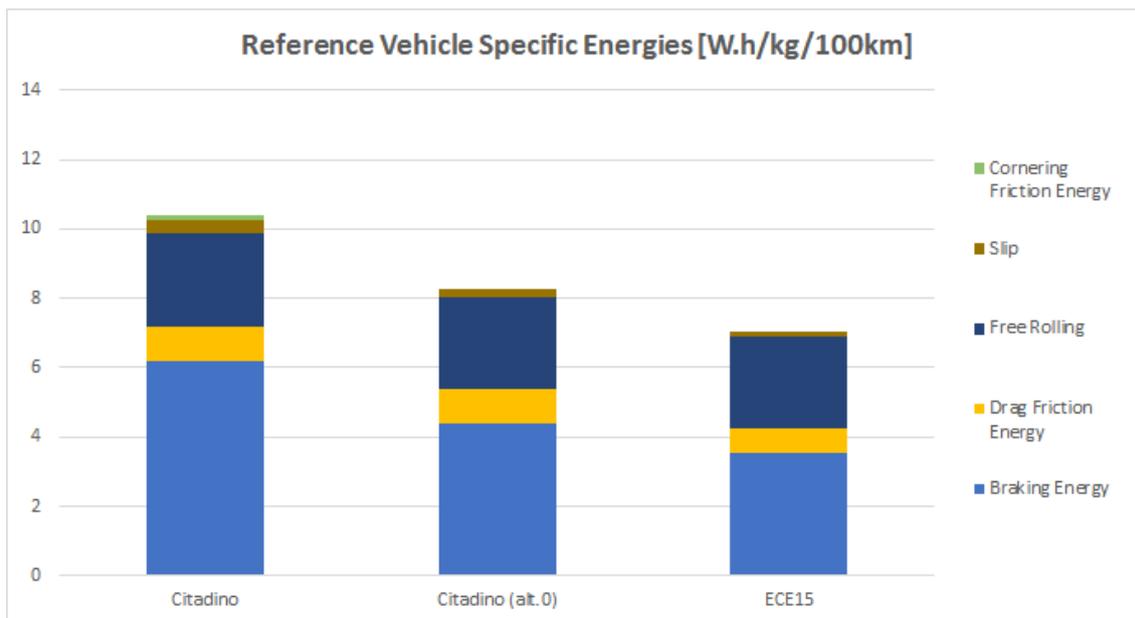


Gráfico 6.15 - Comparação entre o ciclo citadino real e o normalizado *ECE15*

Como se pode verificar a conclusão é a mesma da comparação anterior, os valores das energias específicas do ciclo normalizado são inferiores aos da condução em situação real.

O mesmo se verifica quando é retirado da equação o carro de referência e se compara as características do ciclo *ECE15* e do percurso real citadino nas duas vertentes, como se pode verificar na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Comparação das características entre o ciclo citadino real e o normalizado *ECE15*

	Citadino	Citadino (alt.0)	ECE15
Total Length [m]	17856	17856	994
Total Time [s]	2519	2519	175
Total Stop Time [%]	5,8%	5,8%	32,8%
Maximum Velocity [km/h]	81	81	50
Non-stop Mean Velocity (km/h)	28	28	27,1
Maximum Positive Acceleration [m/s ²]	2,3	2,3	1,1
Maximum Negative Acceleration [m/s ²]	-2,1	-2,1	-0,8
Maximum Friction Free Specific Pulling Power [W/kg]	25,2	17,3	7,3
Maximum Friction Free Specific Braking Power [W/kg]	-24,3	-18,5	-7,2
Friction Free Specific Pulling Energy [W.h/kg/100km]	7,8	5,7	4,03

No ANEXO C pode-se encontrar a comparação de todos os ciclos normalizados estudados neste trabalho em função das energias e potências específicas, assim como os histogramas da distribuição VSP dos percursos Citadino, Estrada Nacional e Auto-estrada (sem influencia da altitude).

7. CONCLUSÕES

7.1. Principais Resultados e Conclusões

Na primeira parte do trabalho percebeu-se a importância do levantamento de dados manuais de altitude de forma a obter bons resultados no modelo de simulação. Este tratamento eliminou grande parte dos erros presentes nos dados, eliminando oscilações irreais de altitude. Foi também aplicado um tratamento aos dados de GPS da velocidade e aceleração lateral e com isto conseguiu-se eliminar grande parte dos erros presentes nos dados, eliminando oscilações irreais da velocidade e da aceleração lateral. Foram ainda definidos novos pontos iniciais e finais com velocidade nula para cada percurso de condução real, para que a comparação com os ciclos de condução normalizados e os percursos reais seja melhor. Para esse efeito foram inseridas “rampas” de aceleração (e de travagem) desde uma velocidade nula até ao primeiro ponto registado (e desde a velocidade do último ponto registado até zero).

Na segunda parte do trabalho foi desenvolvido uma metodologia para a caracterização dos percursos de condução reais tendo como finalidade a comparação com os ciclos de condução normalizados. Com esta caracterização a comparação entre os ciclos de condução normalizados e os percursos reais pode ser efetuado de três maneiras, que são:

1. Comparação entre as características de cada percurso, não tendo em conta um veículo de referência;
2. Comparação entre os valores energéticos de cada situação que pode ser dividida em dois tipos:
 - a. Comparação entre os valores máximos das potências específicas de propulsão e travagem;
 - b. Comparação entre as energias específicas envolvidas no decorrer de cada tipo de ciclo de condução normalizado ou percurso de condução real.

Da análise dos resultados pode-se concluir que os ciclos de condução normalizados não refletem corretamente a condução na vida real, por duas razões principais: têm menos acelerações e travagens e de valores mais reduzidos; não incluem as variações de altitude e as curvas. As consequências são uma diminuição artificial das potências específicas e dos consumos de energia.

Fazendo uma comparação das características gerais dos ciclos, sem veículo de referência, conclui-se que:

- Na comparação do percurso citadino real com o ciclo de condução ECE15, o primeiro apresenta uma potência específica máxima de propulsão sem atrito 29% superior, no caso da correspondente potência máxima de travagem, esta diferença é de 30%;
- Quanto à energia específica de propulsão sem atrito, a diferença entre o percurso real e o ciclo normalizado é de 52%;
- Comparando o percurso em estrada nacional real com o ciclo de condução normalizado EUDC, a diferença de potência específica máxima de propulsão sem atrito é de 25%, na de travagem a diferença é de 45%.
- Na energia específica de propulsão sem atrito dos ciclos descritos no ponto anterior a diferença é de 44%;

Como se pode concluir as diferenças entre os percursos reais e os ciclos normalizados são significativas, e ao incluir um carro de referência na análise, com os respetivos atritos, estas diferenças aumentam.

Em termos de exemplo deste aumento pode-se comparar o percurso real citadino com o ECE15, em que a diferença para a energia específica de propulsão é de 68% enquanto para a de travagem a diferença é de 67%.

Ao fazer a comparação com o ciclo normalizado norte-americano FTP72 com o percurso real citadino, nas suas características, pode-se concluir as seguintes diferenças:

- Comparando o valor da potência específica máxima de propulsão sem atrito a diferença entre os dois ciclos é de 80%, sendo de 73% para a de travagem;
- Ao comparar o valor da energia específica de propulsão sem atrito a diferença é de 62%;

Introduzindo um carro de referência na equação as diferenças variam e assim:

- O valor da energia específica motora do percurso citadino real é 80% superior ao do ciclo normalizado FTP72, e no caso da de travagem a diferença é de 59%;
- No caso das máximas potências específicas motoras e de travagem as diferenças entre os dois ciclos são de 77% e 78%, respetivamente.

Ao fazer a comparação entre os ciclos de condução normalizados podemos concluir mais uma vez que o ciclo de condução normalizado europeu é pouco agressivo.

Comparando o ciclo NEDC com o norte-americano combinado EPA 5cycle, as diferenças em termos de caracterização sem veículo de referência são:

- Em relação às potências específicas máximas sem atrito, o norte-americano apresenta valores muito superiores, 19% na motora e 52% na de travagem;
- Em relação à energia específica motora sem atrito a diferença entre os dois ciclos de condução é de cerca de 73%.

Introduzindo o carro de referência na equação as diferenças são:

- Cerca de 41% no caso da máxima potência específica motora e de 53% na de travagem;
- Nas energias específicas estes valores são muito superiores, 87% na motora 89% no caso da de travagem.

Ao fazer o mesmo exercício com o novo ciclo de condução normalizado podemos verificar:

- O ciclo WLTP na classe 3 apresenta uma potência específica máxima de propulsão sem atrito 43% superior ao NEDC e no caso da de travagem o valor é 95% superior;
- Na energia específica de propulsão sem atrito o ciclo mundial apresenta um valor 72% superior;

No caso dos valores analisados com introdução de um carro de referência as diferenças são:

- A máxima potência específica motora do ciclo mundial é 82% superior em relação ao NEDC e o valor da de travagem é 88% superior;
- Nas energias específicas motora e de travagem a diferença é de 85% e 94% respetivamente.

7.2. Sugestões para trabalho futuro

Para trabalho futuro seria pertinente continuar o desenvolvimento do *software* do modelo energético incluindo, por exemplo, módulos para os componentes de sistema de tração do veículo (motor, transmissão) o que permitira simular consumos de emissões e de poluentes ao longo dos ciclos em análise.

Seria também importante ao adicionar módulos para o sistema de tração incluir a opção de transmissão híbrida, motor de combustão e motor eléctrico, visto que atualmente este tipo de transmissão tem vindo a ter ganhar quota de mercado em relação à transmissão com apenas motor de combustão. No caso do módulo da transmissão seria também importante contemplar as transmissões automáticas visto que também estas têm cada vez mais adeptos e permitem actualmente a redução do consumo de combustível em relação à transmissão manual.

A precisão de alguns dos parâmetros ou constantes utilizadas no modelo matemático poderá ser melhorada, nomeadamente, o coeficiente de rigidez em curva dos pneus deverá ser estimado por ensaios em pista circular com um veículo real.

No que diz respeito à recolha de dados de percursos reais, um novo tipo de sensor, deverá ser utilizado em alternativa ou em conjunto com o GPS, pelo menos para os dados de altitude.

8. BIBLIOGRAFIA

ALONSO, M. e. (1972). *Física - Um curso universitário, Volume I*. Editora Edgard Blücher LTDA.

Calspan. (Novembro de 2007). Obtido de Calspan: <http://www.calspan.com/tire.htm>

Comission, E. (Novembro de 2014). *EU energy in figures - Statistical PocketBook*.
Obtido de EPOCKETBOOK:
http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2014_pocketbook.pdf

Commision, E. (Novembro de 2014). *Clean transport, Urban transport - What do we want to achieve ?* Obtido de Transports/Urban:
http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cpt/index_en.htm

Commision, E. (Novembro de 2014). *Legal acts on transport statistics*. Obtido de Transports Facts-Fundings:
<http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2014/pocketbook2014.pdf>

Commission, E. (11 de 2014). *Statistical pocketbook 2014*. Obtido de EPOCKETBOOK/TRANSPORTS:
http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2014_en.htm

Commission, E. (s.d.). *Reducing CO2 emissions from passenger cars*. Obtido de Policies/Transport:
http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm

DieselNet. (2006). (ECOpoint Inc.) Obtido em 24 de 05 de 2014, de http://www.dieselnets.com/standards/us/ld_t2.php

ECOpoint. (Julho de 2013). *DieselNet, Emission Test Cycles, EU*. (Inc., © 1997 - 2013 ECOpoint) Obtido em 27 de Setembro de 2013, de DieselNet:
http://www.dieselnets.com/standards/cycles/ece_eudc.php

ECOpoint. (Junho de 2013). *DieselNet, Europe Union Emission Standards*. (© 1997 - 2013 ECOpoint Inc.) Obtido em 27 de Setembro de 2013, de <http://www.dieselnets.com/standards/eu/ghg.php>

ECOpoint. (Maio de 2013). *DieselNet, United States Emission Standards*. (Inc., © 1997 - 2013 ECOpoint) Obtido em 01 de Novembro de 2013, de http://www.dieselnets.com/standards/us/ld_t3.php

- Energy, U. D. (2012). *Transportation Energy Data Book Edition 31*.
- EPA. (2007). *Testing and Measuring Emissions*. Obtido de <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>
- Exército, I. G. (s.d.). *Transformação de Coordenadas*. Obtido em Junho de 2014, de <http://www.igeoe.pt/coordenadas/trans.aspx>
- Ferreira, J. (2010). *Modelação do funcionamento em circulação real de um veículo eléctrico*.
- GILLESPIE, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International.
- HUCHO, W. (1998). *Aerodynamics of Road Vehicles*. SAE International.
- IEA. (2013). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- (2011a). *International Transport on Clean Transportation*. ICCT.
- Junior, C. S. (2008). *Sistema de Posicionamento Global, Universidade Paranaense*.
- Kyoto Protocol*. (Novembro de 2014). Obtido de Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol
- MILLIKEN, W. e. (1995). *Race Car Vehicles Dynamics*. SAE International.
- NHTSA. (2003). “*Vehicle Weight, Fatality Risk and Crash Compatibility of Model Year 1991-99 Passenger Cars and Light Trucks*”,.
- Ntziachristos. (2014). *Modelling the Trip Length Distribution Impact on the CO2 Emissions of Electrified Vehicles*.
- Peter Mock, J. G. (2012). *Discrepancies between type-approval and “real-world” fuel consumption and CO2 values*.
- Plouchart, G. (2005). *Energy Consumption in the Transport Sector*. IFP.
- Schneider, A. (2003-2014). *GPS Visualizer: Do-It-Yourself Mapping*. Obtido em Agosto de 2014, de <http://www.gpsvisualizer.com/>
- SUMANTRAN, V. e. (1996). *Vehicle Aerodynamics*. SAE International.
- Technology, A. (2007). *Honda Hybrids*.
- Überwachungsverein, T. (2010). *TÜV Report 2010*.

Wikipedia. (s.d.). *Local Regression*. Obtido em Setembro de 2014, de http://en.wikipedia.org/wiki/Local_regression

Zallinger, M. e. (2009). *Road Gradient and Vehicle Load. TUG Report*. Graz University of Technology.

zFacts. (2007). *What should be done about global warming*. Obtido em 19 de 08 de 2014, de <http://zfacts.com/p/126.html>

ANEXO A

Descrição dos Percursos de Condução Reais

Ciclo de Condução Cidadino

O circuito realizado tem uma extensão de cerca de 18km e uma duração de aproximadamente 41 minutos e é realizado a uma velocidade média de 26 km/h. De seguida são descritos os pontos mais importantes do percurso.

- 1-** Partiu-se da entrada do parque de estacionamento da Universidade do Minho (altitude de 201 m), tomando a Alameda da Universidade e logo de seguida a subida da rua Rómulo de Carvalho, entrando na variante Guimarães-Fafe, no sentido GUIMARÃES-FAFE (máximo relativo de altitude de 240 m);
- 2-** Entrou-se no nó de ligação à IC5 na direção GUIMARÃES – FAFE, seguindo-a por cerca de 2km (min. relat. alt. 246 m);
- 3-** Saiu-se da IC5 no nó do Intermarché (máximo relat. alt.308 m);
- 4-** Na rotunda seguinte, saiu-se na primeira saída tomando a N101, no sentido Fafe - Guimarães, durante cerca de 1km (max. relat. alt. 309 m);
- 5-** Virou-se à esquerda para a Rua da União Vimaranesense, em direção ao centro de treino do Vitória Sport Clube (max. relat alt. 253 m);
- 6-** Virou-se à direita tomando a Rua Antero Henriques da Silva, percorrendo-a até ao seu final;
- 7-** Parando no cruzamento, deu-se seguidamente entrada na Rua Dona Constança de Noronha, seguindo-a até ao Largo do Tribunal;
- 8-** Saiu-se na segunda saída da rotunda, tomando a Avenida Alberto Sampaio em direção ao Campo da Feira, em frente à Igreja de S.º Gualter;
- 9-** Parou-se nos semáforos, seguindo depois pela Alameda de S.º Dâmaso, em direção ao Largo do Toural;
- 10-** Depois de passado o Largo do Toural, seguiu-se pela Rua de Santo António em direção aos Correios (min relat. alt. 187m);
- 11-** Na rotunda, saiu-se na segunda saída para a Avenida General Humberto Delgado, seguindo-a até ao seu final;
- 12-** Virou-se à direita em direção ao Castelo, tomando a Rua Joaquim de Meira (max. relat. alt. 218m);
- 13-** Virou-se logo de seguida à direita, em direção à estátua de D.º Afonso Henriques onde se procedeu a uma inversão de marcha (max. relat. alt. 235 m);
- 14-** Tomou-se novamente a Rua Joaquim de Meira;
- 15-** Virou-se à Direita para a Rua Capitão Alfredo Guimarães;

- 16- Virou-se à esquerda em frente à pastelaria Cristo Rei, tomando a Rua de Alexandre Herculano;
- 17- Virou-se à esquerda, tomando a Rua de Ferreira Castro, em direção ao Castelo;
- 18- Virou-se à direita tomando a Avenida General Humberto Delgado (min. relat. 185 m);
- 19- Na rotunda, saiu-se na primeira saída, tomando a Rua de Gil Vicente em direção ao largo da Escola Francisco de Holanda;
- 20- Seguiu-se pela Alameda Dr. Alfredo Pimenta, em direção a Polícia de Segurança Pública;
- 21- Na rotunda tomou-se a segunda saída, para a Rua de Santa Eulália;
- 22- Virou-se a esquerda em direção ao Estádio D. Afonso Henriques tomando a Rua Dr. Arnaldo Sampaio (max. relat 202 m);
- 23- Chegando à rotunda, seguiu-se pela segunda saída em direção ao Hotel Íbis, pela Avenida de Londres;
- 24- Virou-se à direita em direção à entrada do Guimarães Shopping em torno da Alameda Dr. Mariano Felgueiras (min. absoluto 157 m);
- 25- Seguiu-se pela Avenida Conde Margaride, em direção novamente ao Largo da Escola Francisco de Holanda;
- 26- Depois dos semáforos virou-se à direita pela Rua do Paio Galvão (min. relat. 175 m);
- 27- Chegando-se ao Largo do Toural, seguiu-se pela Alameda de São Dâmaso em direção à Igreja de S.º Gualter;
- 28- Em frente à igreja de S.º Gualter virou-se à direita para a Avenida D. João IV (max. relat. 192 m);
- 29- Chegando à rotunda, tomou-se a primeira saída virando logo depois à direita para a Rua Paulo VI (max. relat. 236 m);
- 30- Virou-se à direita, na Avenida D. Afonso Henriques, subindo até à Avenida D. João IV;
- 31- Virou-se à direita mais a frente, depois da rotunda, para Rua do Colégio Militar, seguindo-a até ao seu final;
- 32- Virou-se à direita para a Rua da Liberdade em direção à Rua de Camões;
- 33- No final da Rua de Camões, encontrou-se novamente o Largo do Toural;
- 34- Virou-se a direita tomando a Avenida D. Afonso Henriques, passando pelo Centro Cultural Vila Flor (max. relat 219 m);

- 35- Virou-se à direita, de modo a tomar a Avenida D. João IV, seguindo-a até encontrar a N105 em Via Rápida (max relat 208 m);
- 36- Tomou-se a Via Rápida Circular de Guimarães, passando pelo Guimarães Shopping em direção à U.M., seguindo-a por cerca de 4km (min relat 168 m);
- 37- Tomou-se a saída para o centro de Guimarães em frente à bomba de combustível da Cepsa, tomando a Avenida de Santa Eulália (max relat 200m);
- 38- Desceu-se até encontrar a rotunda em frente à Policia de Segurança Pública (min relat 186 m);
- 39- Saiu-se na segunda saída, tomando a Rua de Teixeira Pascoais, passando para a Rua Cónego Dr. Manuel Farla até a rotunda da Universidade (max relat 206 m);
- 40- Saiu-se na primeira saída, virando-se depois à direita para entrar no polo da Universidade do Minho em Azurém (altitude final de 201 m).



Figura 8.1 - Ilustração da vista de satélite do percurso citadino realizado na cidade de Guimarães

Depois da descrição do percurso é importante salientar certos pontos críticos do mesmo, onde se podem verificar consumos energéticos elevados, tais como subidas ou descidas acentuadas. Assim podemos verificar no gráfico seguinte as zonas críticas do percurso representadas.

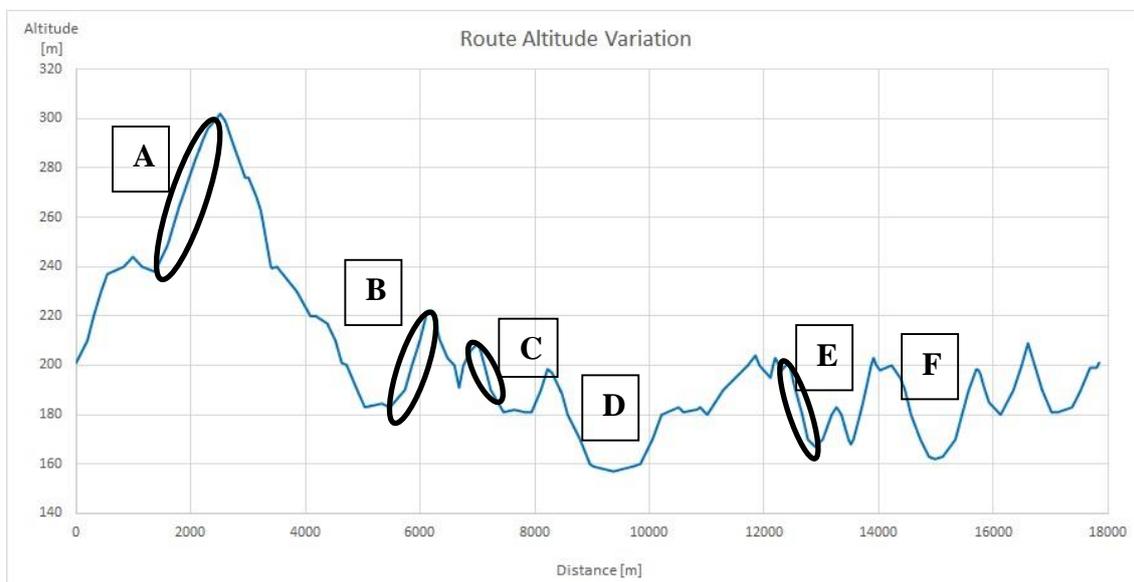


Gráfico 8.1 – Variação da altitude no percurso Citadino com a identificação dos pontos críticos

- A.** Entre os pontos 3 e 4, percorre-se um troço de via rápida, no qual são atingidas velocidades na ordem dos 90km/h. A certo ponto desse troço, encontra-se uma subida representada no Gráfico 1, que necessita de elevada potência motora para ser ultrapassada.
- B.** Entre o ponto 11 e 12 ocorre uma situação similar, mas como este espaço se percorre a uma velocidade bastante inferior (50km/h), a potência necessária não é tão alta.
- C.** Entre o ponto 18 e 19, faz-se a descida da rua do ponto anterior. Para manter o veículo a uma velocidade segura e contemplando sempre o facto da existência de trânsito, gera-se uma elevada potência de travagem.
- D.** Na sequência de pontos do 21 ao 23, dá-se uma demonstração do tipo de topografia do terreno da cidade de Guimarães. De 21 para 22, existe uma subida considerável, e de 22 para 23, faz-se cerca de 1km sempre em descida para voltar, a uma altitude semelhante do ponto 21.
- E.** Em 31, a descida que é evidenciada no gráfico, gera elevada potência de travagem.
- F.** De 36 a 37 encontra-se outro ponto de utilização de via rápida. Aqui dá-se um caso idêntico ao primeiro, já que se encontra uma elevação de altitude

considerável. A diferença neste caso é que também se dá uma descida acentuada, mas partindo do princípio que a velocidade se manterá constante, visto ser uma estrada com duas vias, não será necessária travagem.

Percurso de condução em Estrada Nacional

Este percurso de condução foi realizado na estrada Nacional 101 entre a cidade de Guimarães e a cidade de Braga. Este tem uma extensão de aproximadamente 23 km, uma duração de 25 minutos e é realizado a uma velocidade média de 54 km/h. De seguida são descritos os pontos mais importantes do percurso.

- 1- Partiu-se da entrada do parque de estacionamento da Universidade do Minho (altitude de 201 m), tomando a Alameda da Universidade e logo de seguida a subida da rua Rómulo de Carvalho, entrando na variante Guimarães-Fafe, no sentido de BRAGA-FELGUEIRAS (máximo relativo de altitude de 240 m);
- 2- Seguiu-se na variante, passando nas bombas de gasolina da GALP, até se encontrar a saída que diz BRAGA-TAIPAS, descendo à direita na mesma;
- 3- Seguiu-se pela Rua de Santa Eulália (mínimo relativo de altitude de 170 m na ponte da ribeira) até à rotunda do Lidl (máx. relativo de 185 m) onde se saiu na segunda saída na direção BRAGA-TAIPAS;
- 4- Continuou-se na N101 (min. relat. de 130 m na bomba Repsol) até se encontrar uma rotunda (max. relat. 140 m), onde se seguiu em frente em direção a BRAGA;
- 5- Continuou-se em frente passando pela ponte das Caldas da Taipas (mínimo absoluto de altitude de 115 m) em direção ao centro das Taipas;
- 6- Continuou-se passando pelos semáforos no centro das Taipas e seguindo sobre a esquerda na direção de BRAGA;
- 7- Tomou-se a Rua do Comandante Carvalho Crato, passando pelo bomba de gasolina da BP, até encontrar uma rotunda onde se saiu em frente na direção a Sande de São Martinho (max. relat. alt. de 140 m);
- 8- Seguiu-se na Rua de S^o. Martinho (min. relat. de 127 m na ponte da ribeira), passando pela Igreja de Sande (S^o. Martinho), onde se começou a subir para a Morreira;
- 9- Continuou-se na N101, onde se subiu até à Morreira pela Av. Portela, atingindo-se o máximo absoluto de altitude de 302 m;
- 10- Desceu-se da Morreira até Esporões pela Av. de S^o. Tiago, onde se virou à direita para o acesso à circular no sentido BRAGA ESTE (min. relat. alt. de 170 m);

- 11-** Entrou-se na circular urbana de Braga, onde se começou a subir a Av. Miguel Torga até ao alto de Nogueira (alt. 245 m);
- 12-** No alto de Nogueira continuou-se na circular urbana que desce pela Av. Frei Bartolomeu dos Mártires até às bombas de gasolina da Repsol situadas perto das Piscinas Municipais de Braga;
- 13-** Depois das bombas de gasolina da Repsol entra-se no túnel em frente (alt. 172 m) e seguindo na mesma via vai-se passar em frente ao Centro Comercial BragaParque;
- 14-** Ao passar na bomba de gasolina, situada em frente ao Centro Comercial BragaParque, saiu-se da circular urbana para a rotunda que se situa em baixo da mesma;
- 15-** Na rotunda saiu-se na terceira saída;
- 16-** Logo após sair da rotunda virou-se na primeira rua à direita para a Rua Padre António Vieira;
- 17-** Seguiu-se em frente ao longo da Rua Padre António Vieira e virou-se na segunda rua à esquerda para a Praça do Bocage;
- 18-** Contornou-se a Praça do Bocage por completo e estacionou-se logo após um café do lado esquerdo da rua (altitude final de 195 m).

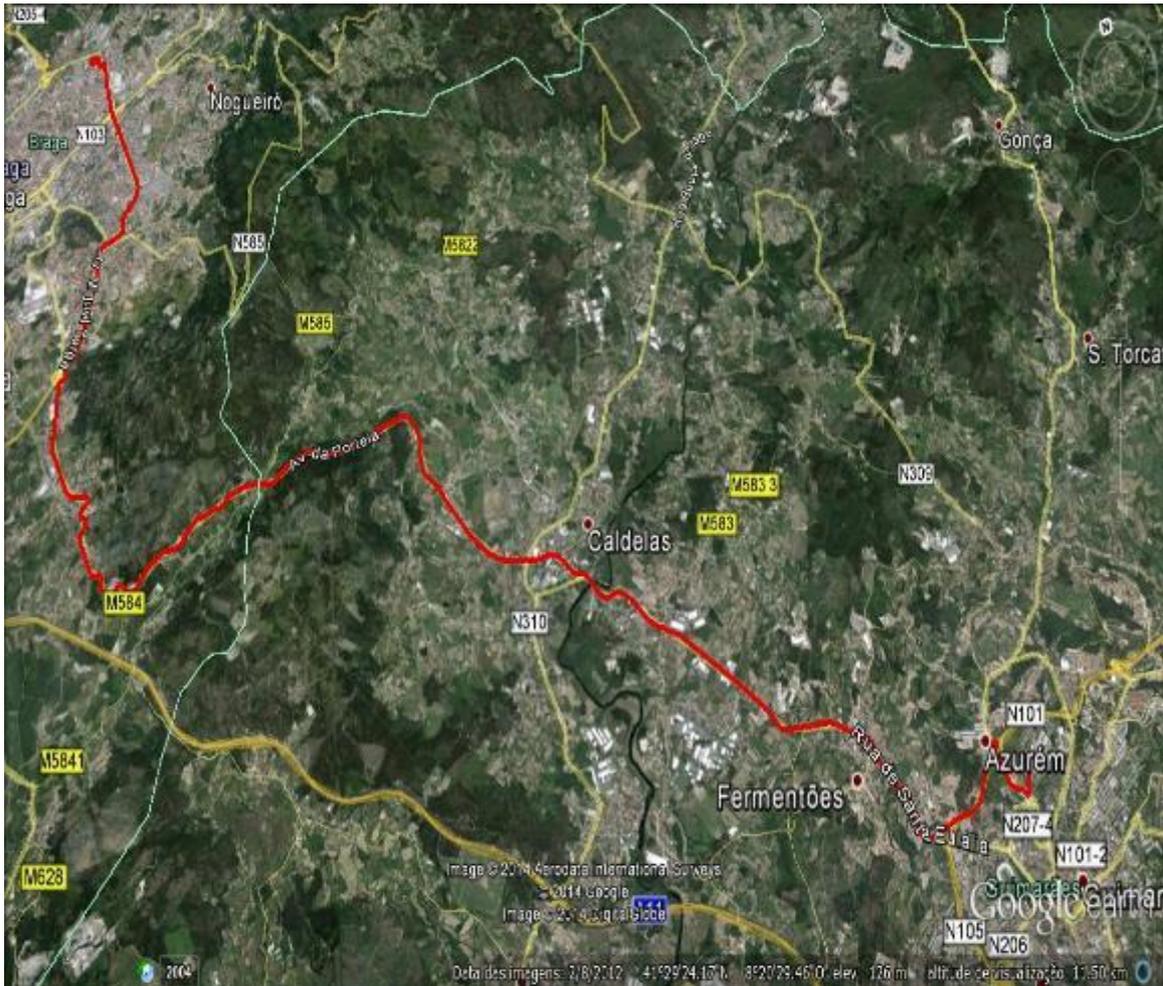


Figura 8.2 - Representação na vista de satélite do percurso realizado em EN

É importante salientar certos pontos críticos do percurso, onde se podem verificar consumos energéticos elevados, tais como subidas ou descidas acentuadas. Assim podemos verificar no gráfico seguinte as zonas críticas do percurso representadas.

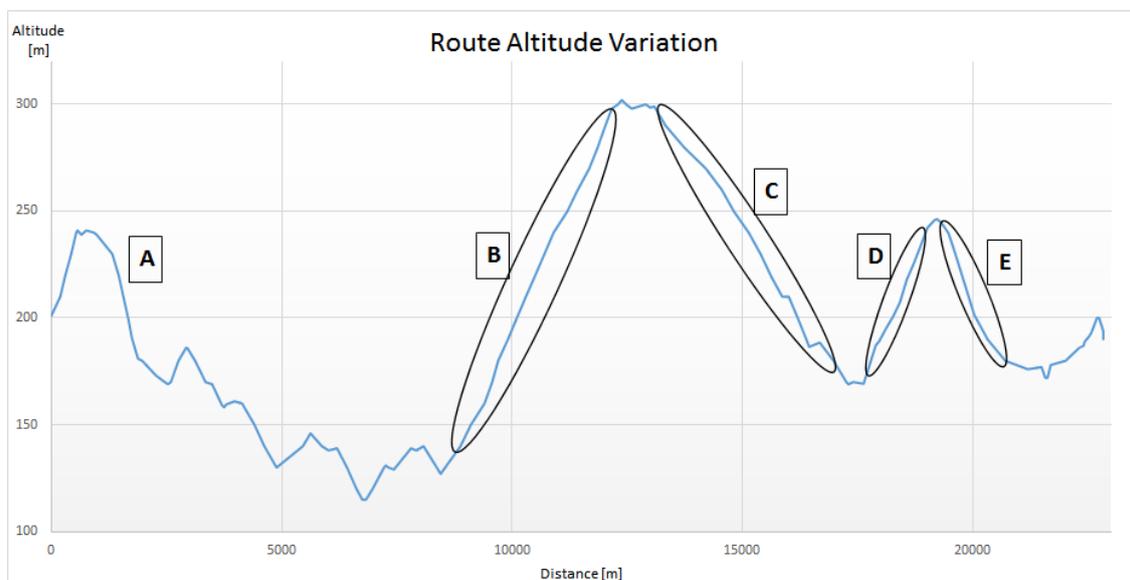


Gráfico 8.2 – Variação da altitude no percurso em EN com a identificação dos pontos críticos

- A. No ponto 2 encontramos uma descida acentuada, pelo que para manter o carro a uma velocidade segura tem que se aplicar alguma força de travagem de forma continuada pelo que se irá gerar uma elevada potência de travagem;
- B. Entre os pontos 8 e 9, percorre-se um troço em que apresenta uma subida continuada que por ser acentuada necessita de elevada potência motora para ser ultrapassada;
- C. Entre os pontos 10 e 11, faz-se a descida da estrada descrita no ponto anterior, pelo que para manter o carro a uma velocidade constante irá gerar-se uma elevada potência de travagem;
- D. Entre os pontos 11 e 12 encontramos uma subida acentuada que é percorrida numa via rápida pelo que para ultrapassar a mesma e acelerar até à velocidade normal num troço deste tipo irá gerar-se uma elevada potência motora;
- E. Entre os pontos 12 e 13 deparamo-nos com a descida do troço do ponto anterior, descida esta que também é efetuada numa via rápida, pelo que se tem que aplicar força de travagem de forma intermitente para manter o veículo numa velocidade segura.

Percurso de condução em Autoestrada

Este percurso de condução foi realizado na Autoestrada A11 entre a cidade de Guimarães e a cidade de Braga. Este tem uma extensão de aproximadamente 27 km, uma duração de 19 minutos e é realizado a uma velocidade média de 85 km/h. De seguida são descritos os pontos mais importantes do percurso.

- 1- Partiu-se da entrada do parque de estacionamento da Universidade do Minho (altitude de 201 m), tomando a Alameda da Universidade e logo de seguida a subida da rua Rómulo de Carvalho, entrando na variante Guimarães-Fafe, no sentido de BRAGA-FELGUEIRAS (máximo relativo de altitude de 240 m);
- 2- Entrou-se na via rápida que faz ligação à Autoestrada e percorre-se uma extensão de cerca de 2 km até se virar à direita na saída que diz A11 BRAGA (max relat 253 m);
- 3- Após tomar a saída descrita no ponto anterior entra-se em outra via rápida onde se continua até ao seu final onde se encontra uma rotunda (min relat 152 m);
- 4- Na rotunda tomou-se a segunda saída em direção à Autoestrada A11;

- 5- Após passar as portagens virou-se de imediato à esquerda na saída que diz BRAGA (minino absoluto 105 m);
- 6- Entrou-se na Autoestrada A11 e percorre-se este troço de até ao final, onde se encontrou as portagens de saída (máximo absoluto 318 m);
- 7- Nas portagens de saída tomou-se as portagens do lado direito que são as que dão acesso a Braga (min relat 149 m);
- 8- Após as portagens entra-se na circular urbana de Braga, onde após uma subida se tomou a saída BRAGA SUL;
- 9- Após esta saída continuou-se na via da direita na direção BRAGA SUL (max relat 166 m);
- 10- Depois desta saída continuou-se na circular urbana durante cerca de 4 km (max relat 246 m);
- 11- Antes de passar em frente ao Centro Comercial Minho Center tomou-se a saída à direita, para a Rua Fonte das Aguas Férreas, antes da bomba de gasolina do Continente;
- 12- Seguiu-se pela Rua Fonte das Aguas Férreas, seguindo em frente na primeira rotunda, ao lado do Centro Comercial Minho Center (max relat 210 m);
- 13- Após esta rotunda, cerca de 50 metros mais à frente, encontra-se uma outra rotunda, onde se tomou a terceira saída;
- 14- Passando em frente ao Office Center e Aki, na Av. Dom João II, chegou-se a uma rotunda onde se saiu logo na primeira saída, para a Rua da Senra;
- 15- Subiu-se a Rua da Senra até se encontrar um campo de ténis do lado esquerdo, onde logo de seguida se tomou a saída à esquerda para a Rua do Outeiro (max relat 233 m);
- 16- Na Rua do Outeiro seguiu-se em frente até se encontrar um cruzamento onde se virou à direita para a Rua da Carreira;
- 17- Seguindo em frente durante cerca de 100 metros na Rua da Carreira virou-se à esquerda para a Rua da Igreja, onde se estacionou do lado direito, ao fim de 10 metros (altitude final 220 m).

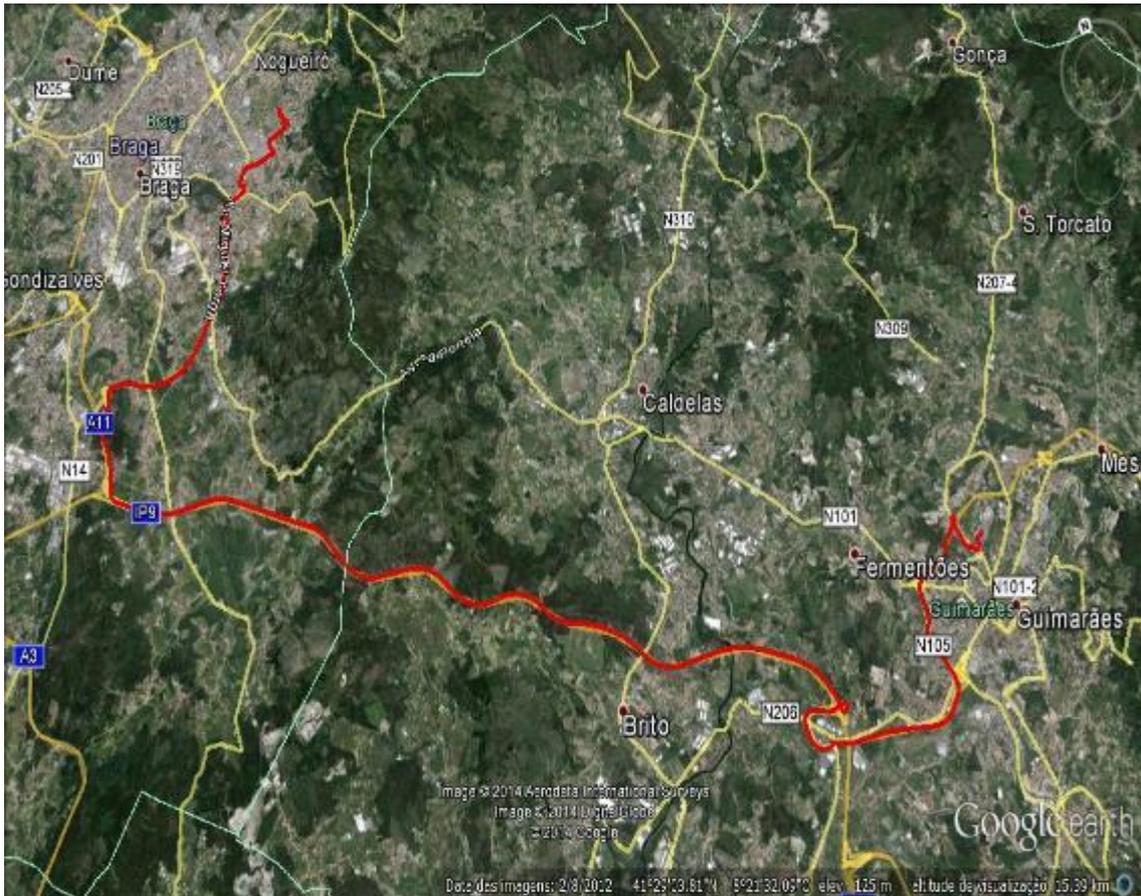


Figura 8.3 - Representação na vista de satélite do percurso realizado em AE

Este percurso apresenta pontos críticos semelhantes ao percurso em Estrada Nacional, já que se realiza entre as mesmas cidades, começando no mesmo ponto mas acabando em pontos diferentes. Parte deste percurso é semelhante ao percurso em Estrada Nacional, logo no início em Guimarães, e no final na zona de Nogueira na Circular Urbana de Braga. No gráfico seguinte podemos verificar onde se situam os pontos críticos deste percurso.

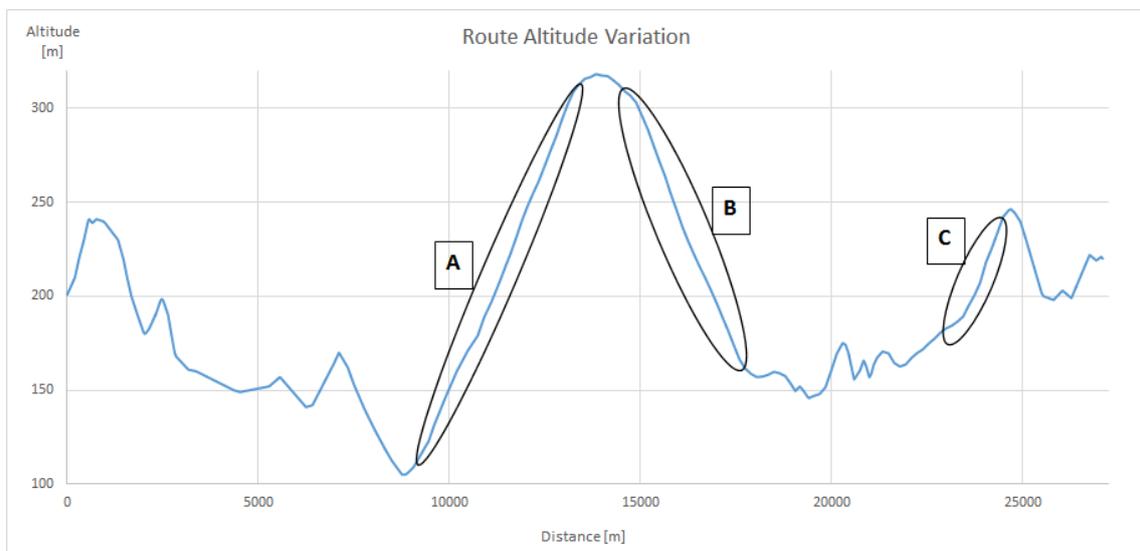


Gráfico 8.3 – Variação da altitude no percurso em AE com a identificação dos pontos críticos

- A.** Este é o principal ponto crítico deste percurso já que se trata de uma subida longa com um ângulo de inclinação acentuado, passo 6 do percurso, onde para manter a velocidade na Autoestrada irá ser necessário uma energia de propulsão elevada;
- B.** Este é outro dos pontos relevantes deste percurso porque será necessário aplicar energia de travagem de forma intermitente para manter a velocidade, e tal como o ponto anterior encontra-se descrito através do passo 6 de descrição do percurso;
- C.** Este ponto é semelhante ao ponto crítico descrito pela letra D no percurso em Estrada Nacional, já que se trata do mesmo troço da Circular Urbana de Braga.

ANEXO B

CARTAS MILITARES

Neste anexo é descrito a informação marginal contida nas cartas militares originais, cuja descrição foi obtida a partir do Manual de Leitura de Cartas do Serviço Cartográfico do Exército:

Nome da Folha: encontra-se na margem superior direita e geralmente, advém de um pormenor geográfico ou de cultura importante nela existente. Sempre que possível, deve ser usado o nome da maior cidade, vila ou aldeia que nela se encontra.

Número da Folha: encontra-se na margem superior direita e é repetido na inferior direita. É o número de referência correspondente a cada folha da carta e baseia-se num sistema arbitrário no qual a numeração das folhas cresce de Oeste para Leste e de Norte para Sul. À esquerda do número da margem superior direita aparece um conjunto de letras e algarismos que nos dá o número das folhas 1/50 000 e 1/100 000 onde a folha se situa.

Número de Série: aparece nas margens superior direita e inferior direita podendo apresentar-se sob uma das seguintes formas:

- Um número de 4 algarismos.
- Uma letra seguida de um número de 3 ou 4 algarismos.

Número de Edição: encontra-se nas margens superiores e inferior direita e representa a idade da carta em relação a outras edições da mesma carta. A última edição terá um número maior do que as anteriores.

Escala da Carta e Escala Gráfica: estão localizadas na margem inferior e ao centro. A escala da carta dá a relação entre uma distância da carta e a equivalente distância no terreno, sendo a escalada gráfica usada para a determinação de distâncias no terreno por processos gráficos.

Nota de Responsabilidade: aparece nas margens superior ao centro e inferior à esquerda e centro. A principal finalidade da nota de responsabilidade é indicar o produtor e referir o método de compilação utilizado pelos técnicos.

Diagrama de Ligação das Folhas: aparece na margem superior esquerda e indica as folhas da mesma carta que circundam a folha em questão.

Tipo de Projeção: a referência sobre a projeção está localizada na margem inferior ao centro e indica o tipo de projeção usado na representação da área abrangida pela carta.

Sistema de Referência: as respetivas indicações estão localizadas na margem inferior ao centro e informam sobre os sistemas de referência usados. Contém os elementos para a

identificação de pontos nas quadrículas Gauss e UTM, os quadrados de 100 000 metros nos quais está localizada a área representada e instruções para referenciar um ponto sobre a carta.

Elementos de Datum: estão na margem inferior ao centro, havendo duas informações sobre o Datum:

- Datum Vertical que designa a base de referência de todas as cotas que aparecem na carta.
- Datum Horizontal que indica o ponto em relação ao qual as coordenadas dos vértices geodésicos foram determinadas.

Legenda: localiza-se na margem inferior. Apresenta e identifica todos os símbolos usados na carta (sinais convencionais).

Diagrama de Declinação: localiza-se na margem direita, dando a posição relativa entre os nortes geográfico, cartográfico e magnético.

Escala das Tangentes: aparece na margem superior e emprega-se para a marcação gráfica da direção do norte magnético sobre a carta. As instruções relativas ao seu uso estão normalmente impressas sobre o diagrama de declinação.

Litografia Impressora: na margem inferior à esquerda. Indica a litografia onde foi impressa a folha da carta; a data de impressão encontra-se junto ao número de edição.

Equidistância das Curvas de Nível: na margem inferior ao centro. Indica a distância vertical entre as curvas de nível da carta. Quando forem utilizadas curvas auxiliares ou suplementares, será indicado o intervalo.

Diagrama de Cobertura: nas cartas em escala de 1/100 000 e menores pode ser usado um diagrama de cobertura que se encontra normalmente na margem inferior direita e indica os processos utilizados na elaboração da carta, data das fotografias e outras informações.

Glossário: nas cartas de áreas estrangeiras, em que a língua utilizada não é o português, pode aparecer um glossário na margem inferior ou na direita.

Classificação de Segurança: quando for exigida será inscrita na margem superior e inferior.

Informações Especiais: em certas condições, podem ser acrescentadas informações especiais às informações marginais, com a finalidade de auxiliar o utente da carta. Sempre que possível, serão incluídas com outras da mesma natureza.

Existem diversos métodos para a representação do relevo nas cartas, contudo, o método mais preciso e corrente de representar o relevo é através das curvas de nível. Uma curva de nível representa na carta uma linha imaginária sobre o terreno, ao longo da qual todos os pontos têm a mesma cota.

Partindo do nível médio da água do mar a que se atribui a cota zero, são dados valores a cada curva de nível. A distância vertical entre duas curvas de nível consecutivas é designada por equidistância natural e o seu valor é indicado na legenda da carta. Pode ser expressa em metros, mas independentemente da unidade, é a mesma em toda a área abrangida pela carta. É sempre um número inteiro. Esse valor reduzido à escala da carta chama-se equidistância gráfica.

Na maior parte das cartas, as curvas de nível são impressas a castanho e a partir da cota zero e de cinco em cinco curvas, são representadas por um traço mais grosso. Estas são denominadas curvas mestras e são interrompidas, por vezes, para se inscrever o valor da respetiva cota. As curvas compreendidas entre elas chamam-se curvas de nível

intermédias. São representadas por uma linha mais fina do que as mestras e não têm normalmente indicação das cotas.

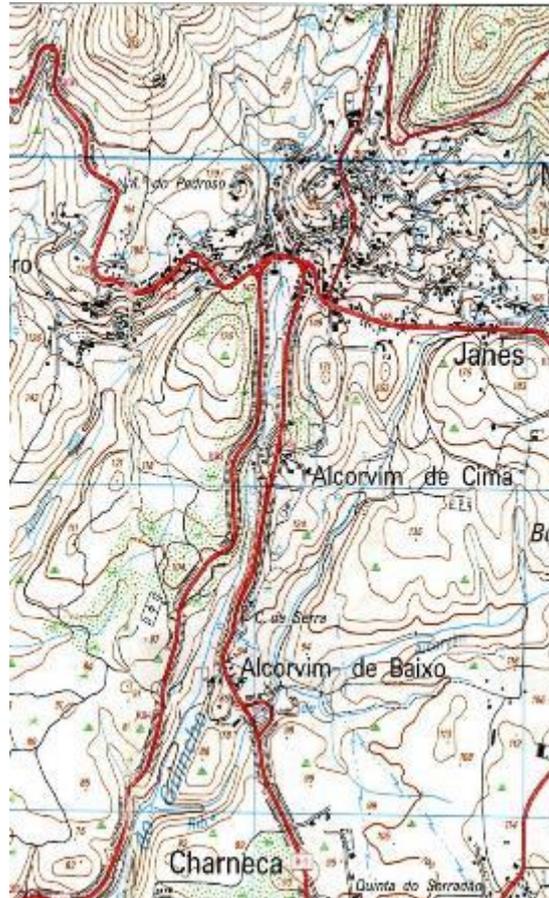


Figura 8.4 – Ex. da representação gráfica das curvas de nível numa carta topográfica

Utilizando as curvas de nível de uma carta, pode-se determinar a cota de qualquer ponto. Assim, um ponto situado sobre uma curva de nível tem a cota dessa curva. Se o ponto estiver situado entre duas curvas de nível, pode-se determinar a respetiva cota por intermédio das curvas situadas acima e abaixo dele, dividindo o espaço compreendido entre elas num número inteiro de partes. Pode-se também utilizar um processo mais simples, quando for tolerada uma precisão de 5 metros, que consiste em atribuir a qualquer ponto entre duas curvas de nível, uma cota intermédia que se calcula adicionando metade do valor da equidistância natural ao valor da curva de nível inferior. Assim, a um ponto entre as curvas de nível de 80 metros e de 90 metros, atribuir-se-á a cota de 85 metros.

ANEXO C

Resultados

Caracterização sem Veículo de Referência	PERCORSOS REAIS						CICLOS NORMALIZADOS								
	Citadino	EN	AE	Citadino (alt.0)	EN (alt.0)	AE (alt.0)	NEDC	ECE15	EUDC	EPA 5 cycle	WLTP_class3	FTP72	HWFET	US06	SC03
Total Length [m]	17856	22825	27077	17856	22825	27077	10931	994	6954	52924	23262	11990	16507	12888	5761
Total Time [s]	2519	1485	1148	2519	1485	1148	1108	175	397	3771	1771	1323	766	598	578
Total Stop Time [%]	5,8%	0,1%	0,6%	5,8%	0,1%	0,6%	24,9%	32,8%	10,5%	13,7%	13,1%	19,1%	0,8%	7,5%	19,5%
Maximum Velocity [km/h]	81	102	131	81	102	131	120	50	120	129	131	91	96	129	88
Non-stop Mean Velocity (km/h)	28,0	55,4	85,5	28,0	55,4	85,5	44,4	27,1	69,7	57,4	53,5	38,9	78,2	83,4	42,9
Maximum Positive Acceleration [m/s ²]	2,3	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4	1,1	1,1	0,8	3,8	1,8	1,5	1,4	3,8	2,3
Maximum Negative Acceleration [m/s ²]	-2,1	-2,4	-3,1	-2,1	-2,4	-3,1	-1,4	-0,8	-1,4	-3,1	-1,5	-1,5	-1,5	-3,1	-2,7
Maximum Friction Free Specific Pulling Power [W/kg]	25,2	37,0	41,4	17,3	27,2	39,4	9,3	7,3	9,3	48,9	21,5	20,1	15,7	48,9	23,5
Maximum Friction Free Specific Braking Power [W/kg]	-24,3	-49,9	-57,3	-18,5	-35,2	-42,0	-22,7	-7,2	-22,7	-43,2	-23,9	-17,7	-25,9	-43,2	-26,0
Friction Free Specific Pulling Energy [W.h/kg/100km]	7,8	5,9	6,7	5,7	4,0	4,1	3,1	4,0	2,6	4,3	4,3	4,8	2,0	5,9	5,7
Specific Accumulated Rises (m/km)	21,6	15,1	17,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Specific Accumulated Descents (m/km)	21,6	-15,6	-16,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Net altitude variation (m)	0,0	-11,0	19,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Specific Altitude Variation (m/km)	0,0	-0,5	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sinusosity to the right (Sinusosity_R) [volts/km]	0,9	0,3	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sinusosity to the left (Sinusosity_L) [volts/km]	-0,8	-0,3	-0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sinusosity Energy Factor [J/kg/rad]	1,7	3,1	5,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

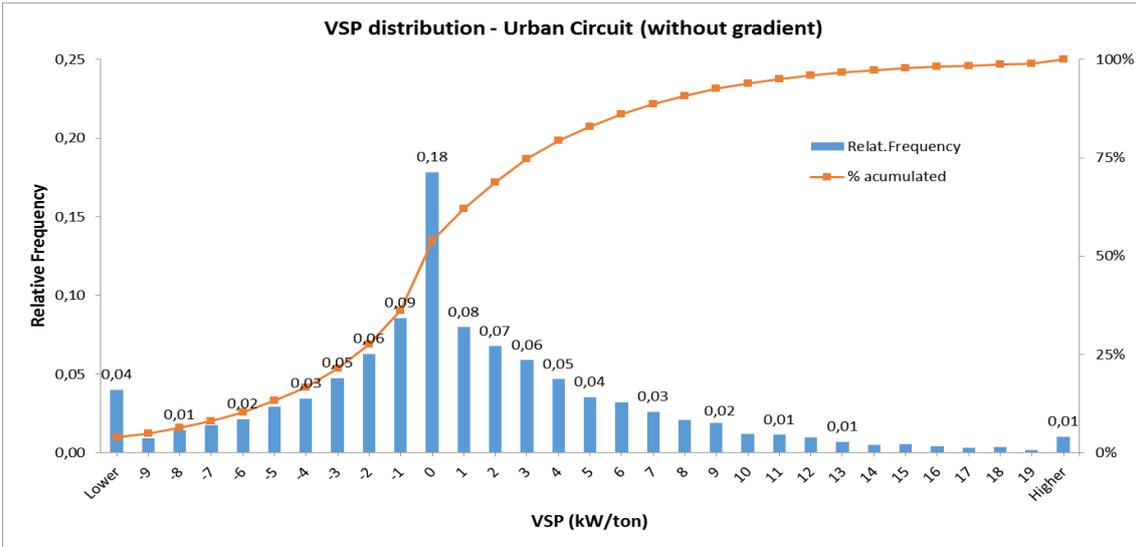


Figura 8.5 - Distribuição VSP no percurso citadino sem influência da altitude

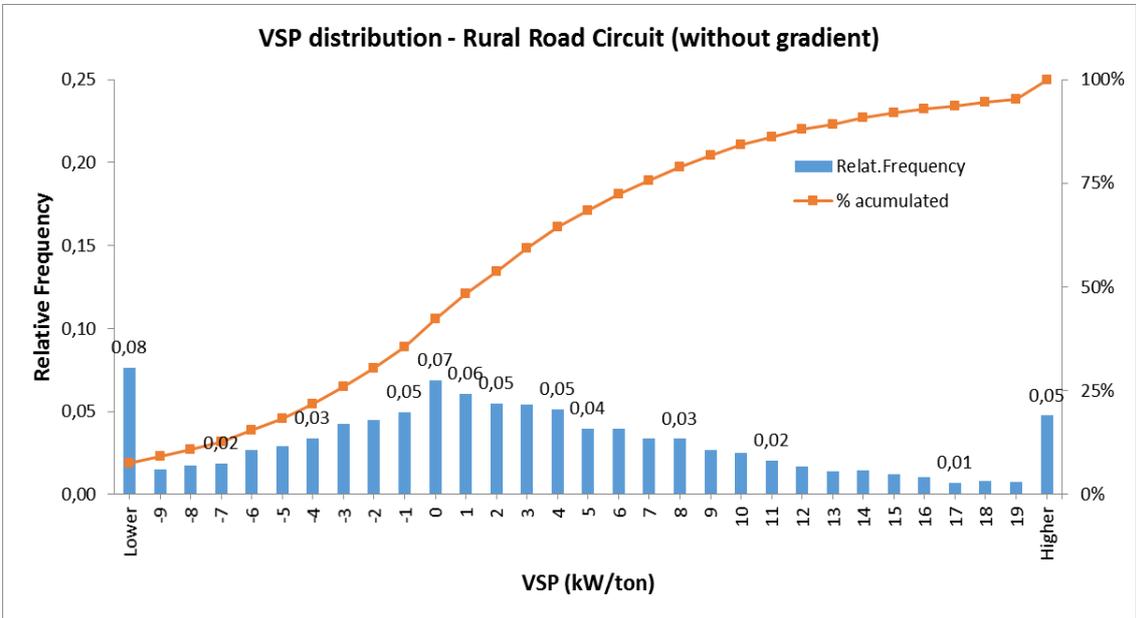


Figura 8.6 - Distribuição VSP no percurso em Estrada Nacional sem influência da altitude

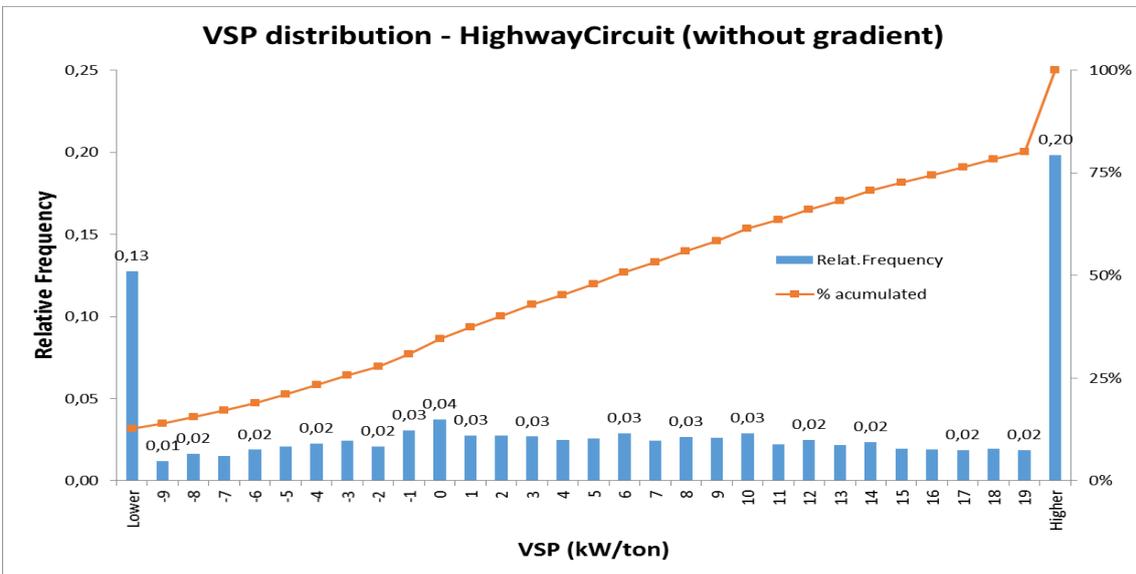


Figura 8.7 - Distribuição VSP no percurso em Auto-estrada sem influência da altitude

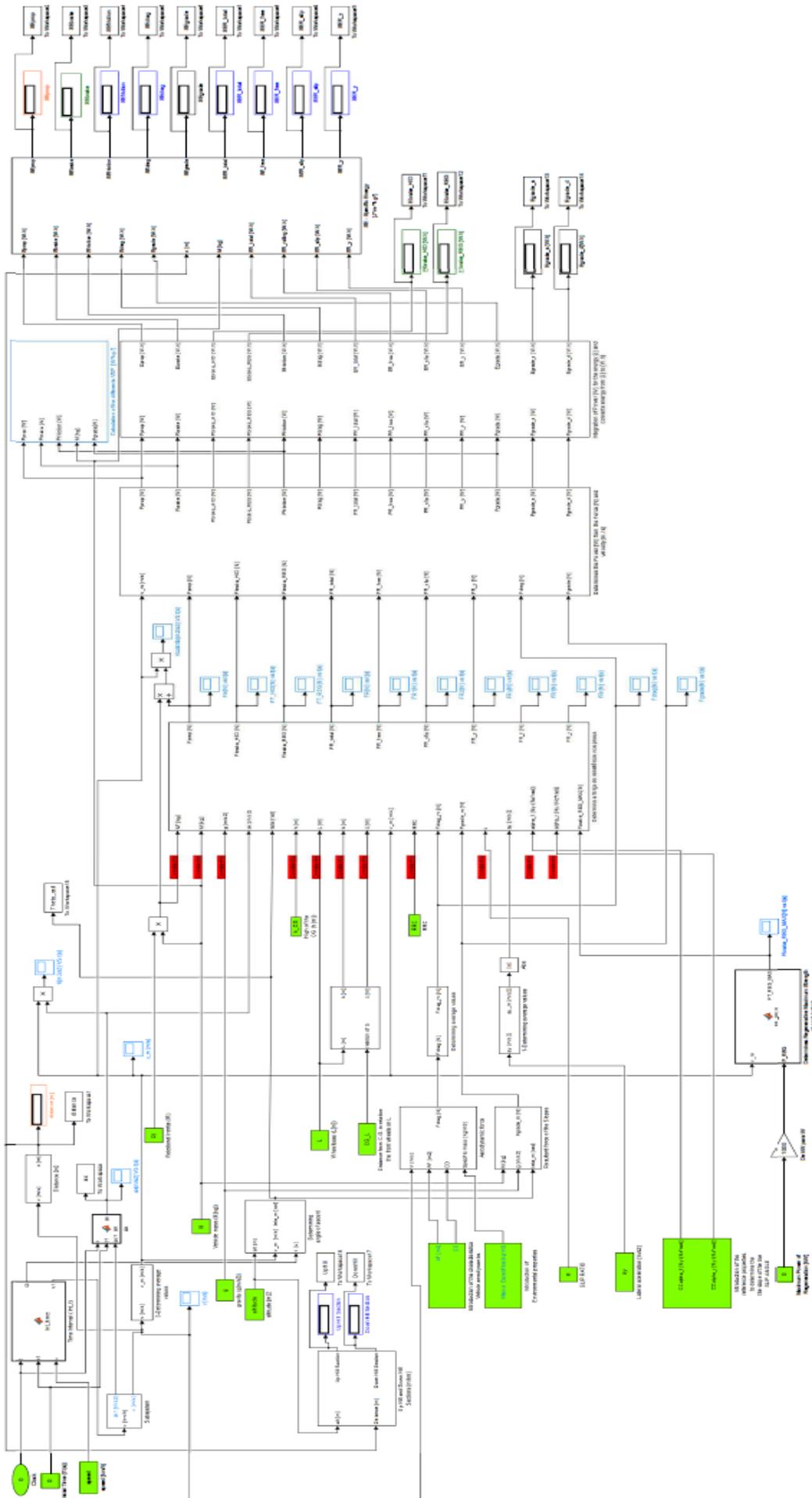
ANEXO D

Descrição dos Modelos MatLab/Simulink

B.1 – Descrição do modelo físico

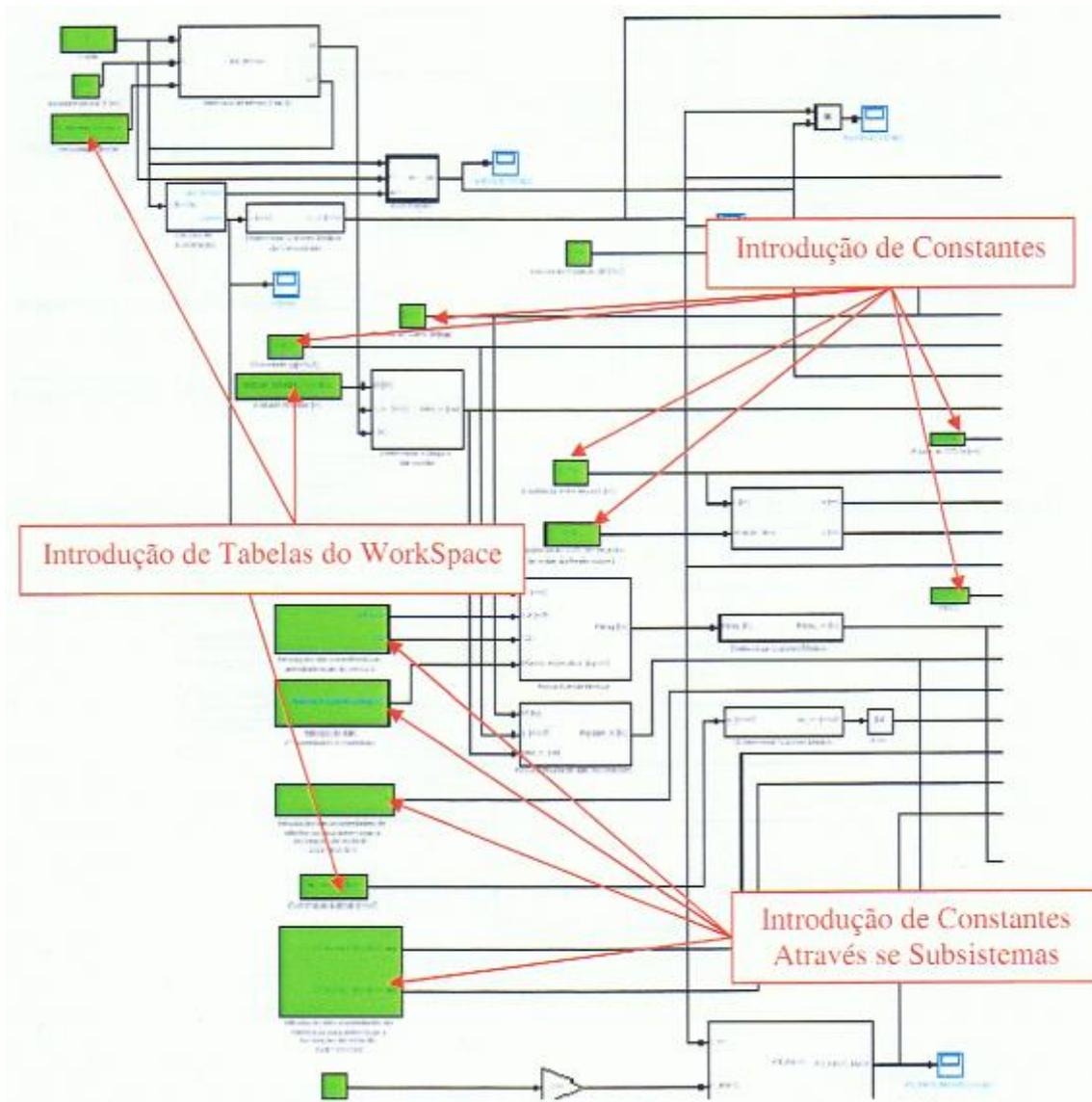
Na figura seguinte, pode observar-se o aspeto final do modelo físico desenvolvido em *MatLab/Simulink* onde se calculam as energias envolvidas no movimento de um veículo.

As quadrículas verdes que estão à esquerda representam as variáveis de entrada no modelo (velocidade, altitude, aceleração lateral, etc.) e no lado direito estão representados os símbolos dos ecrãs (“displays”) com diversas cores, os quais mostram os valores de diversos dados de saída à medida que o programa corre. Todos os subsistemas e funções embebidas do *MatLab* possuem um rótulo que indica a sua função, de modo a facilitar a compreensão do modelo.



B.2. Variáveis de entrada

No modelo utilizado no trabalho presente, as variáveis de entrada podem ser introduzidas de três formas. Uma delas é através de tabelas presentes no *workspace* do *MatLab*, que podem ser importadas de Excel, por exemplo. Outra forma de introdução é através de quadrículas com constantes. Por fim, pode também inserir-se constantes dentro de um subsistema.



B.3. Variáveis de Saída

Os símbolos dos ecrãs para apresentação de resultados são apresentados em diversas cores.

