



Análise sobre a utilização de software AVL - mobilidade (AVL CRUISE)

Mestrado em Engenharia Automóvel

Miguel Duarte Antunes n.º 2220677

Leiria, setembro de 2024



Análise sobre a utilização de software AVL - mobilidade (AVL CRUISE)

Mestrado em Engenharia Automóvel

Miguel Duarte Antunes n° 2220677

Projeto de Mestrado de Engenharia Automóvel realizado sob a orientação do Professor Luis Serrano e o Professor Marcelo Gaspar

Leiria, setembro de 2024

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos professores Luís Serrano e Marcelo Gaspar pela oportunidade que me deram para desenvolver este projeto e pela orientação prestada ao longo do seu desenvolvimento. Quero ainda prestar um agradecimento ao Eng. Nuno Pires, pela disponibilidade para a utilização do banco de ensaios para obtenção de alguns dados para o projeto.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

A utilização de ferramentas de simulação permite o desenvolvimento de produtos no setor automóvel com menor investimento financeiro e de tempo. Permite ainda a diminuir a pegada ecológica no seu desenvolvimento de diferentes soluções, nomeadamente no que diz respeito às emissões de poluentes criadas pela produção de protótipos e nos testes laboratoriais. Neste projeto implementou-se um modelo no software de simulação AVL CRUISE M, considerando uma simulação o mais próximo possível do Volkswagen EOS com motor diesel 2.0 TDI presente no Laboratório de Engenharia Automóvel da ESTG, utilizando os dados deste veículo na sua modelação.

Para fazer a modelação foi necessária uma aprendizagem do software, recorrendo à elaboração de um tutorial com uma explicação detalhada do funcionamento deste, para o objetivo pretendido. Após a modelação do veículo, foi então realizada a simulação considerando o ciclo de condução selecionado. Os resultados obtidos foram avaliados quanto ao consumo de combustível para um ciclo de condução *New European Driving Cycle* (NEDC).

Estes resultados foram comparados com valores obtidos experimentalmente no banco de ensaios, sendo obtidos valores muito aquém dos esperados, com uma relação de cerca de metade dos obtidos experimentalmente, mas ainda assim coerentes. Adicionalmente, foram retirados valores referentes à emissão de CO₂ que, comparativamente aos resultados obtidos para o consumo, são coerentes. Devido à falta de dados fornecidos para as emissões, não houve possibilidade de avaliar uma comparação entre estes parâmetros.

Palavras-chave: AVL CRUISE M, consumo de combustível, simulação, NEDC, WLTP

Abstract

The use of simulation tools allows the development of products in the automotive sector with less financial and time investment. It allows the reduction of the ecological footprint when developing different solutions, particularly with regard to pollutant emissions created by the production of prototypes and laboratory tests. In this project, a model was implemented in AVL CRUISE M, considering a simulation as similar as possible to the Volkswagen EOS with a 2.0 TDI diesel engine present in the ESTG Automotive Engineering Laboratory, using data from this vehicle in its modeling.

To carry out the modeling, it was necessary to learn the software, resorting to the creation of a tutorial with a detailed explanation of how it works, for the intended objective. After modeling the vehicle, the simulation was then carried out considering the selected driving cycle. The results obtained were evaluated regarding fuel consumption for the New European Driving Cycle (NEDC) driving cycle.

These results were compared with values obtained experimentally on the test bench, with values far below those expected, with a ratio of approximately half of those obtained experimentally, but still coherent. Additionally, values relating to CO₂ emissions were extracted, which compared to the results obtained for consumption, are consistent. Due to the lack of data provided for emissions, it was not possible to evaluate a comparison of these parameters.

Keywords: AVL CRUISE M, fuel consumption, simulation, NEDC, WLTP

Índice

ORIGINALIDADE E DIREITOS DE AUTOR	III
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto e motivação	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura do relatório	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Introdução ao Software	3
2.1.1. Simulação vs métodos experimentais	5
2.2. Impactos ambientais dos automóveis	7
2.3. Ciclos de condução	8
2.3.1. NEDC (New European Drive Cycle)	9
2.3.2. WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure)	11
3. UTILIZAÇÃO SOFTWARE	13
3.1. Modelo do veículo	15
3.1.1. Condições veículo	19
3.1.2. Motor	22
3.1.3. Embraiagem / Conversor de binário	24

3.1.4.	Caixa de velocidades	25
3.1.5.	Transmissão Final e Diferencial	25
3.1.6.	Travões e Rodas	26
3.1.7.	Ligações Data Bus	28
3.2.	Simulação	29
3.3.	Resultados	31
4.	CASO DE ESTUDO	33
4.1.	Veículo a modelar	33
4.1.1.	Propriedades físicas do Veículo	33
4.1.2.	Motor	34
4.1.2.1.	Obtenção do mapa de consumos	35
4.1.3.	Caixa de Velocidades e Diferencial	36
4.2.	Condições da simulação	37
5.	APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	38
5.1.	Resultados Práticos Fornecidos para comparação	38
5.2.	Resultados Software	40
5.2.1.	Resultados para emissões de CO ₂	41
5.3.	Discussão de Resultados	43
6.	CONCLUSÕES	45

Lista de figuras

Figura 2.1: Imagem representativa da modelação de célula de hidrogénio: (A) Subsistema de Ânodo, (B) Subsistema de cátodo e (C) Subsistema de gestão térmica (Micoli, Coppola, & al, 2024)	4
Figura 2.2: Imagem representativa da modelação de célula de hidrogénio simplificada (AVL, 2024)	4
Figura 2.3: Imagem representativa da modelação de baterias (AVL, 2024)	5
Figura 2.4: Localização dos geradores, <i>Wizards</i> e exemplos na barra de tarefas.	5
Figura 2.5: Gráficos de comparação de velocidade e consumos entre AVL e valores práticos reais (Srinivasan & M, 2009).....	6
Figura 2.6: Gráfico do Teste NEDC completo com as fases urbana e extraurbana... 10	
Figura 2.7: Gráfico da fase de condução urbana (UDC) do ciclo NEDC (DieselNet, 2013).....	10
Figura 2.8: da fase de condução urbana (UDC) do ciclo NEDC (DieselNet, 2013).. 11	
Figura 2.9: Gráfico completo do Teste de WLTP com as 4 fases indicadas	11
Figura 3.10: Menu inicial AVL CRUISE M.....	13
Figura 3.11: Secção “ <i>Home</i> ”	14
Figura 3.12: Secção “ <i>Simulation</i> ” (AVL, 2024)	14
Figura 3.13: Secção “ <i>Results</i> ” (Nemes, Pálfi, & Hajdu, 2020)	15
Figura 3.14: Modelo AVL do veículo exemplo	15
Figura 3.15: Modelo para mobilidade a Hidrogénio à esquerda e Modelo para mobilidade elétrica à direita, (AVL, 2024).....	16
Figura 3.16: <i>Tab</i> de componentes 1	16
Figura 3.17: <i>Tab</i> de componentes 2	17
Figura 3.18: <i>Tab</i> de componentes 3	17
Figura 3.19: Aba para mudança de unidades de parâmetros.....	18
Figura 3.20: Parâmetros físicos do veículo	19
Figura 3.21: Definições Cockpit	19
Figura 3.22: Ícones das condições de condução	20
Figura 3.23: Escolha do perfil de condução (esquerda), Perfis de condução existentes no programa (direita).....	20

Figura 3.24: Escolha do perfil do condutor pretendido para a simulação (esquerda) e Perfis de condutor do sistema.....	20
Figura 3.25: Escolha do ambiente da simulação	21
Figura 3.26: Definição da temperatura ambiente e humidade	21
Figura 3.27: Definição da densidade do ar.....	21
Figura 3.28: Definição da altitude.....	21
Figura 3.29: Tabela de input/output no monitor	22
Figura 3.30: Menu para o elemento Mapa de Motor representativo do motor do veículo	22
Figura 3.31: Mapa de consumos do motor (2)	23
Figura 3.32: Curvas de binário a carga 0% (esquerda) e carga 100% (direita) (2)....	23
Figura 3.33: Escolha tipo de combustível (1), Definição da velocidade de ralenti (3), Definição de capacidade, número de cilindros e limites de rotação do motor (4)	24
Figura 3.34: Curvas para definição de um conversor de binário em função da relação de velocidade	24
Figura 3.35: Propriedade da embraiagem (esquerda), curva para definição de força de pressão em função do curso do pedal de embraiagem (direita).....	25
Figura 3.36: Definição das relações da caixa de velocidades e da sua eficiência.....	25
Figura 3.37: Definição de parâmetros da transmissão final	26
Figura 3.38: Definição de parâmetros do diferencial.....	26
Figura 3.39: Definição de parâmetros dos travões para a dianteira (esquerda) e traseira (direita)	27
Figura 3.40: Definição do raio de rolamento	27
Figura 3.41: Propriedades da roda	28
Figura 3.42: Seleção da variável desse primeiro elemento	28
Figura 3.43: Associação da variável do primeiro elemento à variável correspondente no segundo elemento	29
Figura 3.44: Definições do tempo e tipo de simulação a utilizar e seleção dos valores de incrementos do solver	29
Figura 3.45: Seleção do tipo de apresentação das variáveis pretendidas na simulação	30
Figura 3.46: Adição de variáveis à curva de simulação.....	31
Figura 3.47: Opções para apresentação de resultados no separador de Resultados...	31
Figura 3.48: Procedimento para seleção de variáveis no separador de Resultados ...	32

Figura 4.49: Volkswagen EOS (AutoISO, 2023)	33
Figura 4.50: Mapa de consumos do motor no CRUISE M	35
Figura 4.51: Curva de Binário a carga máxima do motor (esquerda) e binário de arrasto do motor (direita) em CRUISE M	36
Figura 4.52: Perfil do teste de emissões retirado do CRUISE M	37
Figura 5.53: Gráfico de consumo instantâneo para o ciclo NEDC completo (Bastos, 2019).....	38
Figura 5.54: Gráfico de consumo instantâneo para uma repetição da fase urbana para o ciclo NEDC (Bastos, 2019)	39
Figura 5.55: Gráfico de consumo instantâneo para a fase extraurbana para o ciclo NEDC (Bastos, 2019).....	39
Figura 5.56: Gráfico de consumo instantâneo de combustível em função do tempo para o ciclo NEDC retirado do software.	40
Figura 5.57: Gráfico de consumo instantâneo para uma repetição da fase urbana para o ciclo NEDC	41
Figura 5.58: Gráfico de consumo instantâneo para a fase extraurbana para o ciclo NEDC	41
Figura 5.59: Gráfico de emissões de CO ₂ para a fase urbana para o ciclo NEDC.....	42
Figura 5.60: Gráfico de emissões de CO ₂ para a fase extraurbana para o ciclo NEDC	43

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Tabela de limite de poluente em veículos ligeiros, (Martins, 2013).....	7
Tabela 2.2: Tabela classes para teste WLTP (DieselNet, 2019)	12
Tabela 2.3: Tabela de parâmetros analisados no teste WLTP para as diversas fases da classe 3b (DieselNet, 2019)	12
Tabela 3.4 Alguns comandos do Software para alteração de posição ou orientação de elementos	18
Tabela 4.5: Tabela de propriedades físicas do veículo a modelar (carinf.com, s.d.) .	34
Tabela 4.6: Tabela de propriedades físicas e mecânicas do motor do veículo a modelar (carinf.com, s.d.).....	34
Tabela 4.7: Tabela das relações de caixa de velocidades do veículo estudado (workshop-manuals.com, s.d.).....	36
Tabela 4.8: Tabela dos valores de consumo obtidos em simulação e fornecidos para comparação em Kg/100km (Bastos, 2019).....	43

Lista de siglas

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
EUDC	Extra Urban Driving Cycle (Ciclo de Condução Extraurbano)
HC	Hidrocarbonetos
HEV	Hybrid Electric Vehicles (Veículo Elétricos Híbridos)
NEDC	New European Drive Cycle (Novo Ciclo de Condução Europeu)
NO _x	Óxidos de Azoto
PHEV	Plugin Hybrid Electric Vehicles (Veículo Elétricos Híbridos Plug-In)
PM	Partículas
PMR	Power to Mass Ratio (Relação Potência-Massa)
RDE	Real Driving Emissions (Emissões Reais de condução)
RPM	Rotações por minuto
UDC	Urban Driving Cycle (Ciclo de Condução Urbano)
UE	União Europeia
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

As evoluções dos regulamentos para controlo de emissões levam a que seja necessário a utilização de novas tecnologias para o desenvolvimento de automóveis. Inclui testes mais completos, rigorosos, com alta taxa de repetibilidade e com casos de falha de certos componentes como, por exemplo, sensores. Uma forma mais simples e menos dispendioso dos efetuar é recorrendo a software de simulação computacional, como no caso do AVL CRUISE M. Este passa a ser uma ferramenta importante e indispensável para a indústria automóvel. A função desta ferramenta é simular um modelo de um veículo para determinadas condições estabelecidas previamente. Tem diversas vantagens como a redução de tempos de desenvolvimento comparados com técnicas tradicionais de engenharia. A redução de custos em prototipagem por não haver a necessidade de produto físico para desenvolvimento como em técnicas tradicionais também é bastante apelativo à sua utilização em projetos de diversas escalas. Permite que, com todos os dados do veículo, seja utilizado na falta de banco de ensaios de rolos para obtenção de diversos parâmetros. Além de todas estas, ainda é possível a comparação de diferentes tipos de motorizações e combustíveis para o mesmo veículo. Comparações entre veículos a gasolina e gasóleo ou entre gasolina e motorização elétrica de desempenho semelhante são algumas das possibilidades.

1.2. Objetivos

Este projeto tem como âmbito uma apresentação e análise sobre a utilização do módulo de mobilidade CRUISE M do software de simulação AVL na forma de um tutorial para aprendizagem, visto que é a primeira vez a sua utilização na ESTG. Também é pretendida uma comparação de dados obtidos pela utilização do banco de ensaios do Laboratório de Engenharia Automóvel da ESTG para ciclos de condução estabelecidos. Os objetivos deste Projeto passam na construção e simulação do modelo de um Volkswagen EOS com motor turbo-diesel 2.0 TDI e comparação dos resultados do consumo de combustível obtidos com dados práticos obtidos experimentalmente em banco de ensaios. Além deste, outro objetivo pretendido é a comparação entre duas motorizações com a mesmo desempenho, mas de combustíveis diferentes.

1.3. Estrutura do relatório

Este relatório é composto por 6 capítulos. Começando pela introdução, o motivo que levou ao desenvolvimento deste projeto e os objetivos a cumprir. Seguido pelo segundo capítulo, responsável pela apresentação de fundamentos teóricos necessários à elaboração do relatório. Este consiste na apresentação dos diferentes ciclos de homologação de veículos que são a ferramenta base para comparação entre as simulações e os testes laboratoriais. É seguida por uma apresentação do software de simulação AVL, de algumas das vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de técnicas em comparação com as tradicionais. A introdução dos testes a realizar também é realizada neste capítulo. No terceiro é apresentada a utilização do software utilizado com a elaboração de um tutorial detalhado. O quarto são apresentados os dados práticos, que representam o veículo a utilizar para a construção e simulação do modelo para o Volkswagen EOS. No capítulo cinco são apresentados, analisados e comparados os resultados de consumo obtidos através do modelo simulado em AVL e do banco de ensaios. No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas no decorrer do projeto.

2. Revisão bibliográfica e fundamentos teóricos

2.1. Introdução ao Software

O AVL CRUISE M é um software de simulação de diferentes conceitos de mobilidade para veículos. A sua funcionalidade surgiu na necessidade de fornecer uma alternativa ao desenvolvimento tradicional de veículos. Podem ser integrados em conjunto num modelo virtual sem necessidade de prototipagem ou qualquer modelo físico. O software apresentado neste capítulo permite modelar e simular com detalhe às principais áreas físicas no veículo mediante uma vasta biblioteca de componentes. Esta inclui sistemas termodinâmicos, de circuitos elétricos, de ar condicionado e uma variedade de funções para controlá-los. O software possibilita alterações de forma fácil e individual para cada elemento de modo a obter um modelo o mais ajustado à realidade possível. Permite ainda que modelos criados em outras plataformas de modelação sejam importados, acoplados e simulados como parte de um modelo CRUISE M. Os métodos de cálculo disponibilizados são confiáveis, permitindo um bom ponto de partida de avaliação para o modelo. Com esta simulação é possível obter diversos tipos de resultados, como por exemplo, o consumo de combustível, as emissões ou rotação do motor em cada instante (AVL, 2024).

Há possibilidade de, por exemplo, modelar veículos propulsionados a Hidrogénio com todos os seus elementos relativos à célula de hidrogénio, como os ânodos, cátodos e sistema de gestão térmica, Figura 2.1 (Micoli, Coppola, & al, 2024). É possível fazer testes em diferentes condições de altitude ou temperatura extremas, que por métodos experimentais será pouco prático e bastante dispendioso, Figura 2.2.

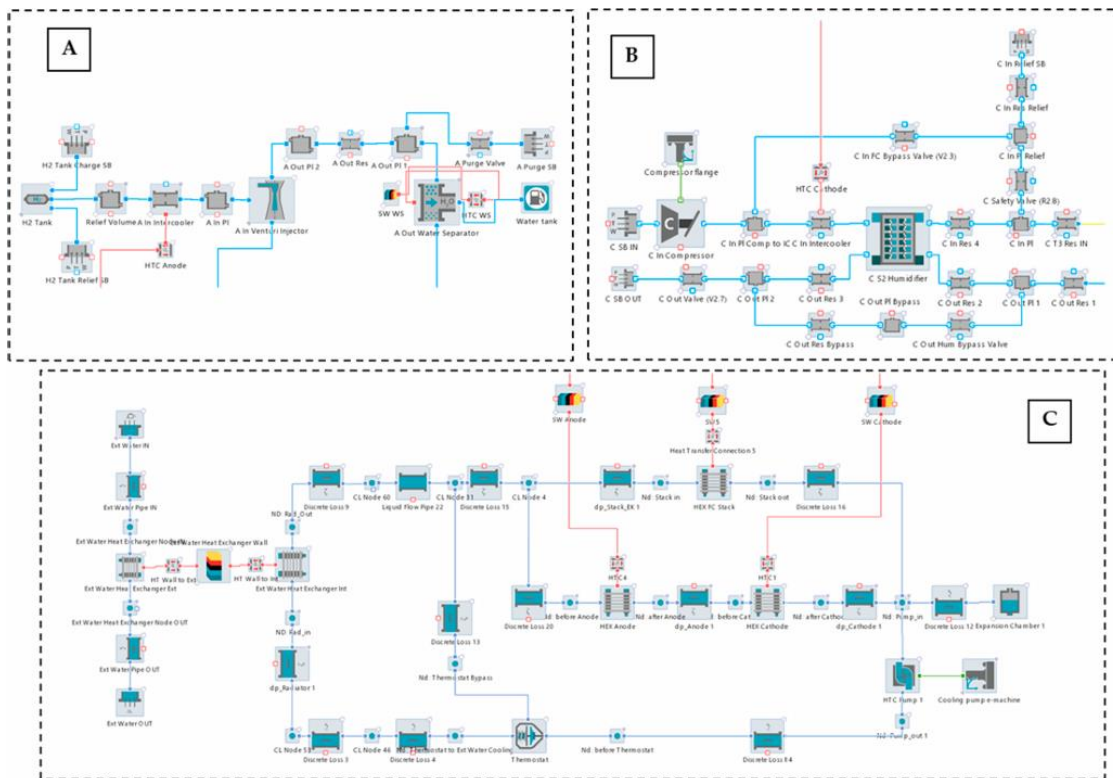


Figura 2.1: Imagem representativa da modelação de célula de hidrogénio: (A) Subsistema de Ânodo, (B) Subsistema de cátodo e (C) Subsistema de gestão térmica (Micoli, Coppola, & al, 2024)

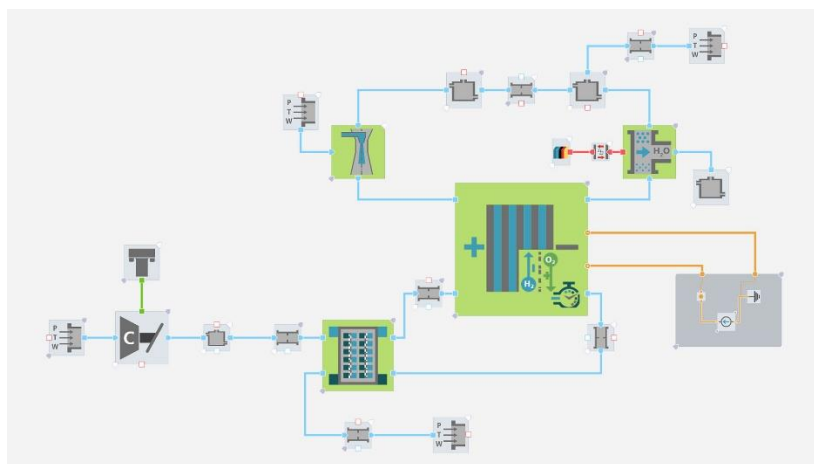


Figura 2.2: Imagem representativa da modelação de célula de hidrogénio simplificada (AVL, 2024)

Além destes testes, apresenta ainda a capacidade de modelação de veículos eléctricos com baterias de diversos tipos e escalas. A biblioteca do software contém alguns exemplos disponíveis, que englobam as ligações térmicas, eléctricas e mecânicas para cada célula individual. Este software permite opções de configuração extensa para os eléctrodos. Este software permite opções de configuração extensa para os materiais dos eléctrodos. Permitindo a análise da sua gestão térmica e estratégias de carregamento rápido, Figura 2.3 (AVL, 2024).

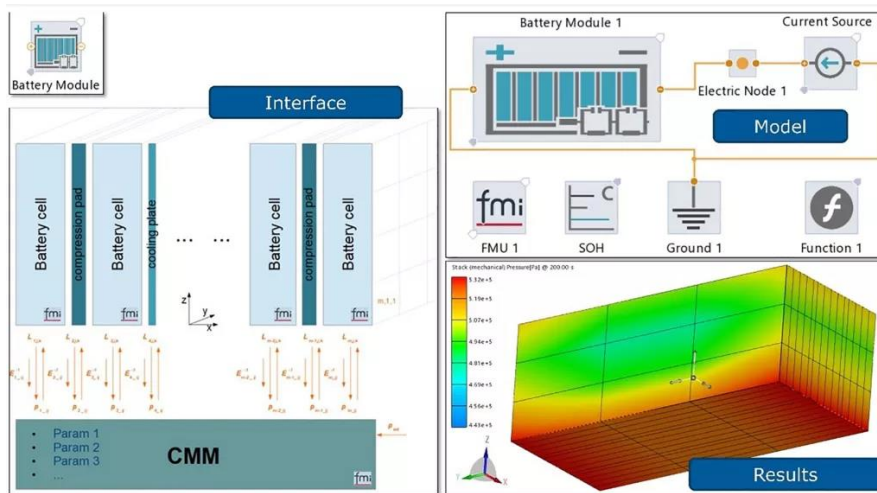


Figura 2.3: Imagem representativa da modelação de baterias (AVL, 2024)

Caso seja proveitoso, estão disponíveis funções de auxílio à modelação. Os *Generators* que criam modelos ou mapas gerais para diversas áreas, ou os *Wizards* que ajudam na parametrização de um elemento ou subsistema de elementos. Para recolha de informação e ajuda é possível recorrer a uma página que contém exemplos para diversos tipos de projetos como de veículo elétricos ou de combustão interna através do ícone *Examples*, Figura 2.4. É ainda dividido em subcapítulos para diferentes sistemas, como o motor, sistema de transmissão ou sistemas de arrefecimento (AVL, 2024).

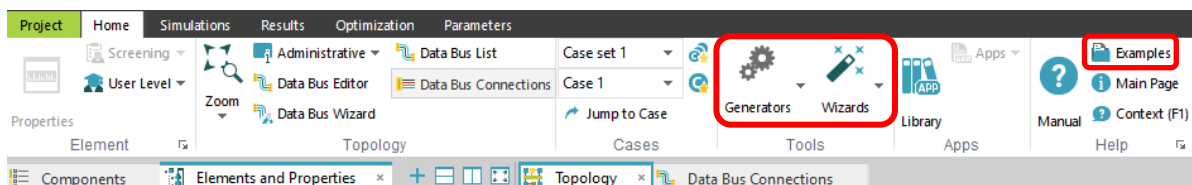


Figura 2.4: Localização dos geradores, *Wizards* e exemplos na barra de tarefas.

2.1.1. Simulação vs métodos experimentais

A utilização de software de simulação para teste e desenvolvimento de certos elementos ou conjuntos de elementos para o veículo automóvel é mais vantajosa que os métodos tradicionais utilizados na indústria para uma fase inicial de desenvolvimento. Uma das principais vantagens é permitir uma alta repetibilidade, obtenção de dados consistentes e precisos, algo que não é possível com tão elevado grau por meio de testes físicos com prototipagem, Figura 2.5 (Srinivasan & M, 2009). Isto significa não haver interferência externa ou problema técnico associado à utilização de um veículo protótipo real.

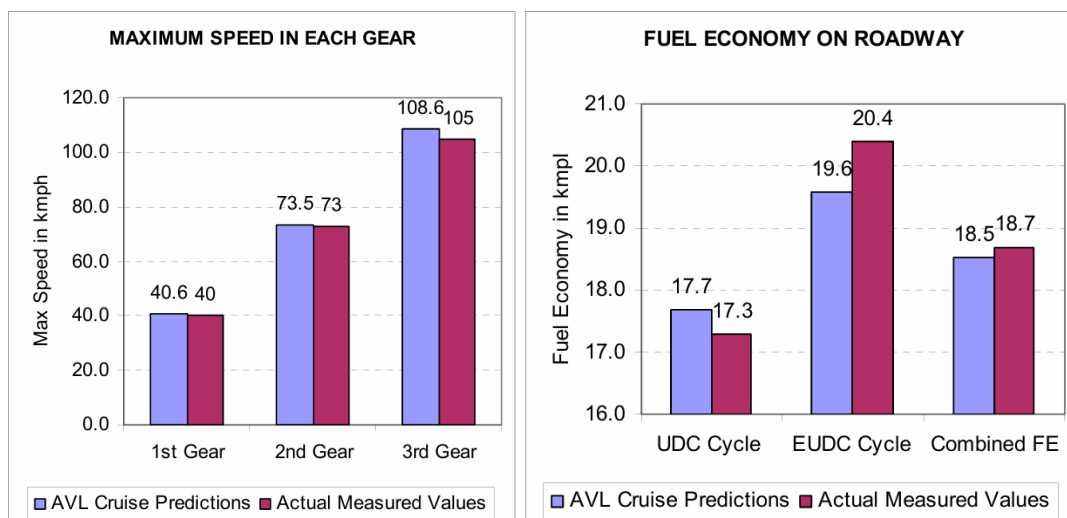


Figura 2.5: Gráficos de comparação de velocidade e consumos entre AVL e valores práticos reais (Srinivasan & M, 2009)

Além, além disto, possibilita a redução dos custos de desenvolvimento, por requerer menos investimento em infraestrutura, equipamento e mão de obra e conseqüentemente a não necessidade de um produto físico para desenvolver. O tempo de desenvolvimento é encurtado porque virtualmente é possível fazer mais iterações em menos tempo para diferentes cenários e permite uma mais rápida identificação dos problemas (Budinski, 2023). A tendência crescente delimitar o nível de emissões, leva a que demore mais tempo para fazer os ajustes necessários aos parâmetros de funcionamento do automóvel através de métodos de modelação tradicionais. A utilização de software permite uma grande redução no seu tempo e custos adicionais associados (Lv, Ling, & al, 2021).

Contudo, a simulação é limitada pela qualidade dos modelos utilizados, o que pode afetar os resultados obtidos. A necessidade de ajuste constante ao modelo com base em dados obtidos experimentalmente para garantir a sua confiabilidade também é um ponto de atenção (Budinski, 2023) (Cioroianu & al, 2017).

Em casos de desenvolvimento de condução autónoma, testes no mundo real podem ter riscos elevados para os transeuntes e de danos físicos tanto para o veículo de protótipo como para o cenário utilizado. Neste caso, não existe qualquer risco de segurança ao efetuar estes testes através de simulação. Além disto, permite uma maior gama de testes, como em caso de sensores ou outro equipamento em mau funcionamento, que proporciona um estudo do comportamento do veículo autónomo para estas condições (Budinski, 2023).

2.2. Impactos ambientais dos automóveis

Os veículos ligeiros de passageiros com motor de combustão interna são o meio de transporte mais dominante na sociedade, com 82,9% do transporte terrestre na EU (European Union, 2020). Corresponde a uma fonte de grande dimensão para emissão de gases de escape, como o CO₂ para a atmosfera. Isto acontece porque a combustão no motor nem sempre é perfeita, existindo sempre alguns gases provenientes desta que saem pelo escape para a atmosfera.

De modo a contrariar estas emissões com o aumento de veículos automóveis em circulação nas estradas, foram introduzidas as normas EURO pela União Europeia. Estas ditam o limite de emissões permitidas por cada veículo tendo em conta umas certas condições definidas. As diretivas são diferentes perante a classe em que se enquadra o veículo, pesado ou ligeiro. Uma destas é o ciclo de emissões que tem o intuito de representar a condução diária dos condutores. Os gases referenciados com limites, são Monóxido de Carbono (CO), partículas (PM), Hidrocarbonetos (HC), óxidos de azoto (NO_x) e, mais recentemente, o dióxido de carbono (CO₂), Tabela 2.1, (Bastos, 2019).

Tabela 2.1: Tabela de limite de poluente em veículos ligeiros, (Martins, 2013)

Norma	Ano	CO	NO _x	HC + NO _x	PM	CO ₂
EURO 1	1992	2,72	-	0,97	0,19	-
EURO 2	1997	1	-	0,7	0,08	-
EURO 3	2000	0,64	0,5	0,56	0,05	-
EURO 4	2005	0,5	0,25	0,3	0,025	-
EURO 5	2008	0,5	0,2	0,23	0,0	140
EURO 6/6c	2014/2017	0,5	0,08	0,17	0,0	120

Depois da introdução da norma EURO 6, esta já teve alterações impostas em 2017 com a designação de EURO 6c. Esta introduz a alteração do tipo de teste utilizado para obter resultados de gases de escape, o WLTP, permanecendo os limites de emissões inalterados. Atualmente é a norma EURO 6d que está em vigor desde 2020, e introduz o método de medição real das emissões (*Real Driving Emissions* ou RDE) que consiste na realização de testes de emissões em estrada que posteriormente são comparados com resultados obtidos em

laboratório (WLTP). Prevê-se a entrada da norma 7 nos próximos anos. Esta dita que terá de haver uma redução de 100% nas emissões de CO₂ para veículos ligeiros e redução significativa dos limites de NO_x no caso de camiões e autocarros. Leva à proibição de venda de veículos ligeiros com motores de combustão interna visto que, fisicamente é impossível o alcance da meta pretendida, (Conselho da União Europeia, 2024).

A utilização de software de simulação computacional, como o AVL CRUISE M, leva uma forma mais fácil e menos dispendiosa de realizar os testes necessários ao desenvolvimento e homologação de veículos, por não necessitar de protótipos. A sua construção e o seu uso para realização dos testes pretendidos assumem uma emissão de poluentes considerável que poderia não existir. Consequentemente, leva a uma menor emissão de poluentes para a atmosfera que, aos olhos da EU, é um passo no caminho certo para a neutralidade de emissões pretendida até 2050. As normas apresentadas na Tabela 2.1 têm evoluído para esta neutralidade de carbono ao longo dos últimos anos. Têm também restringido a utilização certas fontes de energia, quer na alimentação das unidades fabris, como na produção de componentes. Fontes alternativas, como energia eólica ou solar, auxiliam à redução da pegada ecológica de uma fabricante automóvel por utilizarem a força do vento e intensidade do sol, respetivamente, para produção de energia elétrica (European Union, 2020).

Os veículos elétricos evoluem consideravelmente usufruindo desta limitação na progressão dos veículos de combustão interna e também da sua simplicidade de componentes físicos e de movimento mecânico. Isto leva a que no desenvolvimento de um veículo com este tipo de motorização, a utilização de simulação seja mais benéfica relativamente a técnicas tradicionais. O funcionamento deste baseia-se em computadores e sensores, que se revelam muito complicados de fazer testes com prototipagem, pelo menos numa fase inicial, recorrendo a software de simulação. A eletrificação é um passo muito importante para cumprir o proposto na norma EURO 7 (European Union, 2020).

2.3. Ciclos de condução

Para fazer a homologação de um veículo no mercado é necessária a realização de um teste de condução que permita a avaliação, principalmente, das emissões de poluentes e consumos de combustível do veículo, em contexto urbano, extraurbano e misto. Até recentemente, o ciclo utilizado para este teste era o NEDC (*New European Drive Cycle*) que apesar de estar em vigor há bastantes anos já não reflete os estilos de condução na atualidade. De modo a atualizar

este processo, foi introduzido em setembro de 2017, o WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure*) que permite uma melhor interpretação da condução no dia a dia. Este considera uma maior velocidade máxima e maior distância percorrida relativamente ao ciclo anterior (ACEA, 2017). No caso de um veículo homologado em regime de NEDC, caso seja convertido para ciclo WLTP estas têm tendência a aumentar ligeiramente por não estar otimizado a esse ciclo. Nas subsecções abaixo são apresentados estes dois ciclos de condução na sua duração em tempo e distância e as partes integrantes dos mesmos.

Os ciclos de homologação também têm de ser aplicados a veículos de outros tipos de mobilidade, como veículos elétricos, híbridos ou de célula de combustível de hidrogénio. No caso de elétricos puros, como não libertam emissões de CO₂ pelo escape, são considerados outros indicadores de desempenho ambiental. Estes são a autonomia elétrica pura para carga máxima ou tanque de hidrogénio cheio e a eficiência energética geral do veículo.

Para veículos de mobilidade Híbrida, sejam eles Veículo Elétricos Híbridos (HEV) ou Veículos Elétricos Híbridos *Plug-In* (PHEV), o cálculo dos níveis de CO₂ obtidos tem um processo distinto com considerações os diferentes modos de operação destes (S. Tsiakmakis, 2017). Estes processos não são abordados no âmbito deste projeto.

2.3.1. NEDC (New European Drive Cycle)

O ciclo de condução apresentado permite avaliar o consumo de combustível e nível de emissões de poluentes para veículos ligeiros e tem o nome de NEDC (*New European Drive Cycle*). Este ciclo para homologação foi introduzido nos anos 80 para melhorar o processo, visto que anteriormente os veículos precisavam de estar num ambiente entre 20 e 30 °C durante 6h antes do teste e estar ao ralenti durante 40 segundos. A última atualização do NEDC foi implementada em 1997 e utilizado até à introdução do seu sucessor. O seu tempo total de 1180 segundos, constituído por duas partes, totalizando 11 km de distância percorrida. Figura 2.6.

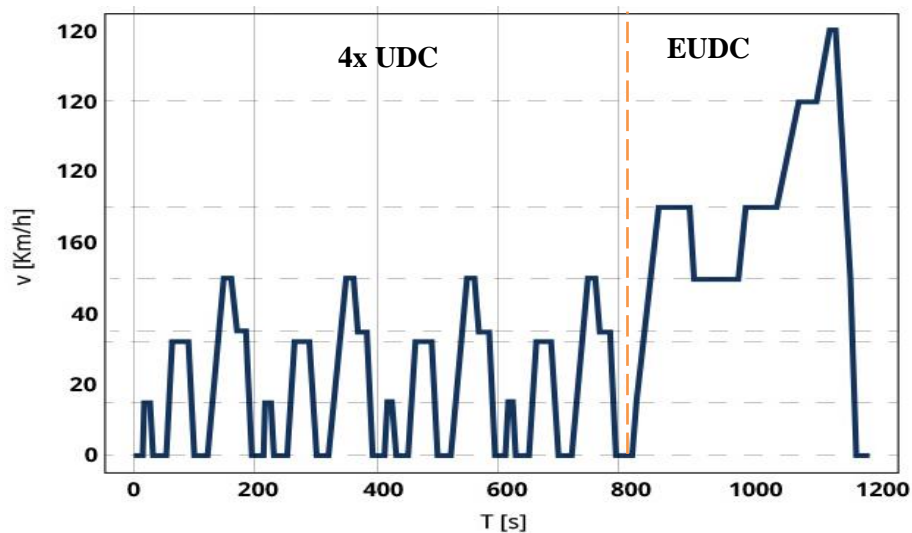


Figura 2.6: Gráfico do Teste NEDC completo com as fases urbana e extraurbana

A primeira parte consiste na repetição de quatro vezes um ciclo de condução urbano (UDC, *Urban Driving Cycle*) que representa uma condução citadinas com paragens e arranques frequentes num curto espaço de tempo. Isto traduz-se numa duração de cerca de 195 segundos por cada repetição percorrida, totalizando 780 segundos (cerca de 13 minutos). A sua velocidade máxima é 50 km/h e corresponde a aproximadamente 4 km, ao longo das quatro repetições, Figura 2.7 (DieselNet, 2013).

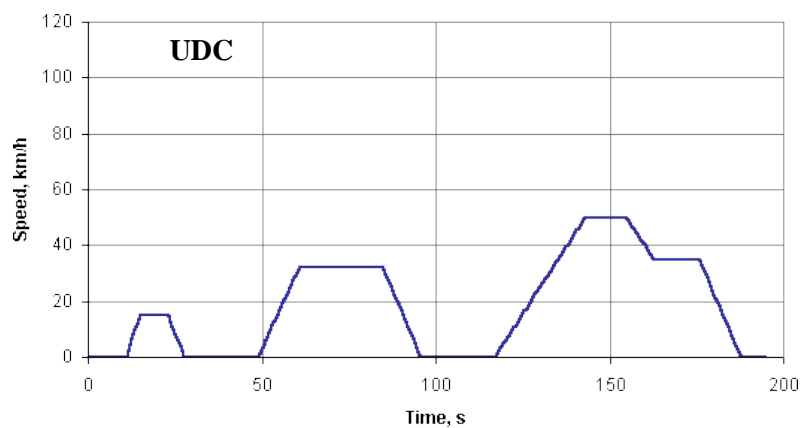


Figura 2.7: Gráfico da fase de condução urbana (UDC) do ciclo NEDC (DieselNet, 2013)

É seguida uma segunda parte, de condução extraurbana (EUDC, *Extra-Urban Driving Cycle*) equivalente à condução fora de cidades e de autoestrada, que é mais agressiva em termos de velocidades praticadas. A sua duração é 400 segundos e velocidade máxima de 120 km/h, correspondendo a aproximadamente 7 km, Figura 2.8 (DieselNet, 2013).

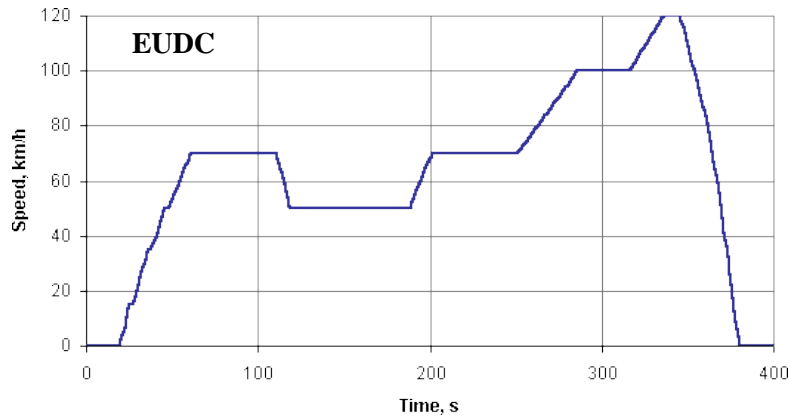


Figura 2.8: da fase de condução urbana (UDC) do ciclo NEDC (DieselNet, 2013)

2.3.2. WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure)

O ciclo WLTP foi introduzido em 2017 de modo a conseguir corresponder melhor às características de condução dos condutores e acompanhando as evoluções tecnológicas dos motores de combustão interna. Assim como o NEDC, este ciclo também é dividido em várias fases que simulam a condução em meio urbano (fase Baixa), em limites urbanos (fase Média), em meio extraurbano (fase Elevada) e condução equivalente à autoestrada (fase Muito Elevada), Figura 2.9 (DieselNet, 2019).

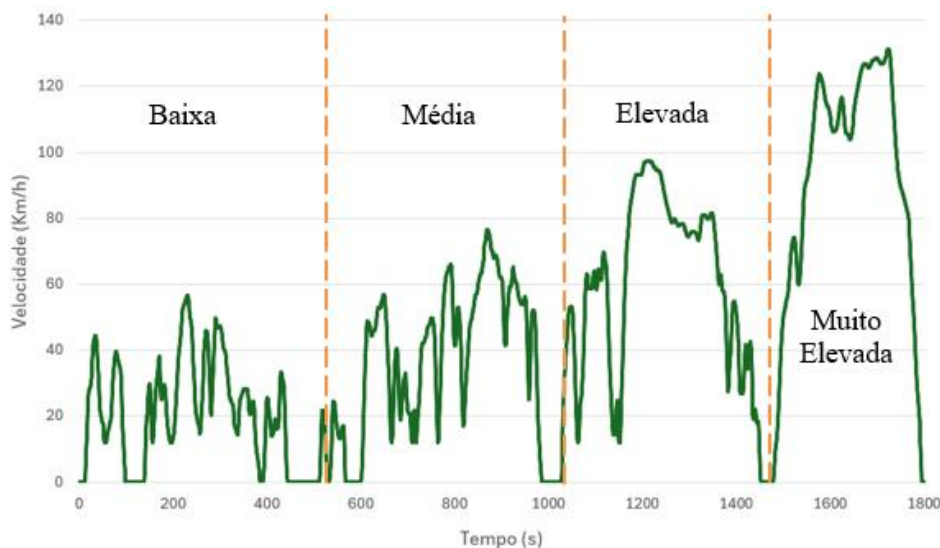


Figura 2.9: Gráfico completo do Teste de WLTP com as 4 fases indicadas

O ciclo tem uma duração total de 1800 segundos e tem em conta a Relação Potência/Peso (PMR) do veículo a analisar para determinar qual a classe mais adequada ao veículo, conforme apresentado na Tabela 2.2. Os valores das distâncias variam ligeiramente entre as classes 2,

3a e 3b, mas para classe 1 a distância percorrida é semelhante à do ciclo NEDC. No caso das classes 3a e 3b, estas são muito semelhantes, com ligeiros ajustes apenas nas fases Média e Elevada.

Tabela 2.2: Tabela classes para teste WLTP (DieselNet, 2019)

Categoria	PMR [W/kg]	Velocidade Máxima [km/h]	Sequencia de Fases de Velocidades
Classe 1	$PMR \leq 22$	-	Baixa + Media + Baixa
Classe 2	$22 < PMR < 34$	-	Baixa + Media + Elevada + Muito Elevada
Classe 3a	$PMR > 34$	< 120	Baixa + Media + Elevada + Muito Elevada
Classe 3b	$PMR > 34$	≥ 120	Baixa + Media + Elevada + Muito Elevada

Esta última classe é a mais utilizada para a maioria dos veículos por terem um PMR e velocidade máxima igual ou superior ao limite de 131 km/h requerido para o teste. Na Tabela 2.3 estão apresentados alguns dos parâmetros e os respetivos valores observados para as diferentes fases da classe 3b deste ciclo. Como se pode verificar, tanto as distâncias percorridas como as velocidades praticadas vão aumentando com a mudança das fases no decorrer do teste. No entanto, o tempo de duração para cada vai reduzindo, conforme apresentado na Figura 2.9.

Tabela 2.3: Tabela de parâmetros analisados no teste WLTP para as diversas fases da classe 3b (DieselNet, 2019)

Fase	Baixa	Media	Elevada	Muito Elevada	TOTAL
Duração [s]	589	433	455	323	1800
Distancia [m]	3095	4756	7162	8254	23266
Velocidade Máxima [km/h]	56,5	76,6	97,4	131,3	131,3
Velocidade Média [km/h]	18,9	39,5	56,7	92,0	46,5

3. Utilização Software

Neste capítulo estão apresentados os primeiros passos para a utilização do software, nomeadamente na criação, edição e guarda de um novo modelo. Após abrir o software no módulo CRUISE M, aparece um menu principal com as várias opções para o projeto. Para criar um ficheiro de projeto basta seleccionar “New” (1) e por baixo de “New Model” clicar em “CRUISE M” (2), Figura 3.10. Para guardar um ficheiro, seleccionar “Save As” (3) e escolher uma pasta e um nome onde o guardar. O ficheiro de projeto deverá estar guardado no disco C:, caso contrario não serão gerados ficheiros de simulação.

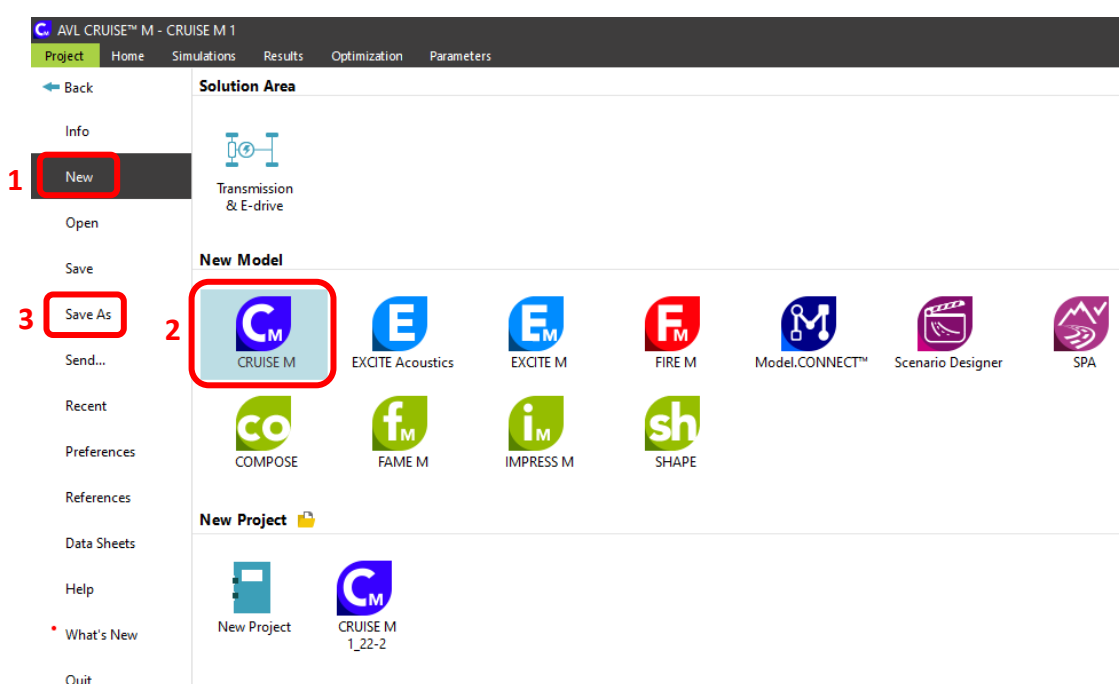


Figura 3.10: Menu inicial AVL CRUISE M

Este software divide-se em três secções principais. A primeira tem o nome de “Home”, e tem como função a construção e parametrização de todo o modelo de acordo com as especificações pretendidas através da utilização dos componentes apresentados à esquerda ligados entre si. Nesta, temos ainda, de auxílio à modelação, os *Generators* que podem gerar diversos tipos de modelos, como baterias ou motores. E *Wizards* que ajudam na parametrização de um elemento, como baterias ou motores inteiros, Figura 3.11.

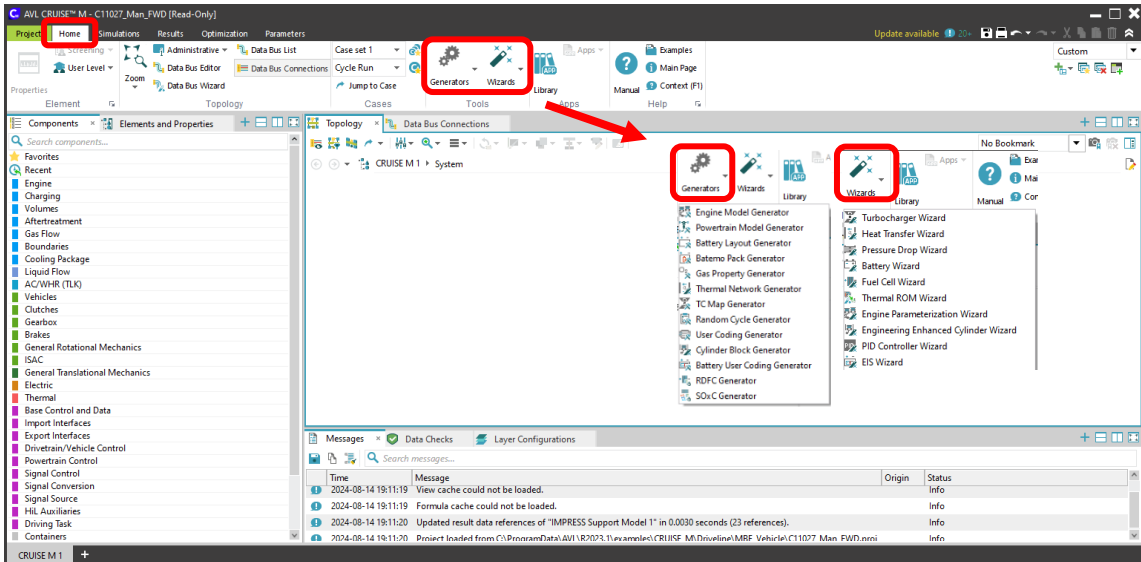


Figura 3.11: Secção “Home”

Seguido de “Simulation”, onde se efetua a simulação do modelo consoante as definições anteriores e é possível visualizar algumas curvas e tabelas obtidas para variáveis definidas, Figura 3.12. Permite ainda fazer simulação para mais que um cálculo, no caso de haver mais que um sistema no modelo.



Figura 3.12: Secção “Simulation” (AVL, 2024)

Por fim, a secção “Results” permite uma visualização mais detalhada de diversas variáveis ou valores de energia e potencia para diferentes componentes e comparação entre estas, Figura 3.13.



Figura 3.13: Seção “Results” (Nemes, Pálfi, & Hajdu, 2020)

3.1. Modelo do veículo

O modelo de um veículo é constituído por diversos elementos, representantes de cada componente do sistema de transmissão e alguns com a função de comandar o veículo, neste caso representados na parte superior do modelo, Figura 3.14. Os elementos estão ligados entre si via conexões mecânicas ou elétricas no caso de veículos elétricos ou híbridos sendo estas distinguidas por diferentes cores, Figura 3.15.

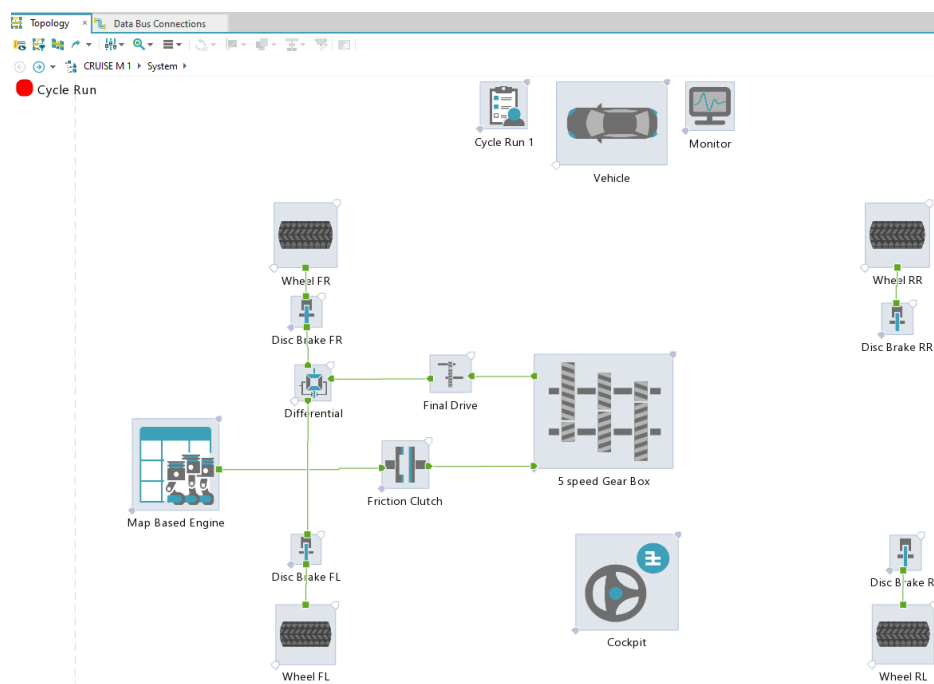


Figura 3.14: Modelo AVL do veículo exemplo

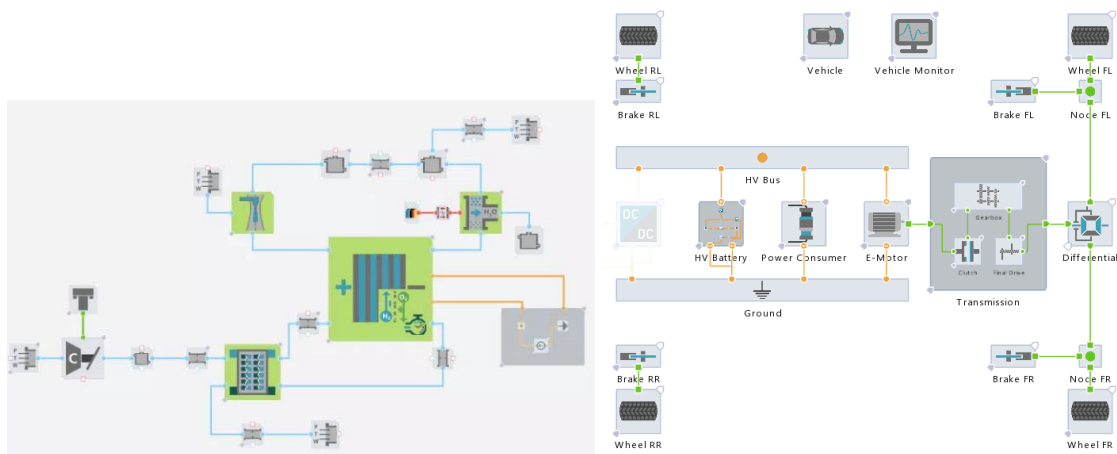


Figura 3.15: Modelo para mobilidade a Hidrogénio à esquerda e Modelo para mobilidade elétrica à direita, (AVL, 2024)

Para simplificar a procura dos elementos, na “tab” de *Components* são organizados em diversos grupos indicativos do tipo de componente que representa no modelo (*Clutches* inclui *Clutch* e *Torque Converter*, etc.), Figura 3.16 a 3.18.

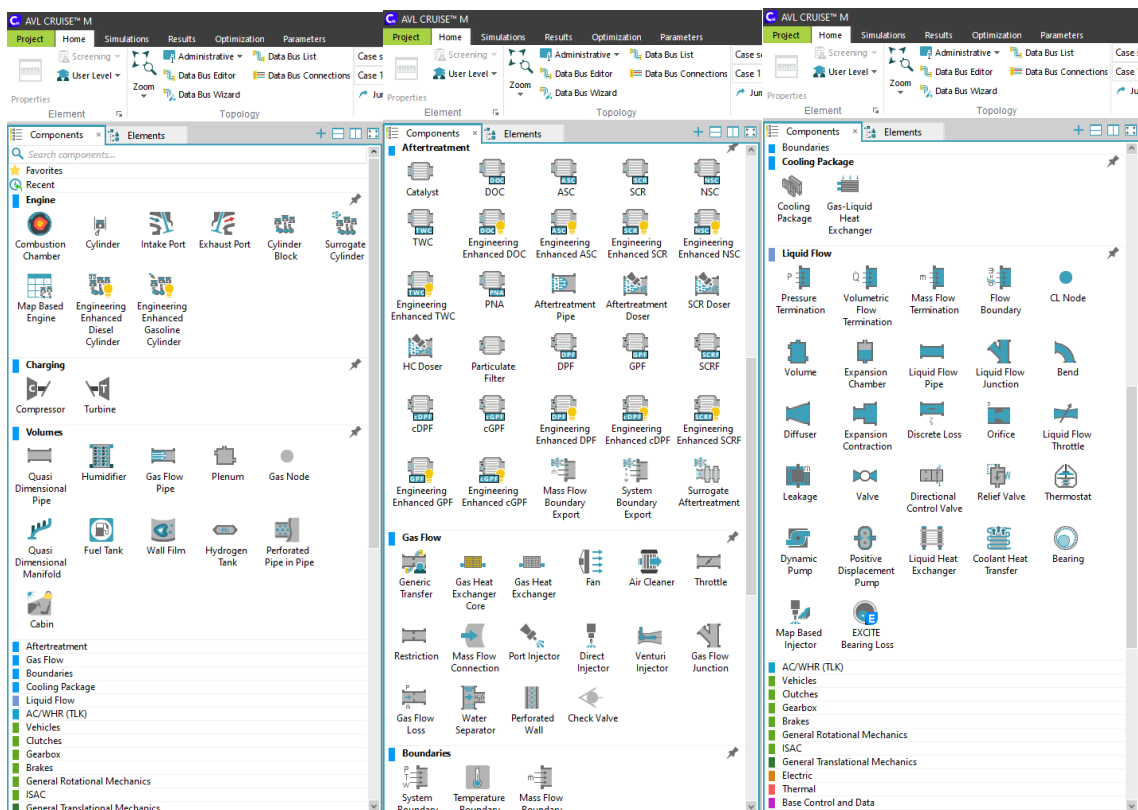


Figura 3.16: Tab de componentes 1

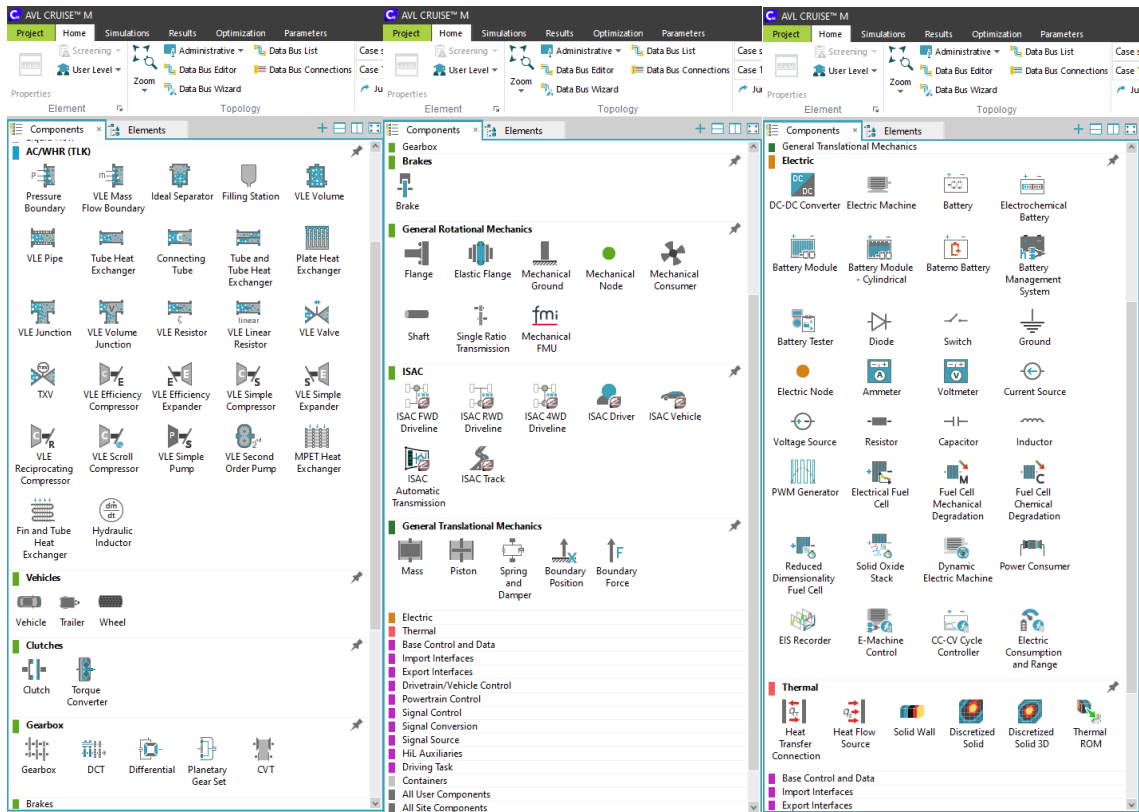


Figura 3.17: Tab de componentes 2

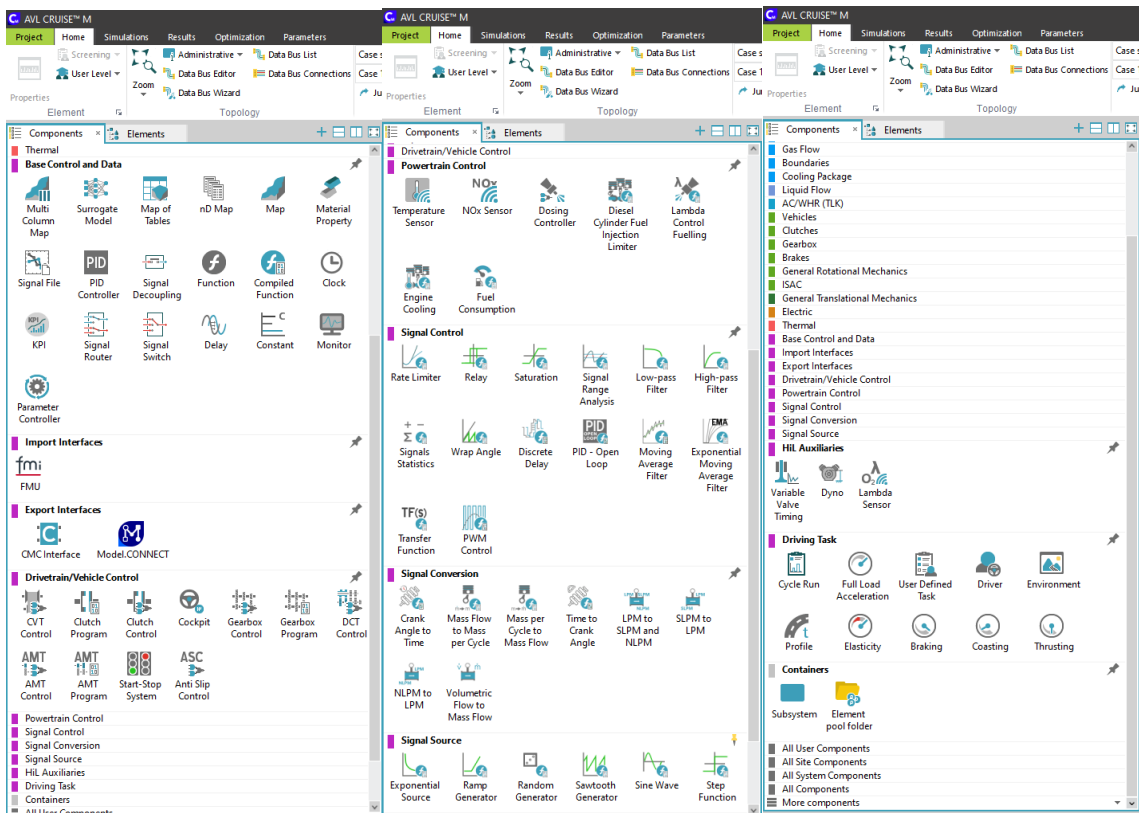


Figura 3.18: Tab de componentes 3

Para a criação de um modelo do veículo é necessária a disposição e conexão dos diversos blocos representativos dos seus elementos, arrastando-os para o plano. Após a conexão entre os elementos é feita a sua definição, apresentada nos seguintes subcapítulos. Os elementos apresentados mais acima na imagem como representante do modelo têm como funcionalidade estabelecer as condições de condução (*Cycle Run*), fazer a simulação dos pedais do veículo (*Cockpit*), definir as propriedades físicas do veículo (*Vehicle*) e as variáveis a apresentar em simulação (*Monitor*), Figura 3.14. É possível alterar as dimensões e orientação dos elementos via utilização dos botões do rato ou em conjunto com elementos do teclado, Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Alguns comandos do Software para alteração de posição ou orientação de elementos

Nome	Comando
Mover blocos	Botão direito do rato
Rodar blocos	Ctrl + R ou Ctrl + L
Zoom	Scroll
Adicionar pontos de ligação	Ctrl + carregar num ponto existente
Remover pontos de ligação	Ctrl + Shift + carregar num ponto existente
Mover pontos de ligação	Shift + carregar num ponto existente

Os parâmetros de modelação podem ser definidos em diversas unidades ou convertidos entre si, dependendo da preferência do utilizador ou da sua necessidade. Para isto, basta pressionar por cima da unidade para aparecerem todas as opções disponíveis, Figura 3.19.

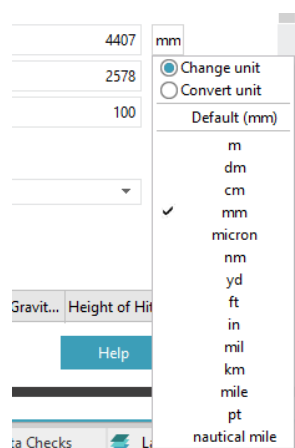


Figura 3.19: Aba para mudança de unidades de parâmetros

3.1.1. Condições veículo

Além dos elementos normalmente constituintes de um veículo, neste programa são necessários outros que correspondem a funções que estão apresentadas a seguir. As dimensões, peso do veículo e coeficiente de aerodinâmica têm de ser definidas no elemento *Vehicle*, visto que estes parâmetros influenciam o seu comportamento, Figura 3.20.

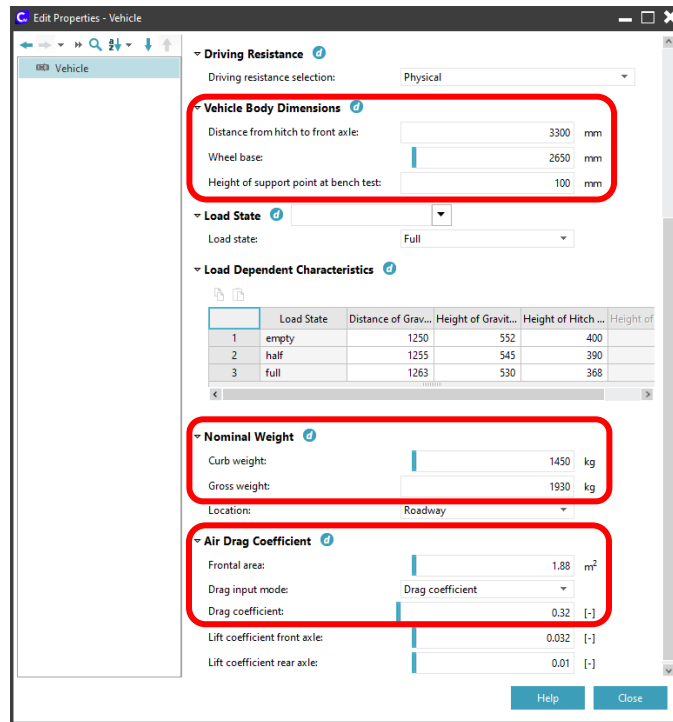


Figura 3.20: Parâmetros físicos do veículo

O comportamento dos controlos do veículo é definido no *Cockpit* através das curvas de pedal de acelerador, travão e embraiagem, que no caso a estudar são apresentadas com progressão linear com dois pontos como forma de simplificar e por não ser encontrada essa informação. Além destas curvas, ainda é possível definir o número de relações para a frente e à retaguarda, Figura 3.21.

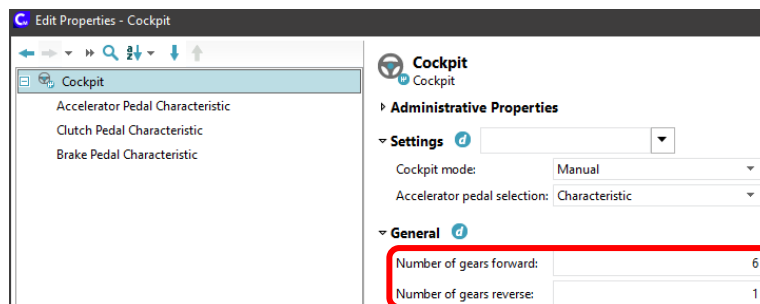


Figura 3.21: Definições Cockpit

As condições de condução são definidas dentro do elemento *Cycle Run* pelas 3 condições seguintes, Figura 3.22. O perfil de condução (*Profile*) permite utilizar um ciclo de condução já estabelecido como o WLTP, UDC ou NEDC, além destes é possível também importar um ciclo personalizado, Figura 3.23.

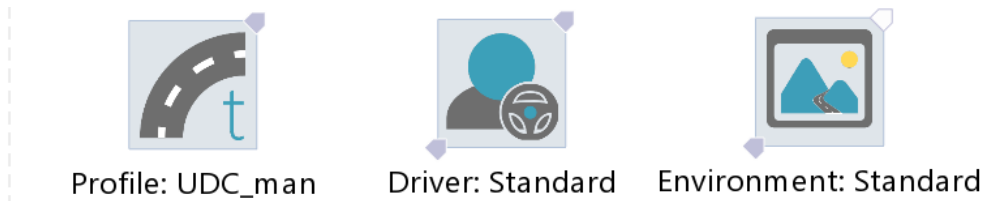


Figura 3.22: Ícones das condições de condução

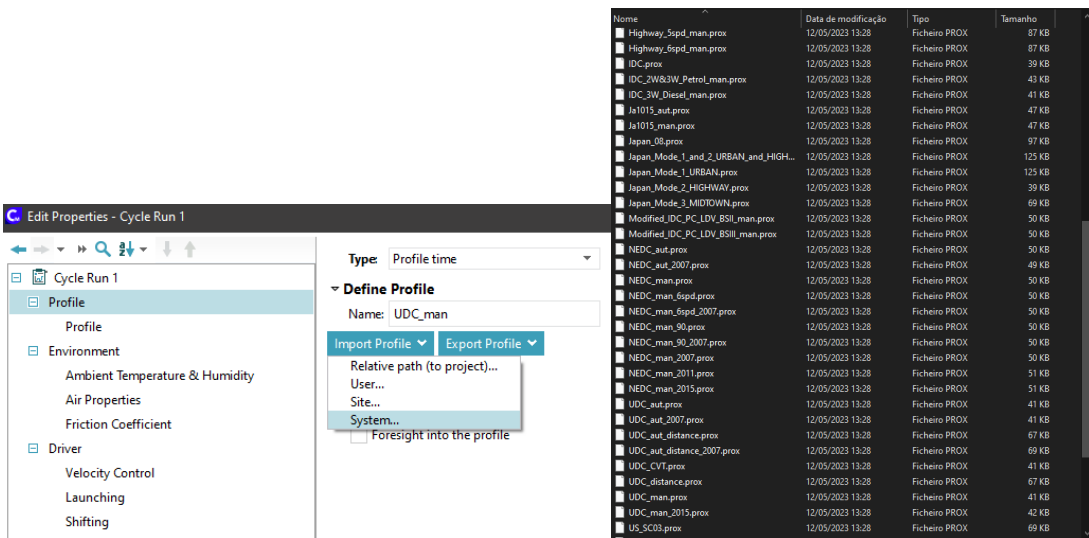


Figura 3.23: Escolha do perfil de condução (esquerda), Perfis de condução existentes no programa (direita)

A seguir é necessário escolher o tipo de condutor pretendido para a simulação, que para este caso é o 'Standard'. Selecionar o separador *Driver* e importar o tipo pretendido de entre os fornecidos, Figura 3.24.

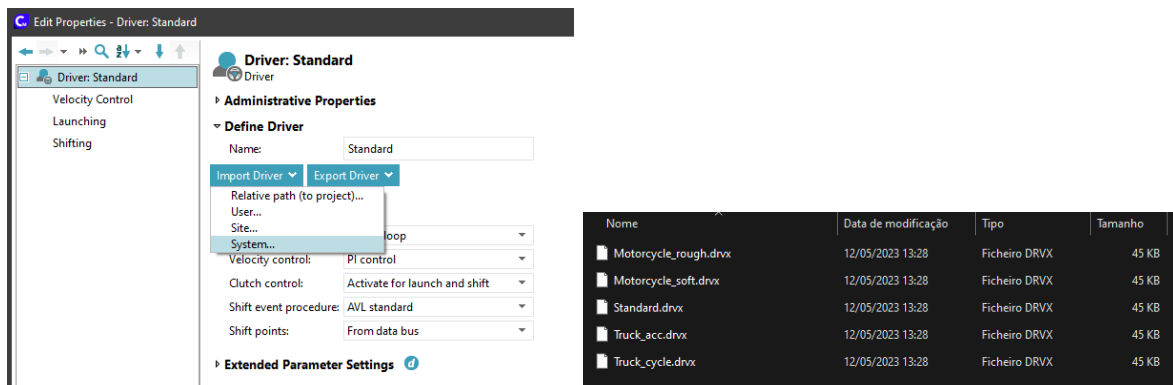


Figura 3.24: Escolha do perfil do condutor pretendido para a simulação (esquerda) e Perfis de condutor do sistema

Pode-se ainda escolher o Ambiente em que irá ocorrer a simulação de entre os do sistema ou próprios, Figura 3.25. Em casos de testes para condições de temperaturas, humidade, densidade do ar ou altitude especificas é bastante útil, Figura 3.26 a 3.28.

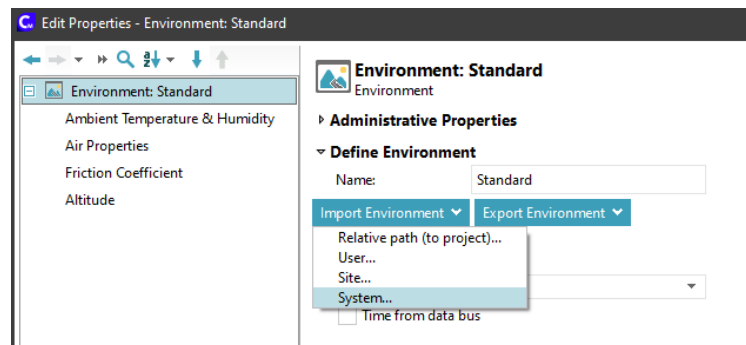


Figura 3.25: Escolha do ambiente da simulação

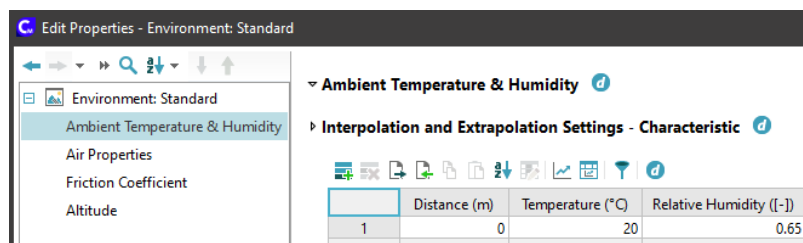


Figura 3.26: Definição da temperatura ambiente e humidade

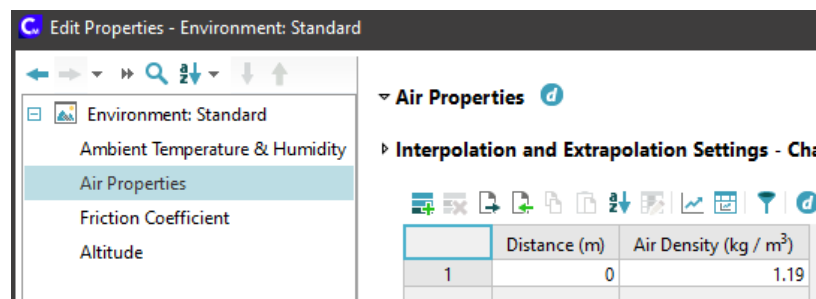


Figura 3.27: Definição da densidade do ar

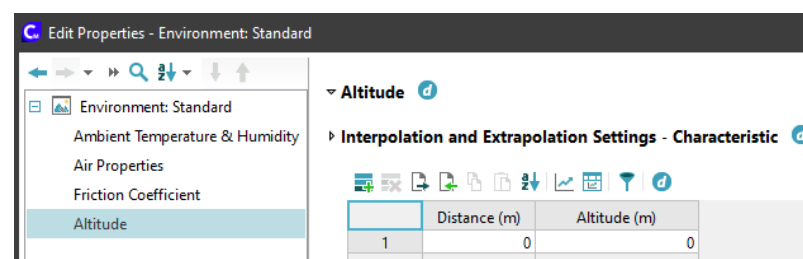


Figura 3.28: Definição da altitude

Na simulação, para visualizar os valores, as variáveis pretendidas ou controlar os resultados recorre-se ao *Monitor*, no qual estas se inserem numa tabela conforme sejam ‘inputs’ ou ‘outputs’, respetivamente, Figura 3.29.

The screenshot shows the 'Edit Properties - Monitor 1' window. On the left, there is a tree view with 'Monitor 1' and 'Data Bus Definition'. The main area is divided into 'Inputs' and 'Outputs' sections. The 'Inputs' section contains a table with 9 rows of data. The 'Outputs' section is currently empty.

	Name	Description	Unit	Default	Minimum	Maximum	Allow Missing Conne...
1	Clutch Pedal Travel		- (No Unit)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Current Gear		- (No Unit)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Desired Gear		- (No Unit)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Engine Load Signal		- (No Unit)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Engine Speed		1 / min (Angular Ve...	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Fuel Consumption		g / s (Massflow)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Vehicle Acceleration		m / s ² (Acceleration)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Vehicle Distance		m (Length)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Vehicle Velocity		km / h (Velocity)	0	-1e+111	1e+111	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.29: Tabela de input/output no monitor

3.1.2. Motor

Para fazer a representação do motor do veículo são necessários diversos dados, Figura 3.30. É utilizado um mapa de motor que consiste no mapa de consumos, Figura 3.31 e duas curvas de binário, uma para o ralenti e outra a carga máxima, Figura 3.32. Em complemento é necessário definir a velocidade do motor em regime de ralenti, o combustível utilizado e parâmetros físicos do motor. No primeiro menu (1) é possível definir o tipo de motor a estudar assim como algumas propriedades de controlo e de combustível. No terceiro (3) apenas é necessário o valor da velocidade de ralenti. Por último, no quarto (4) definem-se alguns parâmetros físicos do motor, como a sua cilindrada, o número de cilindros e os seus limites de rotação inferior e superior, Figura 3.33.

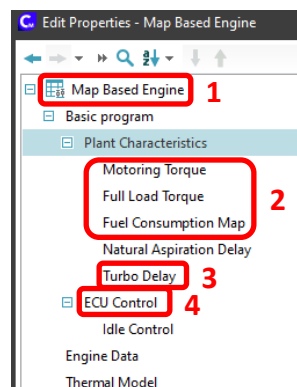


Figura 3.30: Menu para o elemento Mapa de Motor representativo do motor do veículo

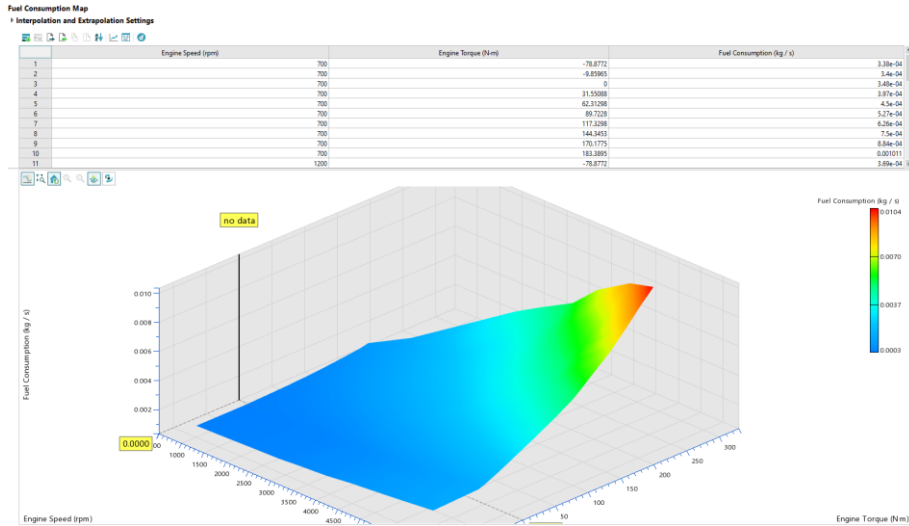


Figura 3.31: Mapa de consumos do motor (2)

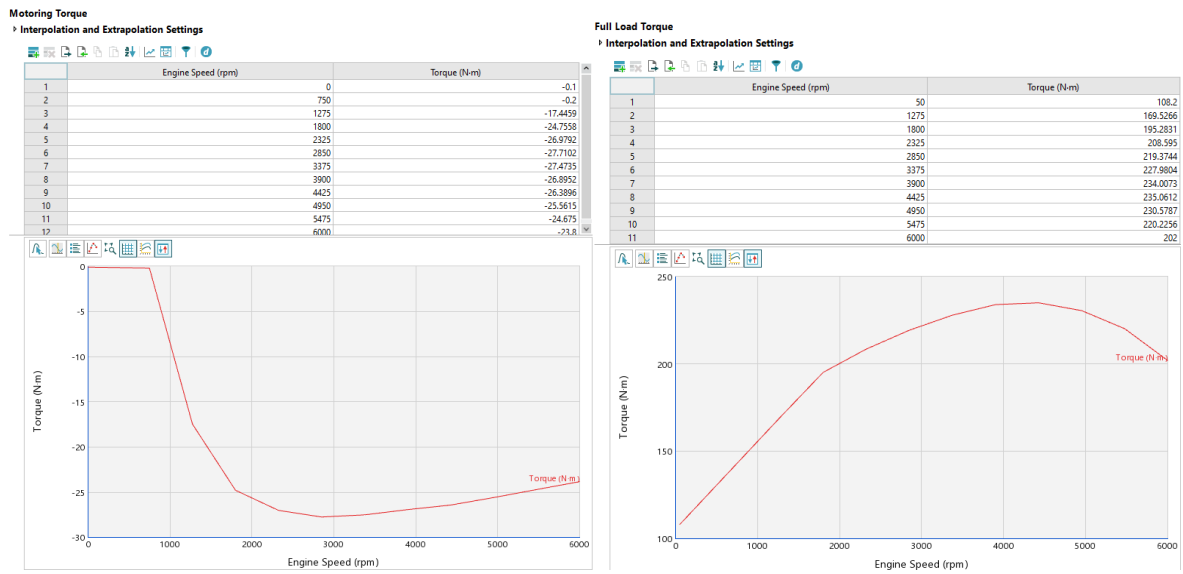


Figura 3.32: Curvas de binário a carga 0% (esquerda) e carga 100% (direita) (2)

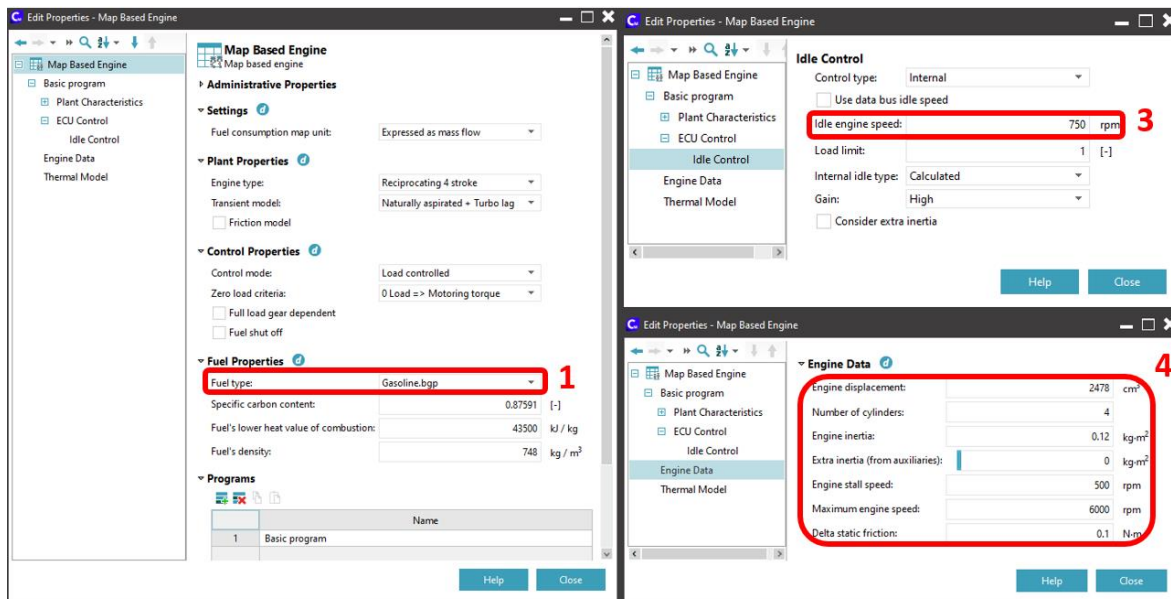


Figura 3.33: Escolha tipo de combustível (1), Definição da velocidade de ralenti (3), Definição de capacidade, número de cilindros e limites de rotação do motor (4)

3.1.3. Embraiagem / Conversor de binário

A transferência de potência do motor pode ser feita por um conversor de binário ou embraiagem. Para definir o conversor de binário são necessárias duas curvas, uma para a relação de binário e outra para o valor do binário, ambas em função da relação de velocidade entre a saída e entrada, conforme ilustrado na Figura 3.34. A embraiagem é definida por um limite de binário admitido e uma curva da transferência deste em função do pedal, Figura 3.35.

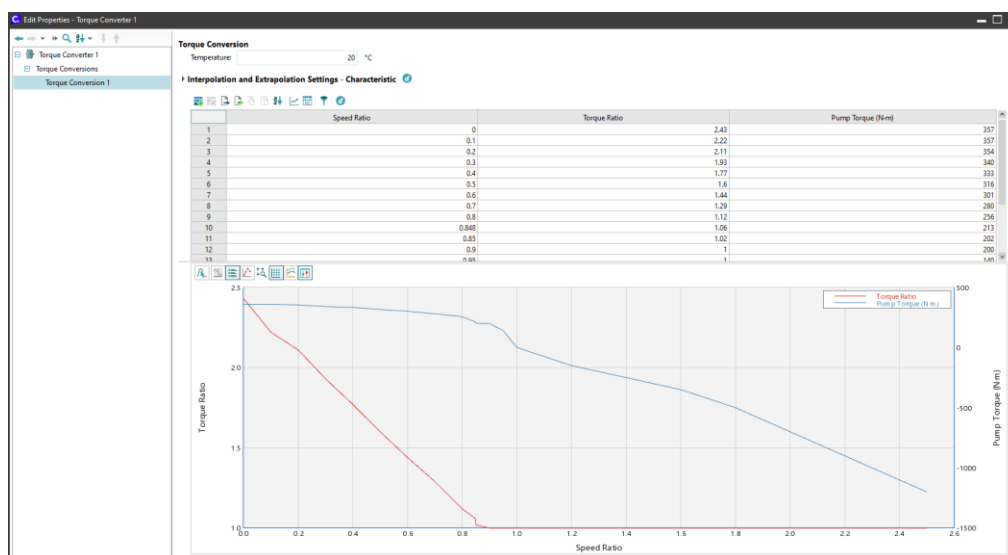


Figura 3.34: Curvas para definição de um conversor de binário em função da relação de velocidade

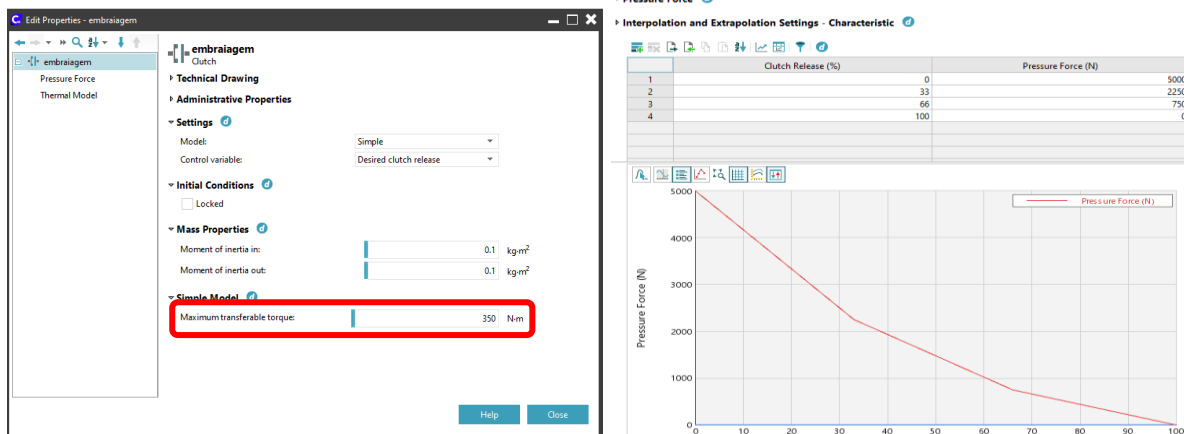


Figura 3.35: Propriedade da embraiagem (esquerda), curva para definição de força de pressão em função do curso do pedal de embraiagem (direita)

3.1.4. Caixa de velocidades

A relação entre a potência transferida do motor para as rodas é obtida pela caixa de velocidades através das relações da caixa. Para definição da caixa de velocidades apenas é necessário inserir o número de velocidades e definir os seus valores de relação de transmissão para cada, Figura 3.36. A sua eficiência também deve ser indicada, que para este caso foi considerado 0,95 por não ter sido encontrada essa informação na pesquisa efetuada.

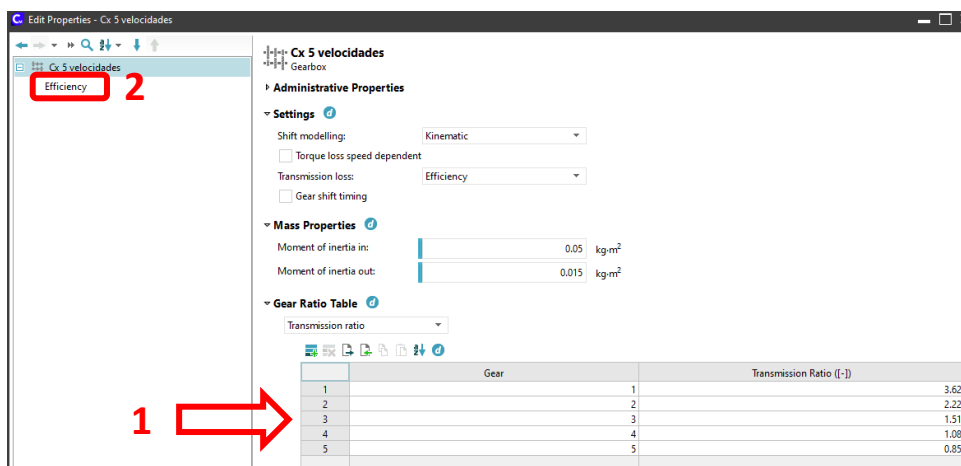


Figura 3.36: Definição das relações da caixa de velocidades e da sua eficiência

3.1.5. Transmissão Final e Diferencial

Tipicamente o diferencial tem duas funções, separar o binário entre as duas rodas e atuar como um desmultiplicador de velocidade para as rodas. Neste programa essas duas funções encontram-se em elementos diferentes, a “Transmissão Final” e o “Diferencial” permitindo uma visualização mais concreta da transferência de binário. O primeiro apenas necessita do

valor da relação de transmissão ou do número de dentes das engrenagens de entrada e saída e da sua eficiência, Figura 3.37.

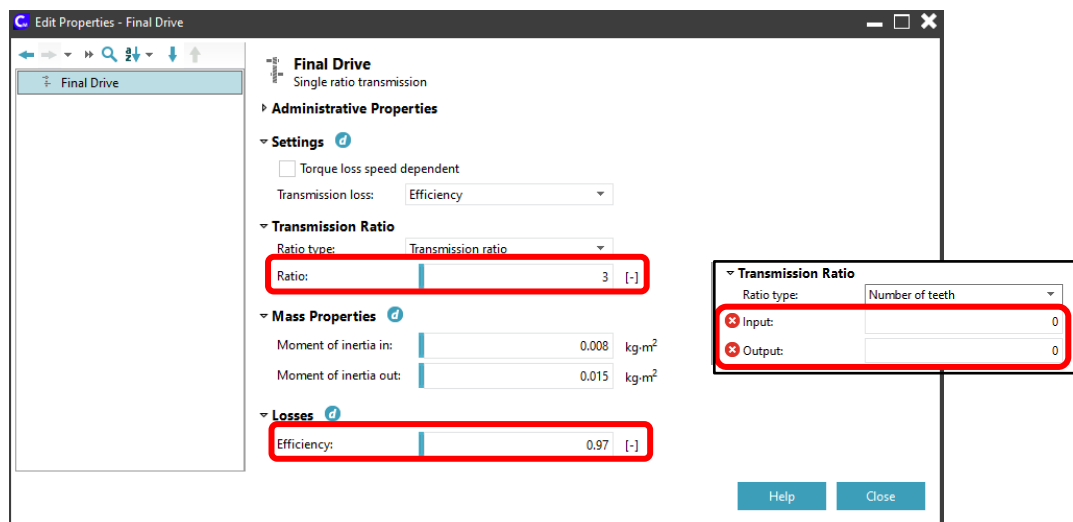


Figura 3.37: Definição de parâmetros da transmissão final

O diferencial faz a divisão da potência vinda da caixa de velocidades entre as duas rodas, este pode ser desbloqueado ou bloqueado e para o caso a estudar é desbloqueado permitindo o movimento independente entre rodas. É necessário definir os valores para os momentos de inércia e o fator de distribuição de binário entre rodas que pode ir até 100% para apenas uma roda, Figura 3.38.

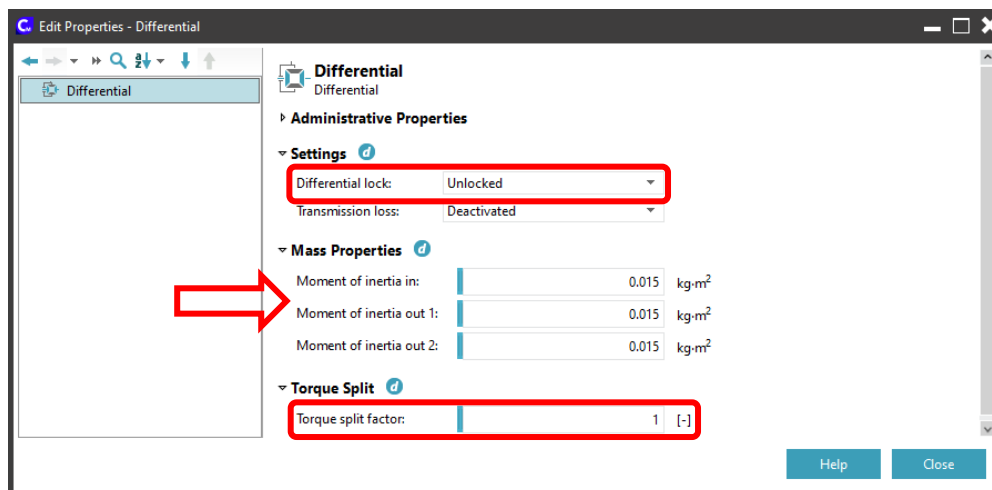


Figura 3.38: Definição de parâmetros do diferencial

3.1.6. Travões e Rodas

A definição dos travões considera as proporções geométricas do travão, como os valores da superfície de contacto e o coeficiente de fricção, Figura 3.39. Como no caso a estudar são

utilizados travões de disco às quatro rodas, que significa um fator de travão específico, C_B igual a 1. Se fossem selecionados travões de tambor em um dos eixos, este teria que ser maior que 1. Este fator corresponde a uma ajuda mecânica presente nos sistemas mais antigos de travão, especificamente o travão de tambor, para reduzir a pressão feita no pedal de travão. Com a utilização de travões de disco esta vantagem desaparece.

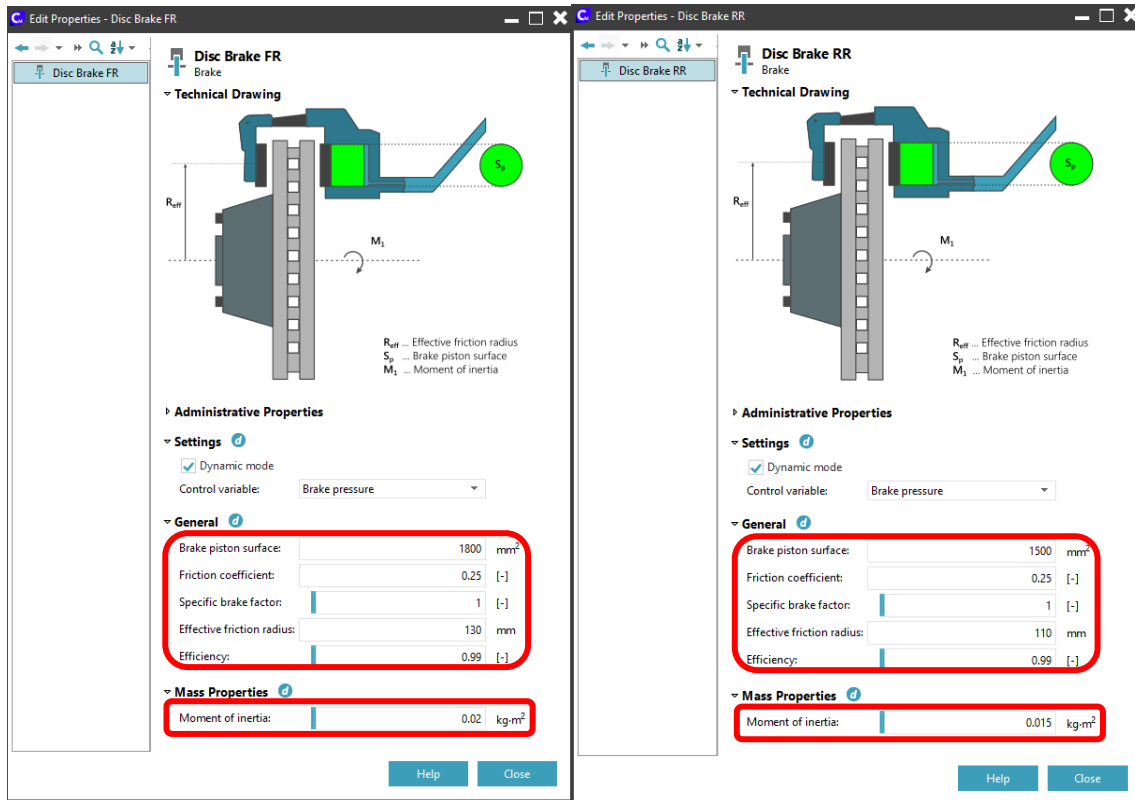


Figura 3.39: Definição de parâmetros dos travões para a dianteira (esquerda) e traseira (direita)

As rodas podem ser definidas com modelo de fricção, momento de inércia e para ficar mais completo uma curva de resistência de rolamento em função da velocidade assim como os raios de rolamento estático e dinâmico, Figura 3.41. Este corresponde à distância entre o centro da roda e a extremidade da mesma. Este é obtido através da soma da altura da parede do pneu com o raio da jante, Figura 3.40.

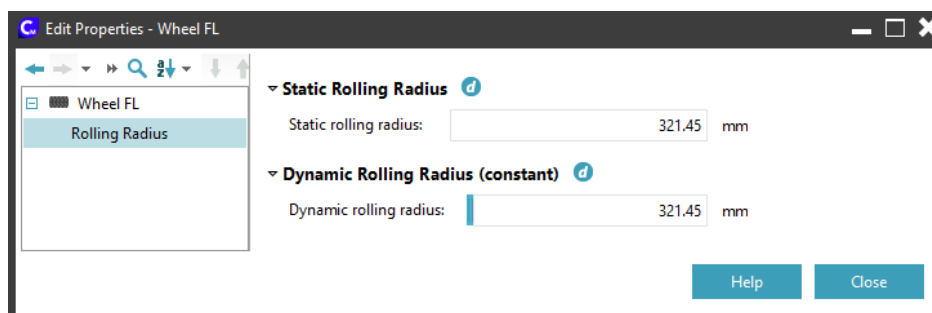


Figura 3.40: Definição do raio de rolamento

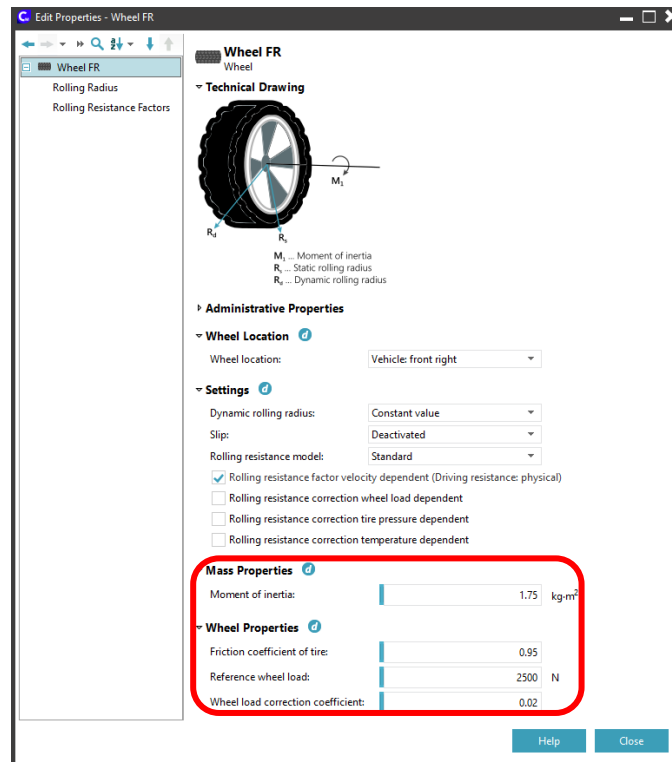


Figura 3.41: Propriedades da roda

3.1.7. Ligações Data Bus

As ligações Data Bus fazem a comunicação entre os diversos elementos do modelo para receber ou fornecer dados. As ligações são compostas por dois elementos, o que recebe e o que fornece. Primeiro é selecionado um elemento da lista da primeira coluna para receber a informação seguida da variável que a contém, Figura 3.42. Posteriormente é escolhido o elemento que fornece a informação e a respetiva variável, Figura 3.43. Este procedimento deve ser feito manualmente para todas as variáveis até já não apresentarem cruces vermelhas nos elementos da primeira coluna. Estas ligações são feitas automaticamente caso seja criado um modelo com o *Generator*.

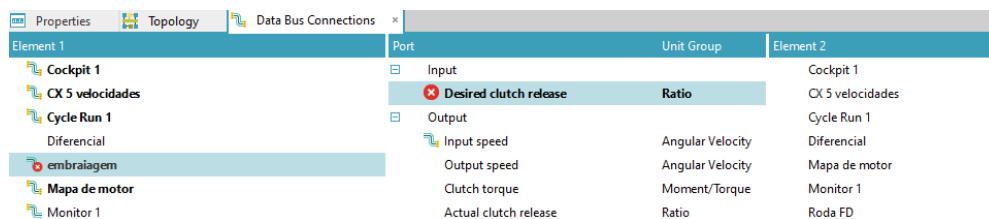


Figura 3.42: Seleção da variável desse primeiro elemento

Port	Unit Group	Element 2	Port	Unit Group
Desired clutch release	Ratio	Cockpit 1	Load signal	Ratio
Input speed	Angular Velocity	CX 5 velocidades	Brake pressure	Pressure
Output speed	Angular Velocity	Cycle Run 1	Desired clutch release	Ratio
Clutch torque	Moment/Torque	Diferencial	Desired gear	No Unit
Actual clutch release	Ratio	Mapa de motor	Start switch	No Unit
		Monitor 1		
		Roda FD		

Figura 3.43: Associação da variável do primeiro elemento à variável correspondente no segundo elemento

3.2. Simulação

Antes de começar a simulação, ainda no separador *Home* é necessário atribuir o tipo e tamanho de passo da simulação, assim como o tipo de solver e a sua precisão de cálculo além da janela temporal de simulação, Figura 3.44. O aumento da precisão de cálculo, afeta um pouco no tempo de cálculo e caso não sejam necessários valores com muitas casas decimais ou com ordem de grandeza muito baixas ou elevadas não se irá verificar diferenças significativas nos resultados. Poderá ter algum efeito se o passo de cálculo for ajustado em conjunto com a precisão.

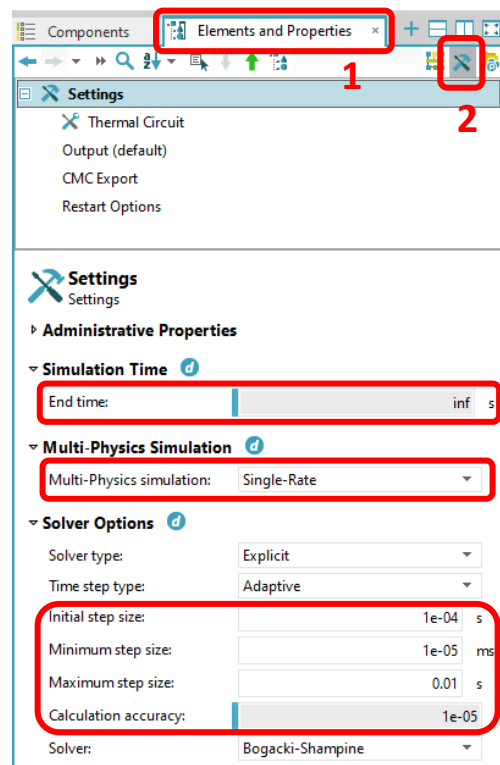


Figura 3.44: Definições do tempo e tipo de simulação a utilizar e seleção dos valores de incrementos do solver

Para executar a simulação é necessário passar ao separador *Simulations*. Este é utilizado após a definição de todos os parâmetros necessários do modelo, e tem como função iniciar a

simulação e observar as respostas dos sensores do modelo e alterar as escalas do tempo de simulação em gráficos, tabelas e mostradores ao longo desta.

- *'Single Calculation'* - apenas um caso na simulação
- *Multi Calculation* - múltiplos casos na simulação
- *Run Overview* e *Job Overview* – Ver o que se passa por detrás da simulação

Existem diversas visualizações para ver a curva de resultados, Figura 3.43. **Curve** é a mais utilizada por ser possível acompanhar as diversas curvas das variáveis definidas no elemento **Monitor** como a velocidade do veículo, a velocidade de rotação do motor e a relação de caixa selecionada ao longo do tempo de simulação estabelecido. Para isto, deve-se pressionar duas vezes a variável pretendida em (1) que esta aparece na lista apresentada em (2), Figura 3.45. Para colocar a simulação a correr após ter adicionado todas as variáveis pretendidas na visualização, basta pressionar o ícone com a legenda **Run** indicado abaixo, Figura 3.46.

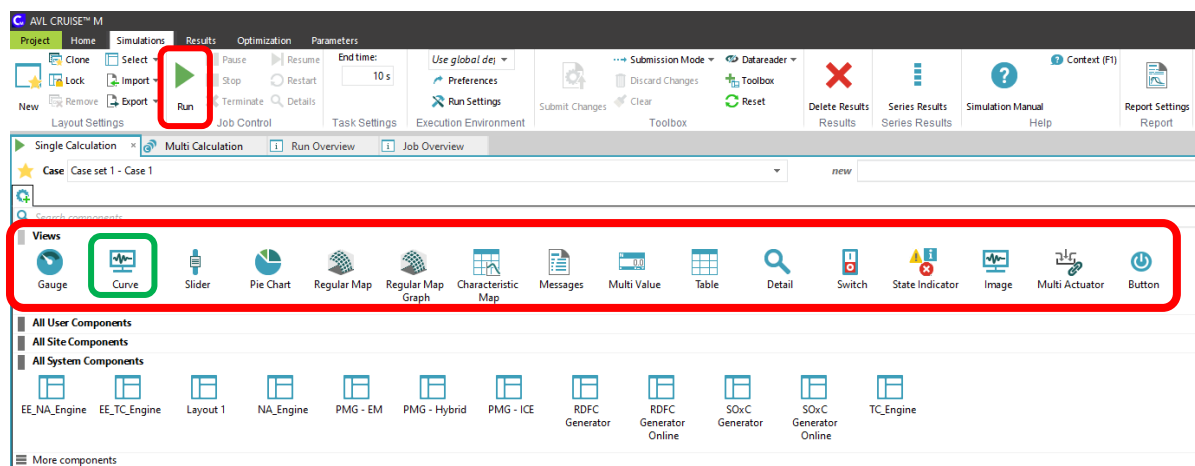


Figura 3.45: Seleção do tipo de apresentação das variáveis pretendidas na simulação

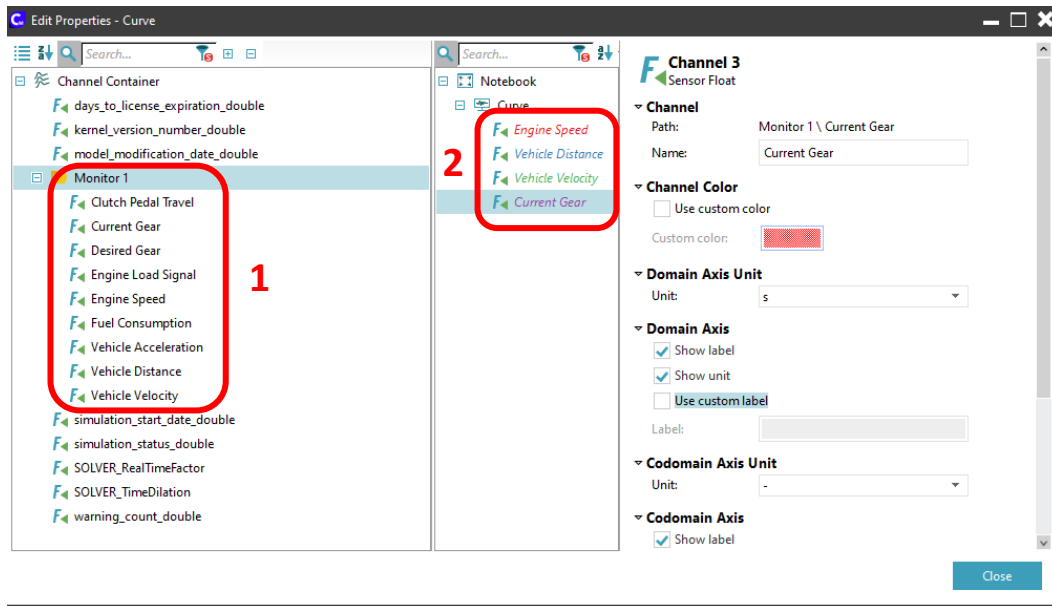


Figura 3.46: Adição de variáveis à curva de simulação

3.3. Resultados

Dentro do separador dos Resultados, ao centro, temos o “*Data Viewer*” apresentado no meio do separador que tem a função de mostrar resultados individuais ou em conjunto obtidos na simulação efetuada anteriormente através de gráficos ou tabelas, Figura 3.47. Para apresentar variáveis, à direita temos o “*Data Browser*” onde se selecciona um elemento do modelo e qual a sua categoria dentro deste (1), seguido da escolha da variável ou variáveis pretendidas (2), Figura 3.48.

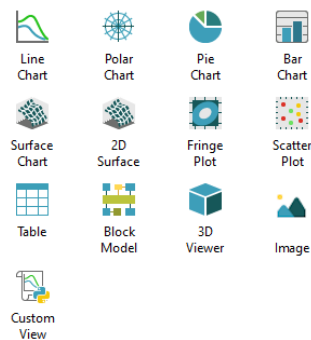


Figura 3.47: Opções para apresentação de resultados no separador de Resultados

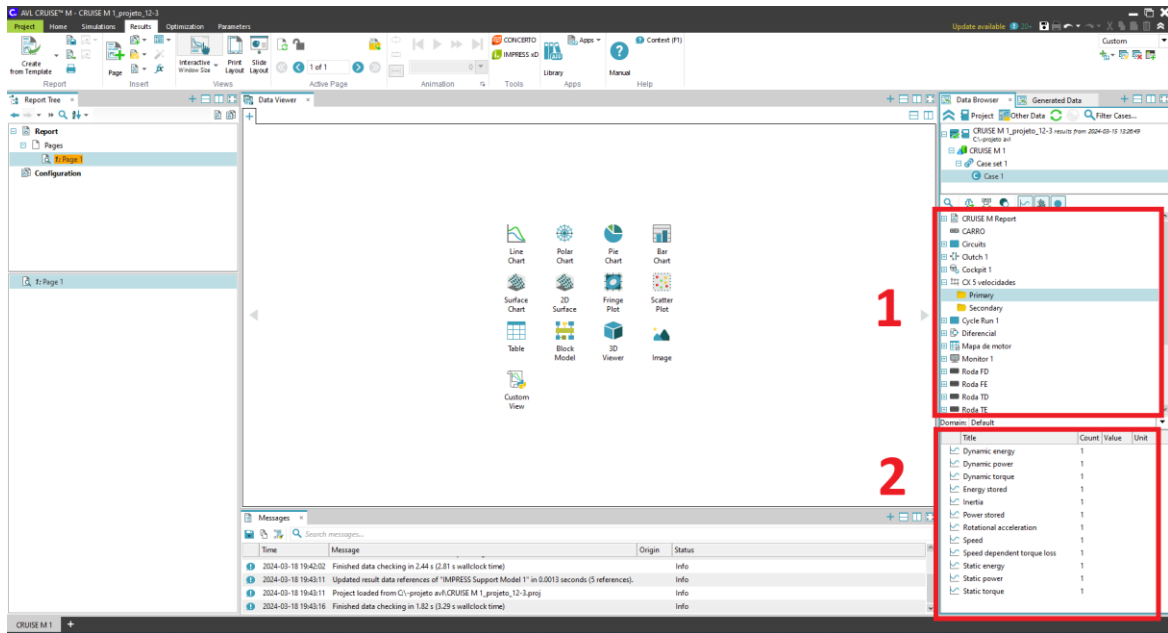


Figura 3.48: Procedimento para seleção de variáveis no separador de Resultados

4. Caso de estudo

Para este capítulo o objetivo é a modelação de um veículo no software de simulação de modo a criar uma representação o mais fidedigna deste em termos dinâmicos. É dividido em duas partes, a primeira que contem a descrição do veículo e a definição de todos os componentes e variáveis necessárias à sua simulação. De seguida é seleccionado o tipo de teste a realizar entre os dois principais, o NEDC e WLTP ou ambos, caso seja possível.

4.1. Veículo a modelar

O veículo escolhido para realizar este projeto foi um Volkswagen EOS com o motor turbodiesel 2.0 TDI de 140cv (103kW) de potência, ilustrado na Figura 4.49. Para a realização deste trabalho foram considerados parâmetros assumidos como padrão do software em alguns dos elementos do modelo, mais concretamente nos subcapítulos referentes aos perfis de condução e de condutor, para os elementos dos travões e cockpit. Estes foram considerados os mesmos utilizados no capítulo 3 por não influenciarem os resultados pretendidos e por a sua obtenção não estar nos objetivos presentes no trabalho. Os restantes dados estão definidos nas subsecções seguintes.



Figura 4.49: Volkswagen EOS (AutoISO, 2023)

4.1.1. Propriedades físicas do Veículo

As propriedades físicas do veículo necessárias à sua modelação são definidas no software neste tópico. Estas são o comprimento, distância entre eixos, a tara (*Kerb weight*) e peso bruto (*Gross weight*), área frontal, coeficiente de arrasto e medida do pneumático utilizado no veículo, Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Tabela de propriedades físicas do veículo a modelar (carinf.com, s.d.)

Nome [Unidade]	Valor
Comprimento [mm]	4407
Distancia entre eixos [mm]	2578
Tara (Kerb weight) [kg]	1560
Peso máximo permitido (Gross weight) [kg]	2020
Área frontal [m ²]	2,16
Coefficiente de arrasto, C_d [-]	0,33
Medida do Pneu, (Largura pneu (L_p) [mm]) / (%Altura pneu (% A_p) [%]) R (Diâmetro jante (D_j) [in]) [-]	215/55 R16

É necessário determinar o raio de rolamento estático e dinâmico para as rodas. Este corresponde à distância entre o centro da roda e a extremidade da mesma quando o veículo está no chão, incluindo o achatamento do pneu. Este foi obtido a partir de um *website* apenas com a introdução das dimensões do pneu utilizado pelo veículo, cujo valor obtido para o raio estático de rolamento foi de 295 mm e de 312 mm para o raio de rolamento dinâmico (Stealth Motorsport UK, 2024).

4.1.2. Motor

O veículo utilizado para este trabalho é equipado com um motor diesel sobrealimentado com controlo de injeção *Common-rail* de quatro cilindros com dois litros de cilindrada total e controlo de emissões EURO 4. Algumas propriedades físicas e mecânicas do motor, como a sua potencia, binário e cilindrada, estão apresentadas abaixo, Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Tabela de propriedades físicas e mecânicas do motor do veículo a modelar (carinf.com, s.d.)

Nome	Valor
Código	CBAB
Tipo	4 cilindros em linha
Potência [kW@RPM]	103 @ 4200

Binário [Nm@RPM]	320 @ 1700-2500
Cilindrada [cm³]	1968
Relação de Compressão	16,5:1
Sobrealimentação	Turbocompressor (KKK BV43)
Velocidade ao ralenti [RPM]	780

4.1.2.1. Obtenção do mapa de consumos

Para obter o mapa de consumos foram utilizados dados obtidos através do banco de potência do Laboratório de Engenharia Automóvel, com um veículo com um motor igual ao do veículo modelado, por não ser possível a obtenção de um ficheiro completo para este. Segundo os testes de emissões, não é necessário utilizar toda a gama de rotação do motor, será suficiente determinar valores até as 3000 RPM, conforme apresentado na Figura 4.50.

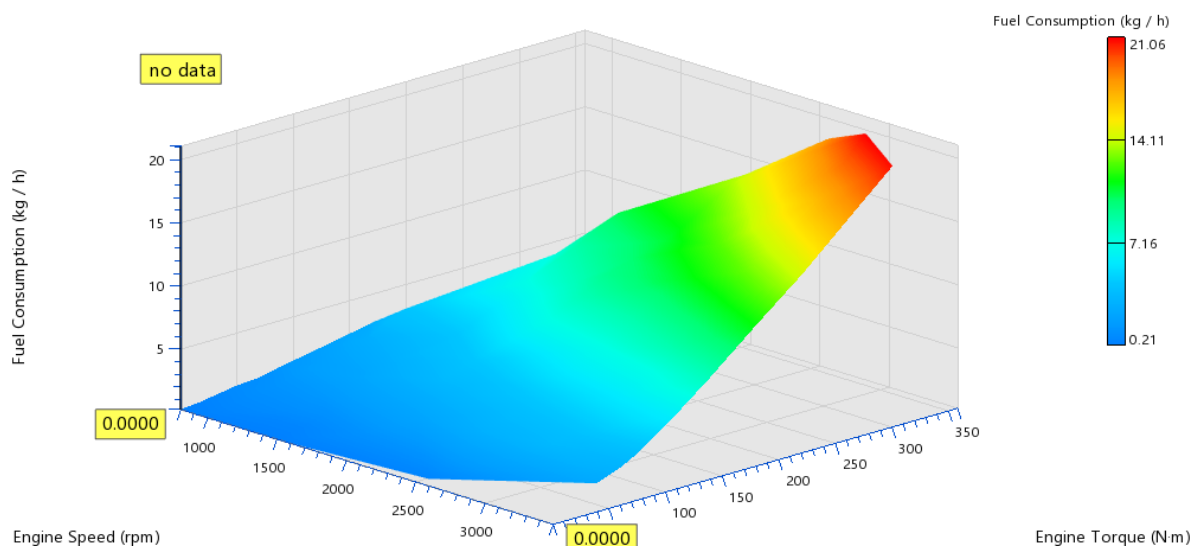


Figura 4.50: Mapa de consumos do motor no CRUISE M

Os dados obtidos no banco de ensaios foram fornecidos em litros de combustível por hora (L/h). O software requer consumos em massa de combustível por unidade de tempo (neste caso kg/h), portanto foi necessário convertê-los. Para isto, foi considerada uma densidade do combustível diesel de 850kg/m³ (ou 0.85kg/L) e efetuada a conversão apresentada na equação baixo (The Engineering Toolbox, 2003).

$$m_{comb} = Vol_{comb} \times 0,85$$

Além do mapa de consumo também são necessárias curvas de binário que representam o binário em carga máxima e o binário de arrasto do motor. Estas também elaboradas com base em valores retirados do banco de ensaios, em conformidade com o representado na Figura 4.51.

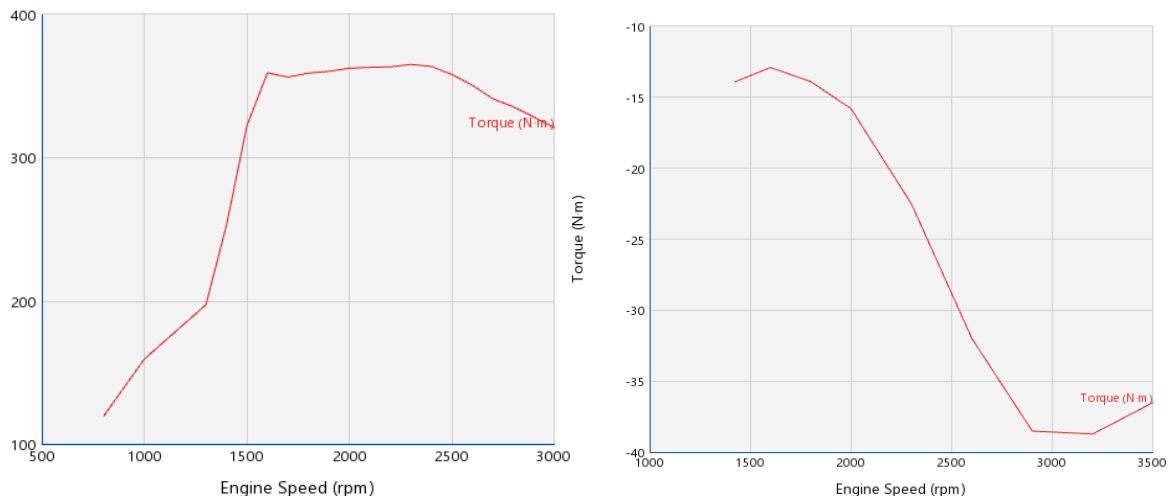


Figura 4.51: Curva de Binário a carga máxima do motor (esquerda) e binário de arrasto do motor (direita) em CRUISE M

4.1.3. Caixa de Velocidades e Diferencial

A caixa de velocidades acoplada ao motor do veículo é de atuação manual de referência 02Q KNS e 6 relações de transmissão, apresentada na Tabela 4.7. Após a saída da caixa de velocidades temos o elemento que faz a relação final. Este, na prática, está incorporado no diferencial, mas para o modelo não há essa possibilidade. A relação final utilizada tem valor de 2,76 que é a original para o veículo.

Tabela 4.7: Tabela das relações de caixa de velocidades do veículo estudado (workshop-manuals.com, s.d.)

Mudança	Relação de transmissão
1	3.769
2	2.087
3	1.324
4	0.977
5	0.975
6	0.814

4.2. Condições da simulação

A simulação do veículo pode ser feita através do teste NEDC ou WLTP. Para este trabalho só foi realizado o primeiro por maior facilidade de implementação no software. Para o ciclo WLTP, os pontos de troca de relação de velocidade são dependentes das relações da caixa de velocidades do veículo. Isto acrescenta complicação à sua implementação e aumenta a probabilidade de erro. Não foi possível encontrar esta informação durante a realização da recolha de dados. Como o veículo modelado tem uma caixa de 6 velocidades, o teste utilizado é *NEDC_man_6spd*, Figura 4.52.

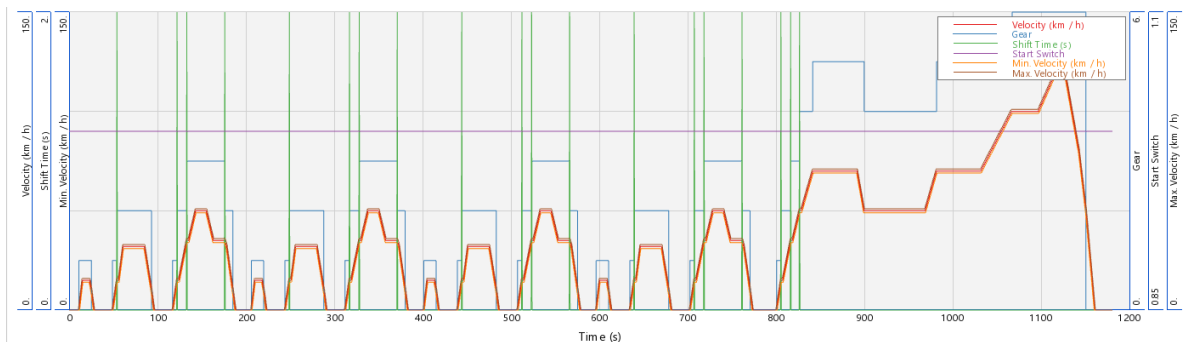


Figura 4.52: Perfil do teste de emissões retirado do CRUISE M

5. Apresentação e Comparação de Resultados

Neste capítulo é feita uma análise e comparação de resultados de consumo de combustível para o ciclo NEDC nas suas duas fases. Os dados fornecidos, obtidos através do banco de ensaio do Laboratório de Engenharia Automóvel e os resultados obtidos pelo software de simulação são apresentados. Foi ainda colocado em comparação o gráfico de emissões e consumos retirados do AVL para observar a correlação entre si.

5.1. Resultados Práticos Fornecidos para comparação

Os resultados práticos obtidos a partir de banco de ensaios, fornecidos para comparação estão apresentados e analisados nesta secção. Estes valores foram obtidos a partir dos resultados do projeto de um aluno de MEAU do ano de 2019, (Bastos, 2019). O ciclo é dividido em duas partes, uma com 4 repetições da fase urbana, seguida de uma fase extraurbana. Este é apresentado na sua totalidade abaixo, Figura 5.53.

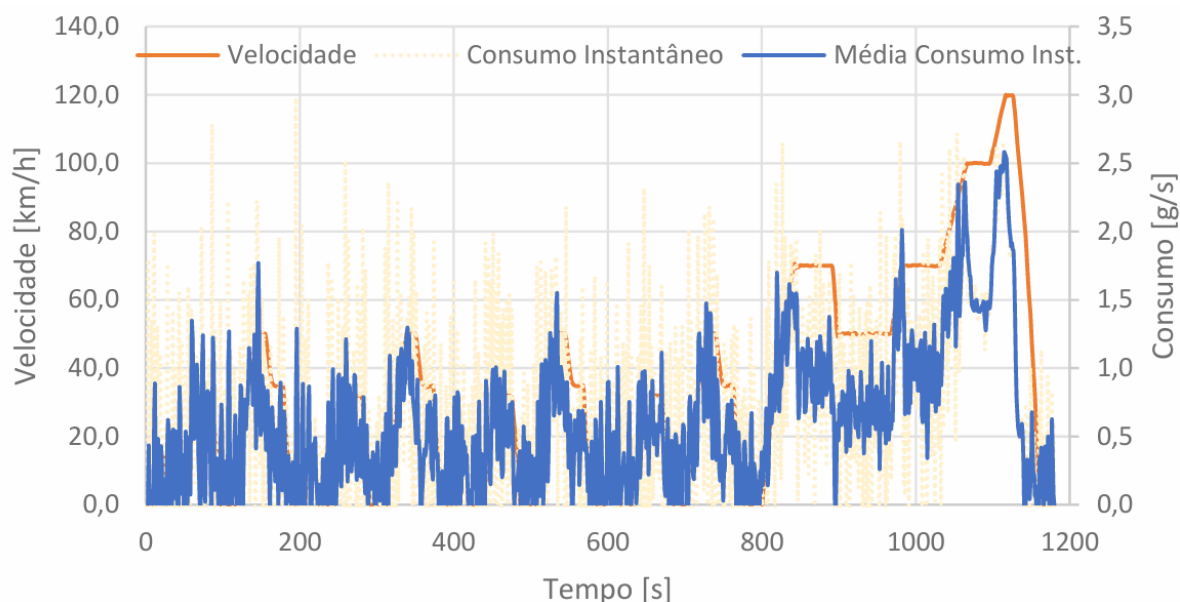


Figura 5.53: Gráfico de consumo instantâneo para o ciclo NEDC completo (Bastos, 2019)

Na primeira fase, a velocidade máxima determinada é 50km/h e o consumo máximo atingido é ligeiramente antes desse ponto na condição de subida de velocidade com valor de 1,20 g/s. O consumo médio é de 0,383g/s, correspondente a 7.5kg/100km, Figura 5.54 (Bastos, 2019).

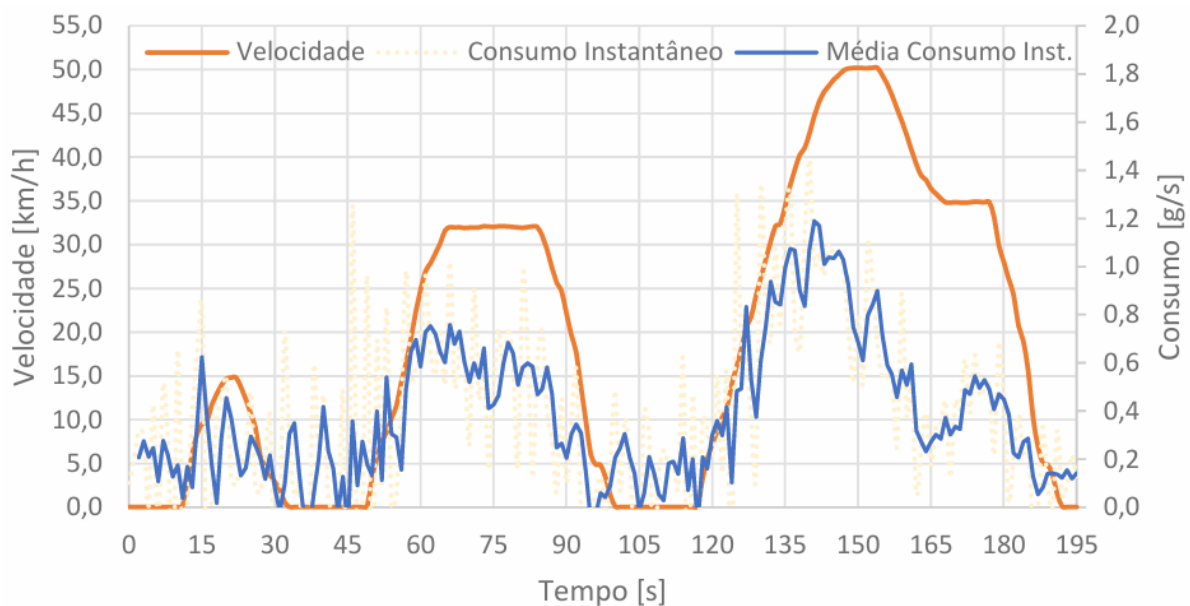


Figura 5.54: Gráfico de consumo instantâneo para uma repetição da fase urbana para o ciclo NEDC (Bastos, 2019)

Na segunda parte que constitui a condução extraurbana, é expectável um maior consumo médio devido às velocidades mais elevadas praticadas e apresenta valor medio de 1,27g/s correspondente a 5.6 kg/100km. O valor máximo é apresentado para o ponto de velocidade mais elevada de 120km/h é 3,0g/s, Figura 5.55 (Bastos, 2019).

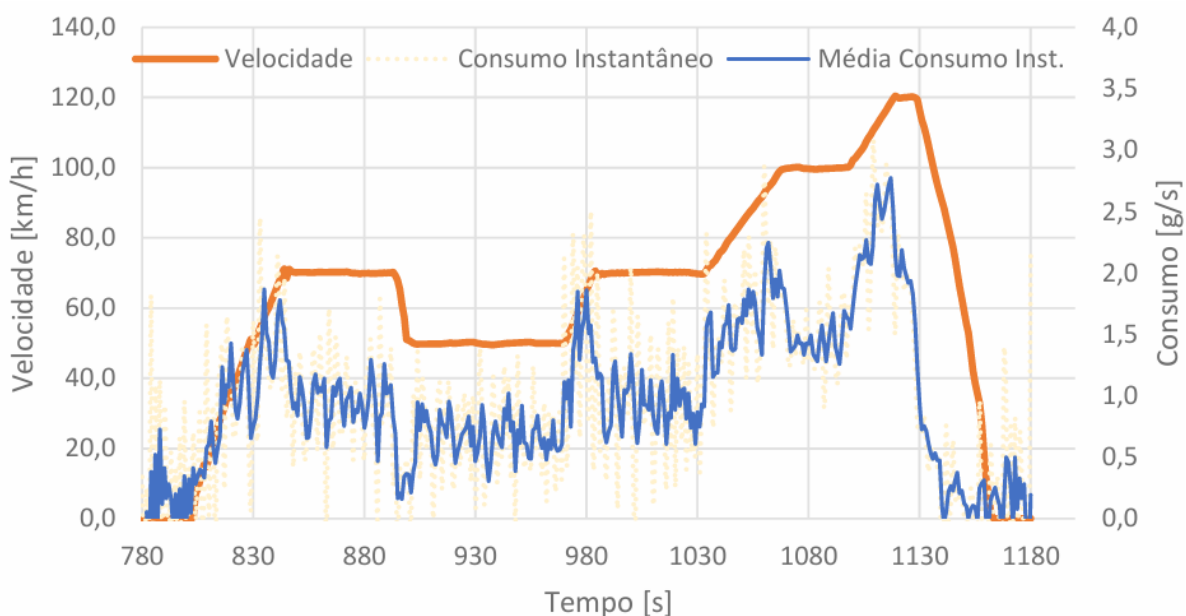


Figura 5.55: Gráfico de consumo instantâneo para a fase extraurbana para o ciclo NEDC (Bastos, 2019)

5.2. Resultados Software

Os gráficos dos resultados obtidos em software de simulação apresentados foram obtidos tendo em consideração todos os valores, tabelas e curvas definidos no capítulo anterior. Numa primeira instância foram realizadas simulações para o ciclo NEDC de modo a obter valores de consumo de combustível. Na imagem abaixo, está apresentado um gráfico obtido em AVL com representação dos valores da velocidade, consumo, distancia percorrida e a relação de caixa selecionada, Figura 5.56.

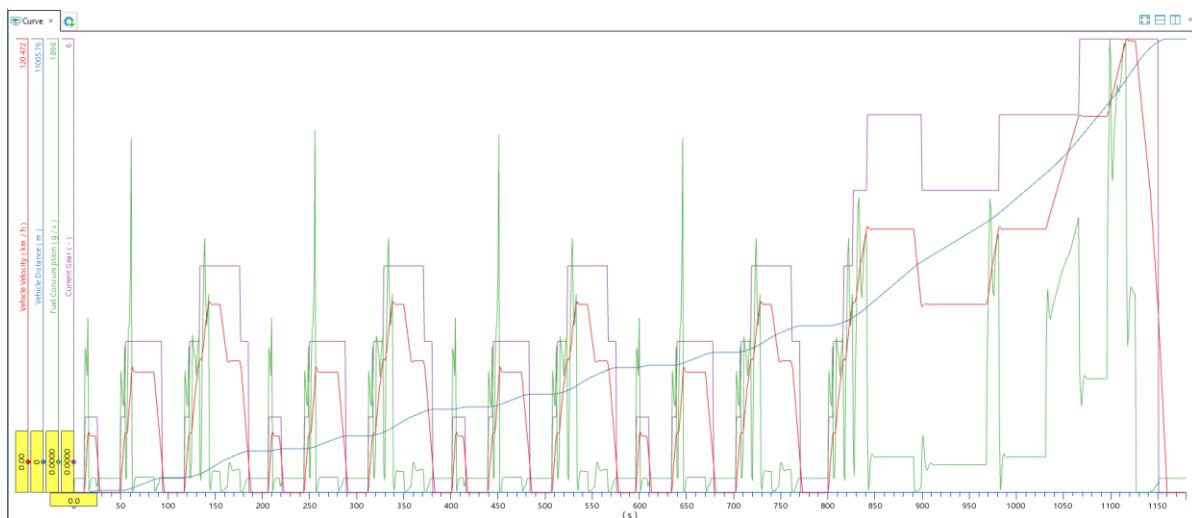


Figura 5.56: Gráfico de consumo instantâneo de combustível em função do tempo para o ciclo NEDC retirado do software.

Na primeira parte do ciclo de teste a velocidade máxima determinada é 50km/h. O consumo máximo de combustível aparece imediatamente antes desse ponto com valor de 1,06 g/s. Este gráfico apresenta outro ponto de consumo máximo quando em aceleração até 30 km/h que pode ser atribuído a um valor do mapa de consumos excessivo nesse ponto. Nesta fase, o gráfico apresenta um valor médio do consumo de combustível de 0,163 g/s, correspondente a 3,20kg/100km, Figura 5.57.

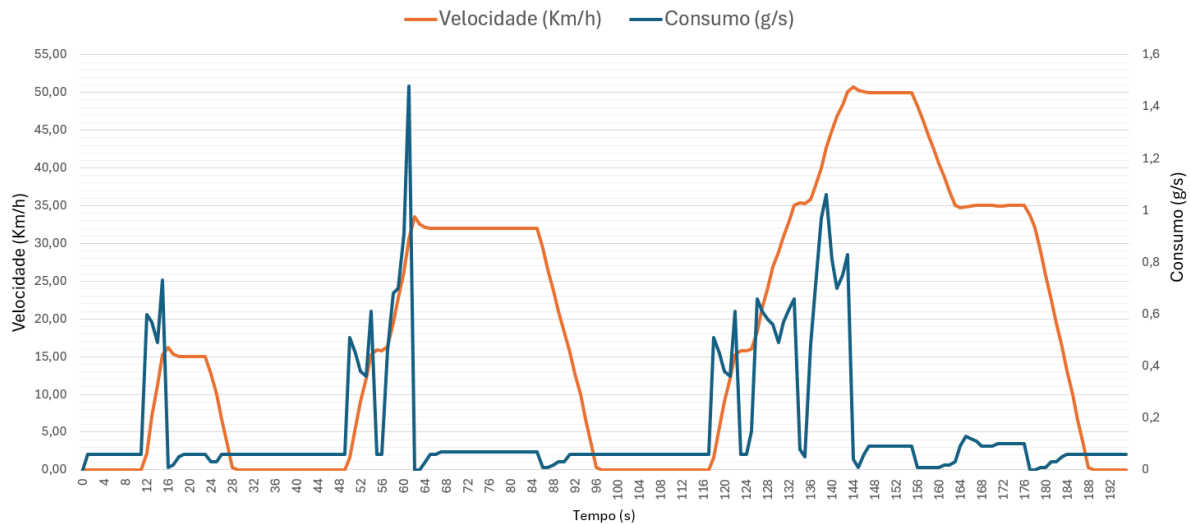


Figura 5.57: Gráfico de consumo instantâneo para uma repetição da fase urbana para o ciclo NEDC

Na segunda parte, que constitui a condução extraurbana, é expectável um maior consumo de combustível devido às velocidades mais elevadas praticadas. O seu valor máximo é 1,88 g/s para o ponto de velocidade mais elevada de 120km/h e o valor médio de 0.383g/s, equivalente a 2.20 kg/100 km, Figura 5.58.

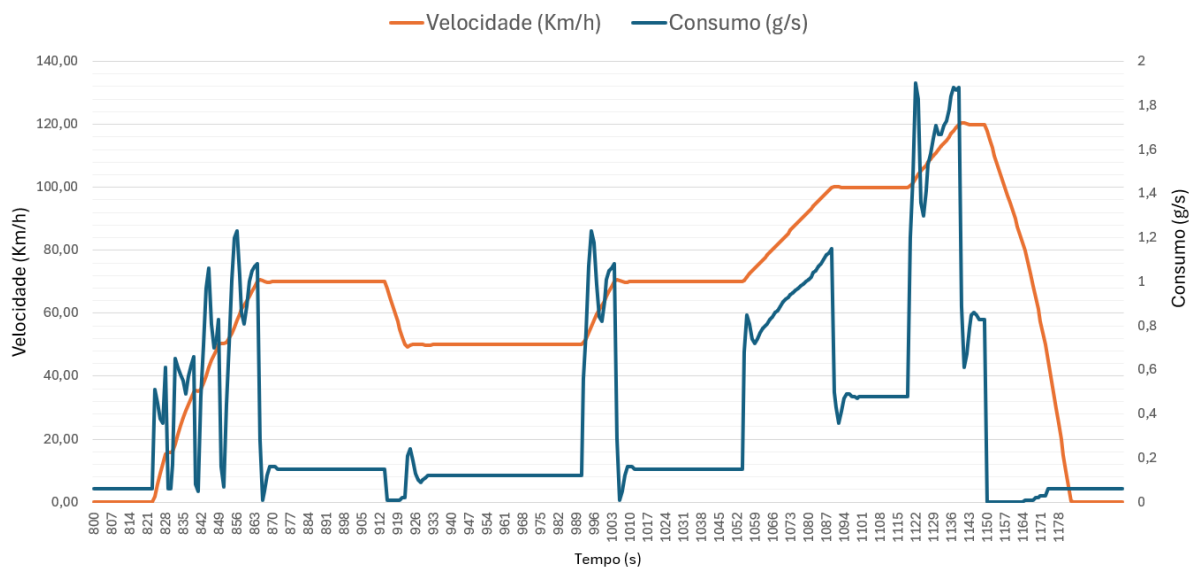


Figura 5.58: Gráfico de consumo instantâneo para a fase extraurbana para o ciclo NEDC

5.2.1. Resultados para emissões de CO₂

Além do consumo de combustível, também foi analisado comparativamente os resultados obtidos para as emissões de gases de escape, nomeadamente o CO₂. Para a fase urbana e extraurbana foi possível verificar uma semelhança no comportamento das emissões em

comparação ao consumo apresentado no mesmo gráfico, Figura 59 e 60. Com a utilização do ciclo de condução NEDC, o valor indicado pelo fabricante de 162 g/km. Mas caso seja utilizado o WLTP, este valor iria subir cerca de 10%.

Na primeira parte, que simula a condução urbana, a emissão de CO₂ foi de 88,38 g/km, enquanto na outra obteve-se um valor de 61,24 g/km. O total para o ciclo completo foi de 71,21 g/km, que comparando ao valor indicado pelo fabricante, é menos de metade. Mesmo obtendo valores desta magnitude, pode-se verificar que têm uma relação semelhante aos resultados obtidos para o consumo quando comparados com os fornecidos. Foi possível observar que as emissões na condução urbana são superiores aos da condução extraurbana. Isto é correto, visto que durante a primeira fase são feitas mais acelerações, enquanto na segunda fase é uma condução um pouco menos agressiva neste aspeto.

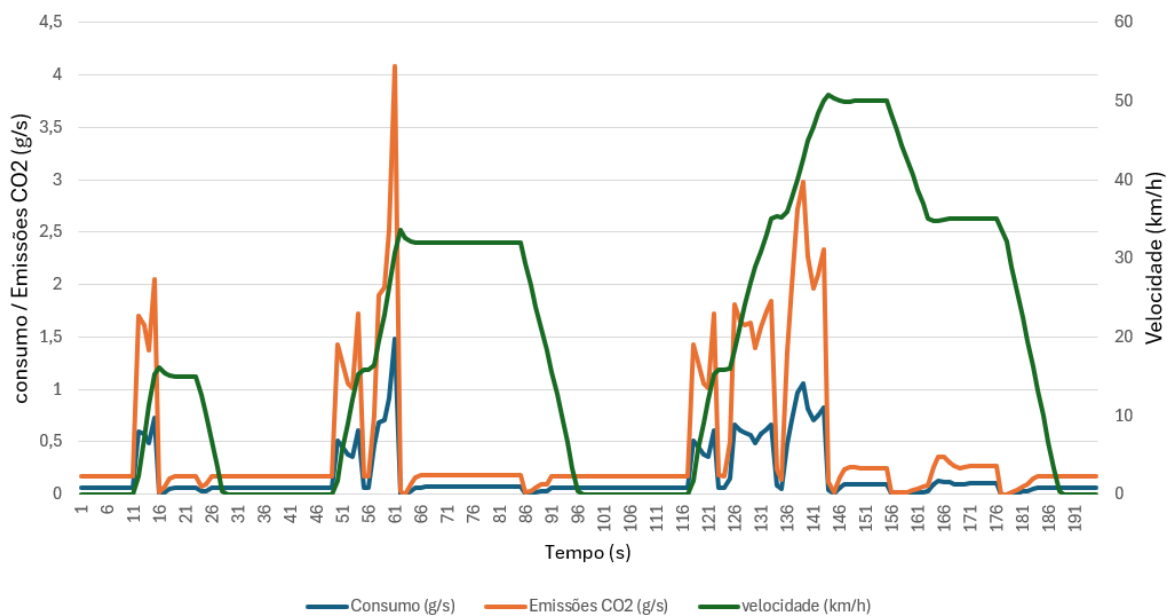


Figura 5.59: Gráfico de emissões de CO₂ para a fase urbana para o ciclo NEDC

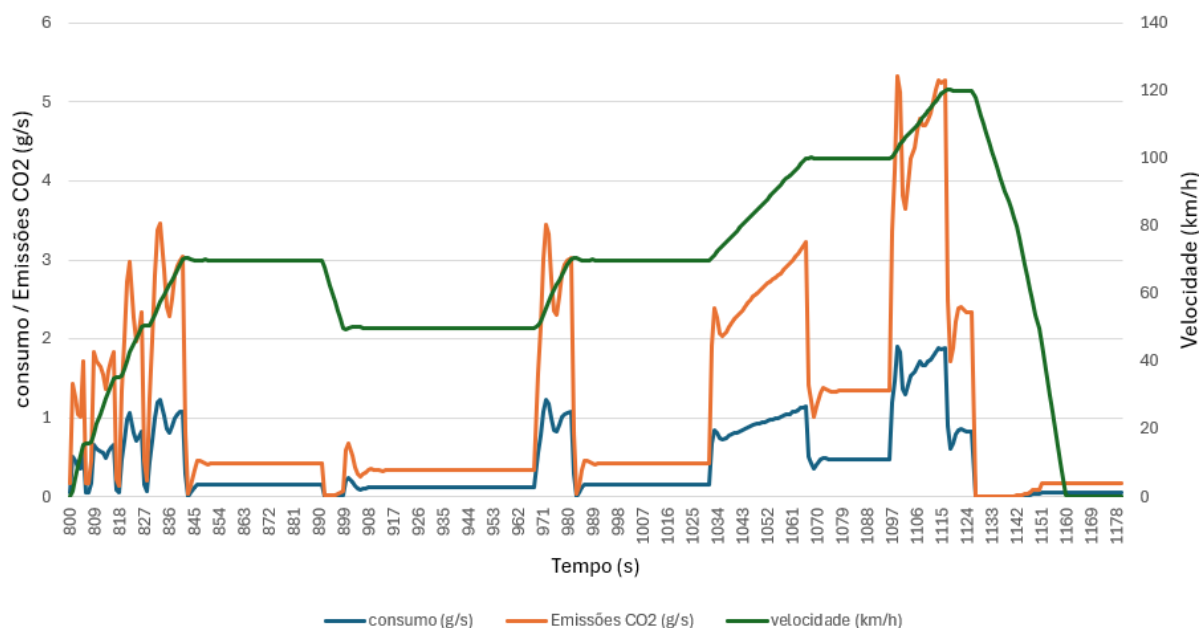


Figura 5.60: Gráfico de emissões de CO₂ para a fase extraurbana para o ciclo NEDC

5.3. Discussão de Resultados

É possível verificar na apresentação e Comparação de resultados que o consumo de combustível obtido através de software de simulação é bastante inferior aos valores fornecidos para comparação, Tabela 4.8. Esta diferença deve-se principalmente aos valores do mapa de motor, que em caso ideal seria fornecido por inteiro, mas para este projeto teve de ser elaborado a partir de uma tabela de valores de velocidade do motor, binário e consumo de combustível. Outras possíveis causas a esta disparidade tão elevada entre valores é a falta ou a utilização de alguns dados físicos incorretos. É de notar que o valor apresentado para o consumo de combustível nestes gráficos, para ambos os métodos, varia com grande frequência devido a serem valores experimentais e existe sempre algum erro.

Tabela 4.8: Tabela dos valores de consumo obtidos em simulação e fornecidos para comparação em Kg/100km (Bastos, 2019)

	Urbano 1	Urbano 2	Urbano 3	Urbano 4	Extraurbano	Total
Fornecidos	7,246	7,432	7,63	7,752	5,596	6,295
Simulação	3.20	3.22	3.20	3.19	2.20	2.86

Os gráficos apresentados na secção anterior apresentam uma tendência de pico no consumo de combustível para acelerações repentinas devido ao aumento de carga momentânea no

motor. No final desta aceleração, para os valores obtidos em simulador há uma queda muito acentuada no consumo para valores de velocidade constante. Esta acontece devido a uma má otimização dos valores do mapa de consumos para os pontos de rotação e carga afetados. Isto não acontece nos resultados práticos do banco de ensaio que têm alguma estabilidade neste instante, mas continuam a ter uma queda com tendência semelhante à descida da velocidade. No caso das desacelerações, o valor de consumo apresenta uma ligeira descida face à velocidade constante que pode ser justificado pela utilização do motor para travagem. Esta tendência do gráfico aplica-se em todas as fases tanto para os valores obtidos por via de banco de ensaios como para os mesmos obtidos via simulação.

De modo a melhorar os resultados obtidos, é necessário a utilização de dados do motor com maior autenticidade e de fonte fidedigna. Isto é, um mapa de motor e curvas de binário obtidas diretamente da unidade de controlo de motor do veículo utilizado para a simulação. Outra forma, em complemento com a anterior, de obter resultados com mais veracidade é a utilização de dados considerados os mesmos do modelo utilizado para exemplo, como os elementos dos travões e algumas propriedades gerais dos pneus, como o coeficiente de fricção e a carga de referência de roda.

6. Conclusões

Neste trabalho foi possível cumprir parcialmente o primeiro objetivo delineado, a comparação dos resultados obtidos em software de simulação com os fornecidos. Os resultados obtidos para a simulação são de valor muito inferior aos fornecidos para comparação. Para conseguir fazer uma simulação sem qualquer erro, foi necessário alterar certos valores da tabela que corresponde ao mapa de consumos do motor, criando fontes de erro e prejudicial para o projeto. O segundo objetivo não se concretizou devido à dificuldade em obter diversos dados do motor, como o mapa de motor e as respetivas curvas para as diferentes motorizações de combustíveis necessárias para a comparação.

A informação sobre utilização do software de simulação AVL CRUISE M foi muito escassa. Apenas foram encontrados um ou dois documentos fora da página oficial que a disponibilizam, que limita e atrasa bastante a sua aprendizagem.

Para um projeto futuro, o foco principal será fazer uma otimização do método de simulação realizado e conseqüentemente simulações para mobilidades elétricas, híbridas e combustíveis alternativos. Estes objetivos requerem a utilização de um mapa de motor completo ou de um modelo do motor com todos os seus componentes.

Bibliografia

- ACEA. (2017). *www.wltpfacts.eu*. Obtido de WLTP Facts.EU: <https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>
- AVL. (2024). *AVL CRUISE™ M*. Obtido de AVL: <https://www.avl.com/en-es/simulation-solutions/software-offering/simulation-tools-a-z/avl-cruise-m>
- Bastos, D. F. (2019). *Análise sobre a influência da utilização de aditivos*. Leiria.
- Budinski, M. (30 de novembro de 2023). *HTEC*. Obtido de htecgroup.com: <https://htecgroup.com/6-reasons-why-you-should-use-simulation-in-autonomous-vehicle-software-development/>
- carinf.com. (s.d.). Obtido de [carinf.com](https://www.carinf.com): <https://www.carinf.com/en/4060414197.html>
- Cioroianu, C. C., & al, e. (2017). *Simulation of an electric vehicle model on the new WLTC test cycle using AVL CRUISE software*.
- Conselho da União Europeia. (12 de abril de 2024). *Euro 7: Conselho adota novas regras sobre limites de emissões para automóveis de passageiros, veículos comerciais ligeiros e camiões*.
- DieselNet. (julho de 2013). Obtido de DieselNet: https://dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- DieselNet. (janeiro de 2019). Obtido de <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- European Union. (2020). *Energy, transport and environment statistics*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Lv, H., Ling, J., & al, e. (2021). Research on Simulation System Model of Diesel Engine Applied to Virtual Calibration Development. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Martins, J. (2013). *Motores de Combustão Interna (Quarta Edição, revista e aumentada)*. (Publindústria, Ed.) (4a Edição). Engebook.
- Micoli, L., Coppola, T., & al, e. (2024). Modeling a Zero-Emissions Hydrogen-Powered Catamaran Ferry Using AVLCruise-M Software. *Journal of Marine Science and Engineering*.

- Nemes, D., Pálfi, T., & Hajdu, S. (2020). Vehicle Dynamic Simulation Possibilities Using AVL . *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*, 309-323.
- S. Tsiakmakis, B. C. (2017). *From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO2 emissions of light-duty vehicles*, EUR 28724 EN, Publications Office of the European Union, Luxemburgo. ISBN 978-92-79-71642-3, doi:10.2760/93419, JRC107662.
- Srinivasan, P., & M, K. U. (2009). *Performance Fuel Economy and CO2 Prediction of a Vehicle using AVL Cruise Simulation Techniques*. India.
- Stealth Motorsport UK. (2024). <http://www.stealthmotorsport.co.uk/>. Obtido de Stealth Motorsport UK: <http://www.stealthmotorsport.co.uk/wheeldiam.html>
- The Engineering Toolbox. (2003). *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*. Obtido de The Engineering Toolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- Workshop Manuals. (n.d.). Gear Ratios- VW., Obtido de Audi Workshop Service and Repair Manuals: https://workshop-manuals.com/audi/a3_mk2/power_transmission/6_speed_manual_gearbox_02q_front_wheel_drive/technical_data/gearbox_identification/code_letters_allocation_transmission_ratios_capacities/