

C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Projecto de Um Motor de Combustão Interna para Um Veículo Automóvel Utilitário**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Automóvel

**Autor**

**Hernâni Joaquim Tiago Pita**

**Orientador**

**Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho  
Professor Associado Agregado da Universidade de Coimbra, DEM-FCTUC

**Vogais** Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra, DEM-FCTUC  
Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra, DEM-FCTUC

**Coimbra, Setembro, 2011**

*Aos meus Pais e a minha Irmã.*

## Agradecimentos

Sem dúvida que a escrita desta tese não ficaria completa se não houvesse uma palavra de gratidão a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a sua concretização.

As primeiras palavras de agradecimento e gratidão são enviadas ao meu orientador Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira, pela sua motivação e incentivo na execução desta tese e ao longo do curso.

Aos meus familiares, queria agradecer o incentivo e o apoio. Especialmente aos meus pais... quero dizer-lhes obrigado por tudo, a eles devo a pessoa que hoje sou. Obrigada pela educação, pelas palavras e pelos exemplos. A minha irmã por todo o apoio e força que me transmite.

Agradeço à minha “família” da Mealhada que estavam sempre disponíveis para dar conselhos e apoio.

E por fim a todos os meus amigos que estavam sempre disponíveis para trocar ideias e conhecimentos.

## Resumo

O objectivo deste trabalho é encontrar qual o melhor motor de combustão interna para equipar um automóvel utilitário. Isto é alcançado através da análise dos resultados de um programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor, de um programa de simulação do ensaio NEDC (New European Driving Cycle) e de um programa de simulação do tempo que um automóvel precisa para acelerar desde o repouso até atingir uma dada velocidade pré-definida ou percorrer uma dada distância pré-definida.

Com estas ferramentas conseguimos prever o comportamento e o desempenho do automóvel. Os programas possibilitam a simulação de vários motores para alcançar uma conclusão fiável sobre a melhor escolha do motor.

São realizadas simulações do ciclo de funcionamento de cada motor de modo a conhecer as curvas características de cada um. As curvas são posteriormente introduzidas no programa de simulação de aceleração e no programa de simulação do ciclo NEDC.

Com os resultados obtidos com os programas analisamos qual o motor que melhor preenche os critérios estabelecidos de desempenho de um automóvel utilitário. Com estes resultados o motor que melhor satisfaz os critérios estabelecidos é o motor de três cilindros e 1021 cm<sup>3</sup> de cilindrada.

**Palavras-chave:** Automóvel, Motor de combustão interna, Simulação, Veículo, Consumo, Desempenho, NEDC.

## Abstract

The goal of this thesis is to find out which internal combustion engine is the best to power a city utility car. This is accomplished by analyzing the results of a simulation program of the engine operating cycle, a simulation program of the NEDC (New European Driving Cycle) test and a simulation program of the time an automobile needs to accelerate from rest to reach a given speed pre-defined or travel a given preset distance.

With these tools we can predict the performance and behavior of the automobile. The programs allow us to simulate several engines to obtain a reliable conclusion on the best choice for the engine.

Simulations of the operating cycle of each engine are performed in order to know the characteristic curves of each one. These curves are then introduced in the simulation program of the time an automobile needs to accelerate from rest to reach a given pre-defined speed or travel a given preset distance and in the simulation program of the NEDC test.

With the results of the programs we analyze which engine best meets the criteria of performance of a city utility automobile. With the results gathered from the programs, the engine that best fits a city utility automobile meeting the criteria established would be the three cylinder engine with 1021 cm<sup>3</sup> displacement volume.

**Keywords** Automobile, Internal combustion engine, Simulation, Vehicle, Consumption, Performance, NEDC.

## ÍNDICE

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia.....	ix
Símbolos gregos .....	x
Siglas .....	x
1. Introdução.....	1
2. Híbridos .....	3
2.1. Híbrido em paralelo .....	3
2.2. Híbrido em série.....	4
2.3. Híbrido misto .....	5
2.4. Veículos híbridos .....	6
2.4.1. Toyota.....	6
2.4.2. Honda .....	11
3. Considerações do projecto.....	17
3.1. Validação do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor.....	17
3.2. Validação do programa de simulação do ciclo NEDC .....	20
3.3. Validação do programa de simulação dos tempos de aceleração .....	20
4. Modelação do motor de combustão interna.....	22
4.1. Dados de entrada no programa .....	22
4.2. Dados de saída no programa .....	23
4.2.1. Parâmetros do programa de simulação .....	24
5. Ensaio de emissões e desempenho do veículo .....	28
5.1. Ciclo de condução NEDC.....	28
5.1.1. Descrição do procedimento do ciclo NEDC.....	28
5.1.2. Folha de cálculo para o ensaio NEDC.....	29
5.1.1. Resultados obtidos do NEDC .....	31
5.2. Ensaio de aceleração .....	32
5.2.1. Folha de cálculo do tempo de aceleração .....	32
5.2.2. Parâmetros do programa de simulação dos tempos de aceleração.....	33
5.2.3. Resultados dos ensaios .....	36
6. Seleção do MCI .....	45
6.1. Critérios de seleção do MCI .....	45
6.2. Comparação com os MCI semelhantes no mercado.....	47
7. Conclusões.....	50
8. Referências bibliográficas .....	51
Anexo .....	53
Relações de caixa.....	53
Relações de transmissão para o MCI de 4 cilindros.....	53

---

Relações de transmissão para o MCI de 3 cilindros .....	54
Relações de transmissão para o MCI de 2 cilindros .....	55
Variáveis fixas na simulação do tempo de aceleração e no do ciclo NEDC .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo do sistema de propulsão híbrido em paralelo [2].	3
Figura 2 – Esquema representativo do sistema de propulsão híbrido em série [3].	4
Figura 3 – Esquema do sistema de propulsão híbrido misto [4].	6
Figura 4 – Toyota Prius [8].	7
Figura 5 – Diagrama do sistema de propulsão do híbrido Prius [5].	8
Figura 6 – Toyota Previa 3ª geração [9].	9
Figura 7 – Esquema de propulsão no híbrido Previa [5].	9
Figura 8 – Toyota Crown [10].	10
Figura 9 – Representação esquemática do sistema de propulsão do híbrido Crown [5].	11
Figura 10 – Honda Insight[11].	12
Figura 11 – Imagem do motor elétrico usado pelo Insight [13].	13
Figura 12 – Imagem do MCI do Honda Insight [14].	14
Figura 13 – Ilustração esquemática do Honda Civic [1].	15
Figura 14 – Curvas de binário e consumo específico do motor TU3JP-KFW.	18
Figura 15 – Relação entre $bsfc/bsfc_{min}$ e $Tb_{máx}/Tb$ para uma rotação do motor.	19
Figura 16 – Declive e ordenada na origem da reta de consumo específico adimensional em função do binário adimensional do MCI TU3JP-KFW.	19
Figura 17 – Imagem da folha de cálculo do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor.	23
Figura 18 – Ciclo de trabalho de um motor a quatro tempos IF [22].	24
Figura 19 – Curvas do binário e consumo específico do MCI de 2 cilindros.	26
Figura 20 – Curvas do binário e consumo específico do MCI de 3 cilindros	27
Figura 21 – Curvas do binário e consumo específico do MCI de 4 cilindros	27
Figura 22 – Imagem do ciclo NEDC.	29
Figura 23 – Folha de cálculo do programa de simulação do ciclo NEDC.	30
Figura 24 – Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> em g/km com a massa do automóvel e a cilindrada do motor.	32
Figura 25 – Imagem da folha de cálculo usada para ensaios de aceleração.	33
Figura 26 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-100 km/h com a massa do automóvel para o MCI de 2 cilindros.	37
Figura 27 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-100 km/h com a massa do automóvel para o MCI de 3 cilindros.	37
Figura 28 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-100 km/h com a massa do veículo para o MCI de 4 cilindros.	38
Figura 29 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-400 m com a massa do veículo para o MCI de 2 cilindros.	39



---

Figura 30 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-400 m com a massa do veículo para o MCI de 3 cilindros.....	40
Figura 31 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-400 m com a massa do veículo para o MCI de 4 cilindros.....	41
Figura 32 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-1000 m com a massa do veículo para o MCI de 2 cilindros.....	42
Figura 33 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-1000 m com a massa do veículo para o MCI de 3 cilindros.....	43
Figura 34 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-1000 m com a massa do veículo para o MCI de 4 cilindros.....	44
Figura 35 – Resultados do ensaio de tempo de 0-100 km/h para os vários veículos. ....	45
Figura 36 – Resultados das emissões de CO <sub>2</sub> para os vários veículos no ensaio NEDC. ...	46

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do híbrido Prius [4].	8
Tabela 2 – Especificações do híbrido Previa [4].	10
Tabela 3 – Especificações do híbrido Crown [6].	11
Tabela 4 – Especificações do híbrido Honda Insight.	14
Tabela 5 – Especificações do híbrido Honda Civic [1].	16
Tabela 6 – Potência máxima e binário máximo do motor Peugeot TU3JP-KFW. Resultados da simulação e valores anunciados pelo fabricante.	18
Tabela 7 – Consumo de combustível e emissões de CO <sub>2</sub> . Resultados da simulação e valores anunciados pelo fabricante.	20
Tabela 8 – Tempo de aceleração nos ensaios 0-100 km/h, 0-400 m e 0-1000 m. Resultados da simulação e valores anunciados pelo fabricante.	21
Tabela 9 – Características dos motores que foram ensaiados.	26
Tabela 10 – Dados técnicos do motor que preenche os critérios de escolha.	47
Tabela 11 – Dados técnicos do Toyota Aygo, adaptado [17].	48
Tabela 12 – Dados técnicos do Honda Insight, adaptado [14].	48
Tabela 13 – Dados técnicos do Kia Picanto [18].	49
Tabela 14 – Relações da caixa de velocidades do Peugeot 206.	53
Tabela 15 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para o mínimo emissões de CO <sub>2</sub> em gCO <sub>2</sub> /km.	54
Tabela 16 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para menor tempo de aceleração 0-100 km/h.	54
Tabela 17 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para o mínimo emissões de CO <sub>2</sub> em gCO <sub>2</sub> /km.	54
Tabela 18 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para menor tempo de aceleração 0-100 km/h.	54
Tabela 19 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para o mínimo de emissões de CO <sub>2</sub> em gCO <sub>2</sub> /km.	55
Tabela 20 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para menor tempo de aceleração 0-100 km/h.	55
Tabela 21 – Variáveis fixas nas simulações dos tempos de aceleração e nas simulações do ciclo NEDC.	55

## SIMBOLOGIA

$A_f$	Área frontal, m <sup>2</sup>
$bsfc$	Consumo específico de combustível ao freio do motor, g/kW·h
$b MEP$	Pressão média efetiva ao freio, Pa
$B$	Diâmetro do cilindro, m
$d$	Distância, m
$d_{ciclo}$	Distância do ciclo, km
$d_{ECE}$	Distância do ciclo urbano no ciclo NEDC, km
$d_{NEDC}$	Distância do ciclo extra-urbano no ciclo NEDC, km
$E_i$	Energia mecânica, J
$F_d$	Força de arrasto, N
$F_{prop}$	Força de propulsão, N
$F_r$	Força de rolamento, N
$F_{trav}$	Força de travagem, N
$g$	Aceleração normal da gravidade, 9,80665 m/s <sup>2</sup>
$h$	Altura, m
$h_{CG}$	Altura do centro de gravidade do veículo, m
$I_{RFD}$	Momento de inércia da roda dianteira direita, kg·m <sup>2</sup>
$I_{RFE}$	Momento de inércia da roda dianteira esquerda, kg·m <sup>2</sup>
$I_{RTD}$	Momento de inércia da roda traseira direita, kg·m <sup>2</sup>
$I_{RTE}$	Momento de inércia da roda traseira esquerda, kg·m <sup>2</sup>
$L$	Curso do êmbolo, m
$l_{CG}$	distância entre o plano vertical que contem o eixo das rodas da frente e o plano vertical que contem o centro de gravidade do veículo, m
$m_{v,total}$	Massa total do veículo, kg
$M$	Massa molar, kg/mol
$M_{CO_2}$	Massa molar do CO <sub>2</sub> , kg/mol
$m_{f,ciclo}$	Massa de combustível consumida no ciclo, kg
$m_{f,i}$	Massa de combustível, kg

$n$	Velocidade de rotação da cambota, rpm
$p$	Pressão no cilindro, Pa
$\bar{T}_b$	Binário ao freio do motor, N·m
$V$	Volume do cilindro, m <sup>3</sup>
$V_{d,cil}$	Cilindrada de um cilindro, m <sup>3</sup>
$W_{b,i}$	Trabalho produzido pelo motor, J
$W_{c,in}$	Trabalho realizado no ciclo, J
$y$	Relação entre o número de átomos de hidrogénio e de carbono num hidrocarboneto

### Símbolos gregos

$\alpha$	Ângulo de inclinação longitudinal da estrada, rad
$\beta$	Ângulo de inclinação transversal da estrada, rad
$\rho_{ar}$	Massa volúmica do ar, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f$	Massa volúmica do combustível, kg/m <sup>3</sup>

### Siglas

CFM – Ciclo de Funcionamento do Motor

CVT – Transmissão Contínua Variável

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IMA – Integrated Motor Assist

IPU – Unidade de Potência inteligente

MCI – Motor de Combustão Interna

NEDC – New European Driving Cycle

PCU – Unidade de Controlo de Potência

THS – Toyota Hybrid System

THS-C – Toyota Hybrid System CVT

THS-M – Toyota Hybrid System Mild

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que a população mundial cresce a quantidade de veículos automóveis a circular nas estradas também tem tendência para aumentar. O automóvel tem-se tornado um bem essencial para o homem. Atualmente não é comum encontrar famílias que não tenham no mínimo um veículo em casa, e à medida que a família vai crescendo o parque automóvel também aumenta.

Face às mudanças climáticas mundiais a economia global esforça-se para utilizar fontes de energia e processos de conversão de energia mais limpos. O mundo industrial estuda formas de energia alternativas mais limpas em relação às formas de energia utilizadas atualmente. Como o automóvel, contribui com uma percentagem considerável para a poluição do ar, isto leva os grandes fabricantes da indústria automóvel a procurar soluções viáveis que permitam reduzir as emissões dos veículos, e ao mesmo tempo diminuir o consumo de combustíveis fósseis.

Há diferentes formas de diminuir o consumo de combustíveis fósseis nos automóveis. Uma das formas consiste em reduzir o consumo de energia do veículo ao deslocar-se.

Pode reduzir-se o consumo de energia do veículo ao deslocar-se reduzindo a massa do veículo, diminuindo o arrasto aerodinâmico do veículo quer através da redução da área frontal do veículo quer através da redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico baseado na área frontal do veículo e utilizando pneus com menor coeficiente de resistência ao rolamento. A outra forma de diminuir o consumo de combustíveis fósseis consiste em aumentar a eficiência energética do grupo motopropulsor do veículo. O aumento da eficiência do grupo motopropulsor pode ser conseguido otimizando a eficiência de conversão da energia química do combustível em energia mecânica quer melhorando a eficiência energética do sistema de transmissão quer adequando o grupo motopropulsor ao veículo onde se pretende aplicar o mesmo. Outra forma de reduzir o consumo de combustíveis fósseis consiste em recorrer à propulsão elétrica em conjunto com o motor de combustão interna. O consumo de combustíveis fósseis pode ser eliminado recorrendo exclusivamente à propulsão elétrica mas esta abordagem tem um custo elevado e apresenta problemas de autonomia dos veículos que a utilizam. Todas estas formas de diminuir o

consumo de combustíveis fósseis nos automóveis constituem áreas atuais de investigação e desenvolvimento.

Os combustíveis presentemente utilizados nos motores de combustão interna são gasolina, gasóleo, metanol e gás natural. O MCI (motor de combustão interna) transforma a energia química do combustível em energia mecânica para movimentar o veículo. Isto é obtido porque o motor usa a expansão da mistura ar-combustível queimada na câmara de combustão para se movimentar.

O MCI é um dos órgãos de qualquer veículo que mais potencialidades têm para influenciar as suas emissões. É fundamental conhecer o funcionamento do motor e conseguir prever o seu comportamento quando este for equipado em qualquer veículo. Para poder fazer isso foi usado um programa desenvolvido pelo Professor Doutor Pedro Carvalheira.

O programa simula o ciclo de funcionamento e comportamento de qualquer MCI de ciclo 4 tempos, de ignição por faísca, atmosférico em todo o seu domínio de utilização, definido por pares de binário ao freio e velocidade de rotação do motor. O programa permite obter os resultados essenciais que depois de serem analisados, permitem concluir qual é o melhor motor para equipar o veículo.

Para prever as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km no ciclo NEDC foi utilizado um programa de simulação que utiliza as características do veículo e as curvas de funcionamento do motor, obtidas através do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor.

Para prever os tempos de aceleração de 0-100 km/h, 0-400 m e 0-1000 m foi utilizado um programa de simulação que utiliza as características do veículo e as curvas de funcionamento do motor, obtidas através do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor.

## 2. HÍBRIDOS

Os veículos híbridos eléctricos que estão presentemente em circulação nas estradas podem descrever-se como possuindo um motor a gasolina ou gasóleo, ao qual é acoplado um gerador para carregar baterias que também se incluem no veículo. Estes veículos têm ainda um motor eléctrico para efetuar a propulsão eléctrica. Por vezes o motor eléctrico e o gerador são a mesma máquina. Os veículos híbridos eléctricos podem ser classificados em três grupos principais: híbridos em paralelo, híbridos em série e híbridos mistos.

### 2.1. Híbrido em paralelo

O veículo híbrido eléctrico em paralelo tem um arranjo dos componentes do sistema de propulsão que permite que este possa utilizar o motor de combustão interna ou o motor eléctrico para se movimentar, assim pode-se trabalhar na zona de funcionamento óptimo de ambos os sistemas de propulsão. O veículo pode movimentar-se somente com uma das formas de energia ou dependendo da necessidade também podem ser utilizadas em simultâneo para atingir a potência máxima [1].

A Figura 1 é um esquema ilustrativo que representa o sistema de propulsão de um veículo híbrido em paralelo. O esquema mostra os componentes utilizados mais relevantes neste tipo de híbrido. Como só um motor eléctrico está integrado no sistema, o veículo não pode ser propulsionado electricamente enquanto a bateria é carregada. O motor eléctrico só pode ser operado ou como motor eléctrico ou como gerador mas nunca desempenhando as duas funções simultaneamente.

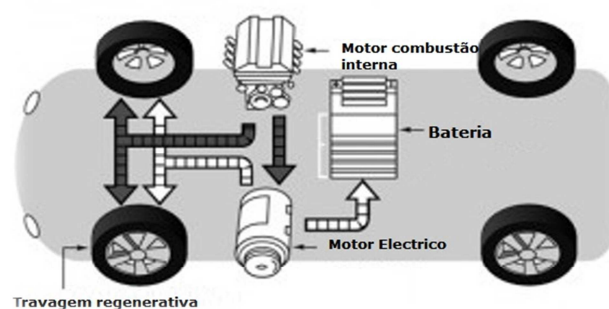


Figura 1 – Esquema representativo do sistema de propulsão híbrido em paralelo [2].

O veículo híbrido eléctrico em paralelo tem a vantagem de poder oferecer uma maior eficiência em condições de condução constante, como por exemplo em auto-estrada, quando a velocidade se mantém estável. Nesta condição o carro pode ser movido exclusivamente com o motor de combustão interna, e o motor eléctrico ser usado para as deslocações citadinas.

## 2.2. Híbrido em série

Num veículo híbrido em série o motor de combustão interna é utilizado somente para alimentar o gerador para este carregar as baterias. A energia das baterias é depois usada pelo motor eléctrico para pôr em movimento o veículo.

A Figura 2 é um esquema ilustrativo que representa o sistema de propulsão híbrido em série. O esquema tem os componentes mais importantes utilizados neste tipo de veículo híbrido.

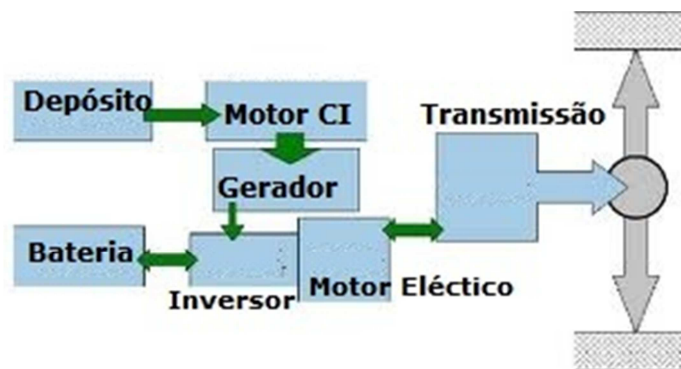


Figura 2 – Esquema representativo do sistema de propulsão híbrido em série [3].

O veículo híbrido eléctrico em série tem a vantagem de tirar partido da maior eficiência do MCI. Como este é usado exclusivamente para carregar as baterias, pode estar sempre a funcionar no regime de maior eficiência energética. Este sistema tem mais vantagem em percursos de cidade porque num automóvel com um sistema de propulsão convencional o MCI opera sempre em condições de baixa eficiência energética. A desvantagem deste sistema é quando o queremos usar em auto-estrada. Como é movido com o motor eléctrico, o motor de combustão interna limita-se a transformar a energia do combustível em energia mecânica que é posteriormente convertida em energia eléctrica pelo gerador sendo esta energia eléctrica depois convertida em energia mecânica no motor eléctrico para propulsionar o automóvel. A energia mecânica produzida pelo motor de



combustão interna nunca é usada diretamente para efetuar a propulsão do veículo. Num automóvel com um sistema de propulsão convencional o MCI opera em condições de alta eficiência energética ao propulsioná-lo numa auto-estrada e como o funcionamento deste sistema obriga a várias transformações de energia mecânica em eléctrica e vice-versa temos sempre perdas de energia em cada um desses processos de transformação o que torna este sistema menos eficiente nesta condição de funcionamento relativamente a um sistema de propulsão convencional [1].

### 2.3. Híbrido misto

Num veículo híbrido eléctrico misto os dois modos de funcionamento dos veículos híbridos eléctricos apresentados anteriormente são combinados para tirar partido das vantagens de cada um. Este é um modo complexo para aplicar os sistemas de propulsão híbridos eléctricos.

Num veículo híbrido eléctrico misto utiliza-se uma transmissão planetária que permite que uma parte da potência produzida pelo MCI seja dirigida diretamente para ser utilizada nas rodas para propulsionar o veículo e a restante potência seja convertida pelo alternador em energia eléctrica e, opcionalmente, armazenada numa bateria de elevada tensão ou direcionada diretamente para o motor eléctrico para propulsão do veículo.

Num veículo híbrido misto o motor de combustão interna e o motor eléctrico podem ser utilizados separadamente ou em simultâneo para movimentar o automóvel. O que diferencia este sistema é a possibilidade de em simultâneo a potência produzida pelo motor de combustão interna poder ser utilizada para propulsionar o veículo mecanicamente, e para acionar um alternador cuja energia eléctrica produzida pode ser utilizada simultaneamente para carregar a baterias e para acionar um motor eléctrico que propuliona o veículo. Dependendo das condições de operação o modo de propulsão do veículo que permite minimizar o consumo de combustível é seleccionado pelo sistema de gestão do veículo automaticamente. Por exemplo, em cidade pode ter mais vantagem a utilização somente do motor eléctrico para propulsionar o veículo porque o MCI é menos eficiente em condições de utilização que impliquem uma potência produzida baixa. Em circulação em auto-estrada pode ter mais vantagem a utilização somente do MCI para propulsionar o veículo porque o MCI é mais eficiente em condições de utilização que impliquem uma potência média.

A Figura 3 representa o esquema e os componentes que se encontram num híbrido misto.

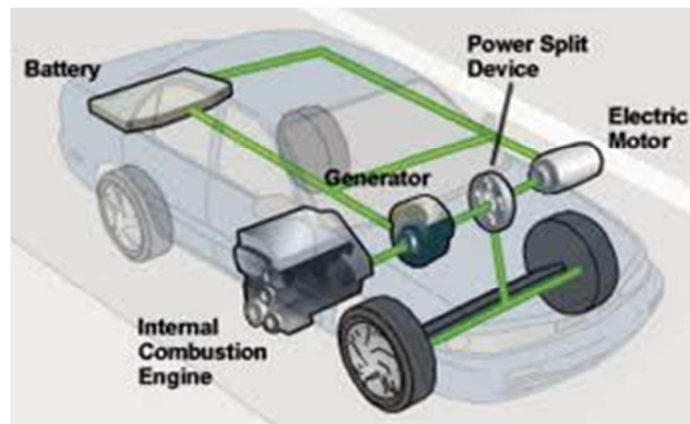


Figura 3 – Esquema do sistema de propulsão híbrido misto [4].

## 2.4. Veículos híbridos

Vários fabricantes automóveis têm introduzido veículos híbridos elétricos no mercado com sucesso. À medida que os anos passam os grandes fabricantes de automóveis tentam fabricar veículos mais verdes e económicos para melhor aproveitarem os recursos que temos ao nosso dispor. A secção seguinte descreve modelos de automóveis híbridos elétricos lançados no mercado por alguns fabricantes e em circulação. Os veículos descritos enquadram-se em duas categorias de veículos híbridos: híbrido em paralelo ou híbrido misto.

### 2.4.1. Toyota

A Toyota lançou o Prius, o híbrido mais conhecido, em 1997 no Japão e em 2000 no mercado Europeu e Americano. Para o mercado japonês também foram criados mais dois modelos, o Previa e o Crown. A Toyota tem presentemente mais de 100000 unidades de veículos híbridos em circulação. Para estes modelos a Toyota desenvolveu sistemas diferentes de gestão da energia, o THS (Toyota Hybrid System) para o Prius, THS-C (Toyota Hybrid System CVT) para o Previa, e o THS-M (Toyota Hybrid System Mild) para o modelo Crown [4, 5, 6, 7].

#### 2.4.1.1. Toyota Prius

O Prius da Toyota possui duas fontes de energia para mover o automóvel, dependendo das condições de circulação. Uma fonte de energia consiste num MCI de 1,5 litro, produzindo 53 kW de potência máxima às 4500 rpm e com o binário máximo de 115 N·m às 4200 rpm, a outra fonte de energia é um motor eléctrico de ímanes permanentes com uma potência máxima de 33 kW na gama de velocidade 940-2000 rpm. O motor de combustão interna é a sua maior fonte de energia.

A Figura 4 apresenta o híbrido Prius da Toyota.



Figura 4 – Toyota Prius [8].

A Figura 5 apresenta o diagrama esquemático que representa o sistema de propulsão do veículo híbrido Prius da Toyota. Este sistema é sistema híbrido eléctrico misto. A potência produzida pelo motor de combustão interna é repartida para as rodas, para poder movimentar o automóvel, e para o gerador através de um trem de engrenagens planetárias. Dependendo das exigências da condução, a potência gerada pelo motor pode ser usada para somente movimentar o automóvel, ser dividida entre as rodas e o gerador, ou ser usada para alimentar só o gerador. O MCI também pode ser desligado e a propulsão ser assegurada pelo motor eléctrico alimentado pelas baterias, se estas tiverem com carga suficiente [5].

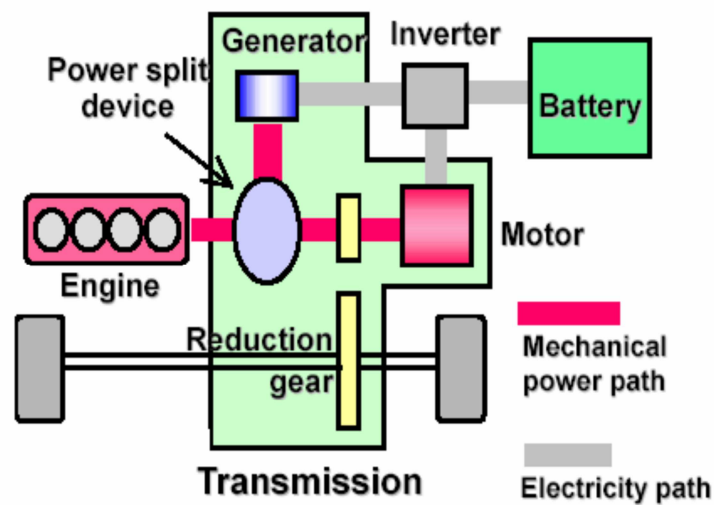


Figura 5 – Diagrama do sistema de propulsão do híbrido Prius [5].

A Tabela 1 apresenta algumas das características mais significativas do híbrido Prius. Tem as características do MCI como o binário máximo e a potência máxima. Também inclui especificações do motor elétrico e da bateria usada neste híbrido.

Tabela 1 – Especificações do híbrido Prius [4].

Massa	1220 kg
Bateria	21 kW, 274 V, 6,5 Ah
Gerador/Motor elétrico	33 kW às 940-2000 rpm
MCI potência máxima	53 kW às 4500 rpm
MCI interna binário máximo	115 N·m às 4200 rpm

#### 2.4.1.2. Toyota Previa

O sistema THS-C, que a Toyota tem implementado no seu híbrido Previa, é destinado ao segmento monovolume no Japão. O sistema usado no Previa é baseado no sistema THS utilizado no Prius, mas com a adição de um motor elétrico no eixo traseiro para fornecer potência às rodas de trás, criando assim uma unidade de tração traseira que é mecanicamente independente do sistema dianteiro [4, 5]. A Figura 6 apresenta o Toyota Previa da 3ª geração, o híbrido do segmento monovolume criado pela marca para o mercado automóvel Japonês.



Figura 6 – Toyota Previa 3ª geração [9].

A Figura 7 é um esquema representativo do sistema de propulsão híbrido do Previa. O esquema mostra os componentes principais do sistema, a sua localização e o modo como estão interligados. No esboço também estão assinalados os fluxos de energia mecânica e de energia elétrica.

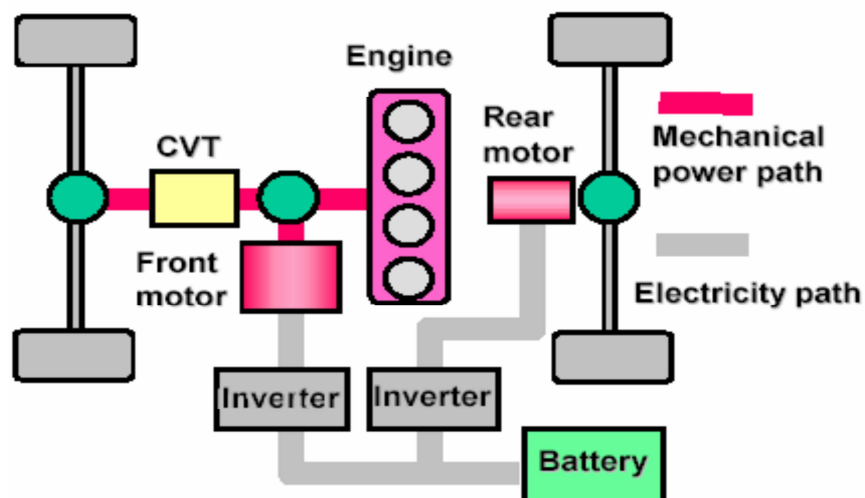


Figura 7 – Esquema de propulsão no híbrido Previa [5].

Isto resulta na concepção de um automóvel com tração às quatro rodas que satisfaz as necessidades de um monovolume. O eixo dianteiro incorpora uma CVT (Transmissão Contínua Variável) que proporciona uma condução suave [4, 5].

A Tabela 2 apresenta algumas das características mais relevantes do híbrido Previa. Esta tabela tem a massa do veículo, regime do MCI, e as características de alguns dos seus componentes elétricos.

Tabela 2 – Especificações do híbrido Previa [4].

Massa	1850 kg
Potência máxima MCI	96,0 kW às 4500 rpm
Binário máximo MCI	190,0 N·m às 4200 rpm
Bateria	216 V, 6,5 Ah
Gerador/Motor elétrico dianteiro	13,0 kW
Gerador/Motor elétrico traseiro	18,0 kW

#### 2.4.1.3. Toyota Crown

O Toyota Crown é um veículo híbrido elétrico introduzido no mercado automóvel Japonês para o segmento de luxo. O sistema deste híbrido é diferente dos anteriormente mencionados, no sentido que o motor/gerador não serve para pôr em movimento o automóvel. Ele é utilizado para fornecer potência ao equipamento auxiliar como o ar condicionado, direção assistida, e também é utilizado para recuperar a energia que seria perdida nas desacelerações e travagens. Também é usado para pôr o motor de combustão interna a trabalhar na sequência do start/stop. O sistema start/stop consiste em desligar o motor de combustão interna quando o automóvel se encontra parado no trânsito, e quando o condutor quer iniciar a marcha o sistema tem capacidade para pô-lo de imediato a funcionar para continuar a sua circulação [6, 7].

A Figura 8 apresenta o híbrido Crown da Toyota.



Figura 8 – Toyota Crown [10].

Este híbrido da Toyota também opera com um sistema diferente dos dois anteriormente descritos. A Figura 9 é o esquema do sistema denominado THS-M. Neste

o sistema o motor/gerador está ligado ao motor de combustão interna via uma correia. O motor/gerador está ligado a uma unidade inversora, que se encontra ligada à bateria. Este sistema possui uma bateria com 42 V de tensão, ela é tão elevada para poder suportar as exigências de potência que o sistema lhe solicita [5, 6]

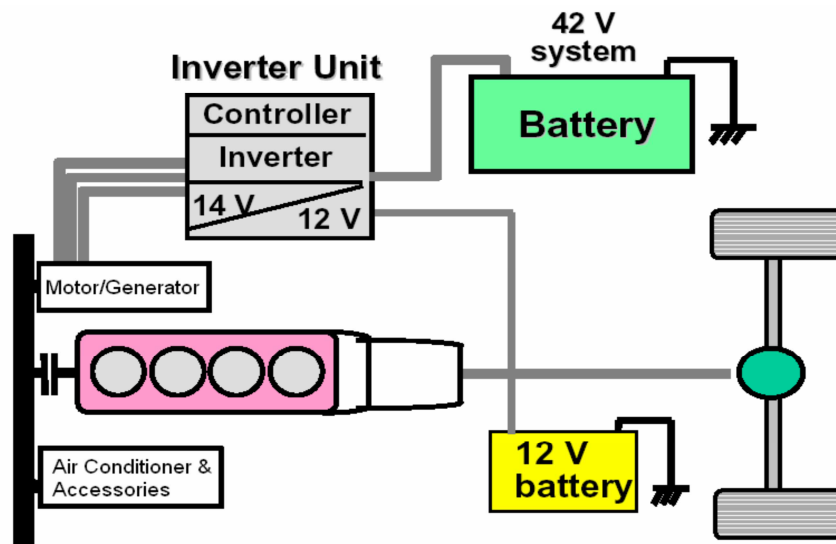


Figura 9 – Representação esquemática do sistema de propulsão do híbrido Crown [5].

A Tabela 3 tem as características mais significativas do híbrido Crown. A tabela inclui qual o MCI aplicado neste híbrido com o desempenho do mesmo. Também expõe o tipo de motor elétrico usado, o binário do mesmo e a tensão a que opera.

Tabela 3 – Especificações do híbrido Crown [6].

Motor de combustão interna	3,5 litro V-type 6 cilindros
Potência máxima	218 kW às 6400 rpm
Binário máximo	368 N·m às 4800 rpm
Motor elétrico	AC Motor Síncrono
Tensão	42 V
Binário máximo	56,0 N·m (0-300 rpm)
Velocidade máxima permitida	15000 rpm
Modo de arrefecimento	Ar

### 2.4.2. Honda

A Honda tem atualmente três veículos híbridos elétricos no mercado, o Insight Hybrid, o Civic Hybrid Sedan e o CR-Z Sport Hybrid. Todos os modelos usam o sistema

da Honda IMA (Integrated Motor Assist). O Insight foi o primeiro a ser lançado por este fabricante em 1999, seguido pelo Civic em 2002 e pelo CR-Z em 2010. O modelo Insight comercializado atualmente, a 2ª geração, foi lançado no mercado em 2010. Mesmo usando o mesmo sistema as prestações são diferentes, o Insight de 1ª geração consome 3,4 L/100 km enquanto o Civic consome 4,6 L/100 km [1, 12]

#### 2.4.2.1. Honda Insight

A Figura 10 é uma imagem do híbrido Insight da Honda



Figura 10 – Honda Insight[11].

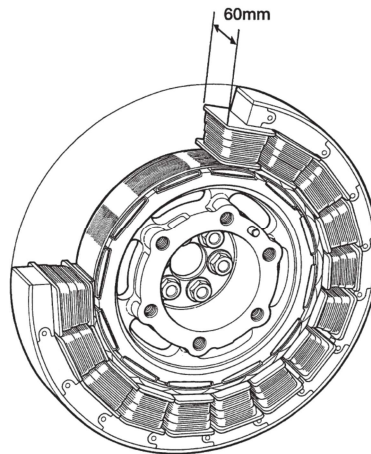
O Honda Insight, utiliza o sistema (IMA), composto por motor a gasolina de elevada eficiência, motor elétrico e transmissão manual de 5 velocidades, em combinação com um corpo de alumínio leve e aerodinâmico. Com este conjunto proporciona-lhe uma aceleração dos 0-100 km/h em cerca de 12 segundos e uma velocidade máxima de 180 km/h.

O acionamento elétrico consiste num motor elétrico fino com cerca de 60 mm de espessura como demonstra a Figura 11, ele está diretamente ligado ao eixo da cambota. O Insight também contém baterias de níquel hidreto metal (Ni-MH) com uma potência total de 144 V e pesando aproximadamente 20 kg. e um unidade de controlo eletrónico de potência (PCU). O motor elétrico recebe energia das baterias durante a aceleração para aumentar o desempenho do motor, com isto o comportamento do motor fica ao nível de um motor a gasolina de 1,5 litro, também atuando como um gerador durante a desaceleração para recarregar as baterias. Com um aumento potência de 50-56 kW com o motor auxiliar,



mas o maior benefício é binário a baixa velocidade, que vai de 91 N·m a 4800 rpm para 113 N·m às 1500 rpm com a ajuda do motor elétrico [13].

A Figura 11 é uma representação do motor elétrico utilizado no Honda Insight. A figura indica a espessura do mesmo e o seu formato.



**Figura 11 – Imagem do motor elétrico usado pelo Insight [13].**

As seguintes características fazem com que o Insight tenha um coeficiente aerodinâmico de 0,25. Massa de cerca de 850 kg, nariz aerodinâmico, baixa altura e telhado cónico e comprido. Baixa resistência aerodinâmica, rodas de alumínio, uma inferior plana, e uma traseira projetada para reduzir a área de separação de ar, pneus com baixa resistência ao rolamento que foram criados para oferecer uma boa circulação. Todas estas características ajudam o Insight a circular usando o mínimo de energia possível.

Outra medida de economia de combustível adicional utilizada pela marca é o sistema start/stop. Com todas estas medidas de redução de massa, melhoramento da aerodinâmica, e redução da resistência ao rolamento contribuir para aproximadamente 35% do aumento na eficiência do consumo de combustível. Com o sistema IMA a marca consegue um aumento de eficiência do consumo de combustível em comparação com o Honda Civic 1,5 litro de 65% [13].

Na Tabela 4 temos algumas das características mas importantes do híbrido Insight da Honda. A tabela contém qual o MCI aplicado neste híbrido, também tem as especificações do desempenho do mesmo. Outro aspecto do híbrido que se pode verificar na tabela é o tipo de bateria nele aplicado, o motor elétrico usado, e a potência do mesmo. Também tem os tipos de transmissão que se pode encontrar neste híbrido.

Tabela 4 – Especificações do híbrido Honda Insight.

Motor	Motor 3 cilindros 1,0 litro gasolina Binário máximo 91,0 N·m às 4800 rpm
Transmissão	Transmissão Contínua Variável (CVT) ou Transmissão Manual (MT)
Motor elétrico (assistência)	Motor DC sem escovas Potência máxima: 10,0 kW
Bateria	Nickel Metal Hydride (Ni-MH)

A Figura 12 é a imagem do motor do Honda Insight. Na figura verificar-se a localização do motor elétrico em relação ao MCI.



Figura 12 – Imagem do MCI do Honda Insight [14].

#### 2.4.2.2. Honda Civic Hybrid

Outro híbrido da Honda é o Civic. Na Figura 13 é uma ilustração esquemática dos componentes no Civic Hybrid. Pode-se ver que o motor de combustão interna e a transmissão situam-se na dianteira do automóvel. Os componentes IPU (Unidade de Potência inteligente), e o PCU (Unidade de Controlo de Potência) que controla o motor elétrico estão colocados na traseira do automóvel.

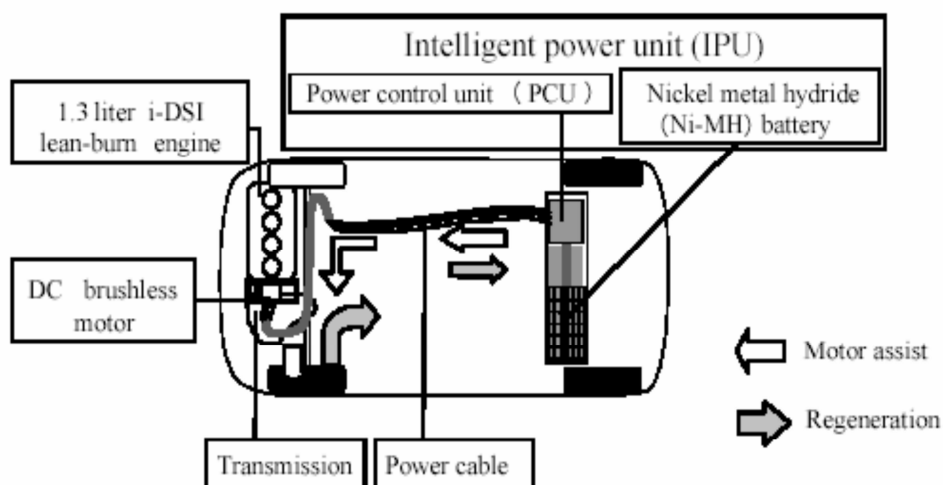


Figura 13 – Ilustração esquemática do Honda Civic [1].

Para aumentar a eficiência do sistema foram usadas três técnicas.

1. Aceleração assistida, travagem regenerativa,
2. Start/Stop,
3. Regime de MCI mais estável.

Convencionalmente, a energia cinética é perdida por atrito e travagem do motor durante a desaceleração. Ao utilizar o motor elétrico como gerador, a energia que seria de outra forma perdida pode ser recuperada e transformada em energia elétrica útil, e pode ser usado durante a aceleração, aumentando assim a eficiência do MCI. Em segundo lugar, ao desligar o motor durante a paragem do automóvel, o combustível não é consumida, e assim reduz o consumo desnecessário de combustível

Por fim, tendo um motor elétrico para auxiliar o do MCI, torna possível alcançar o desempenho dinâmica exigido. Permitindo manter o regime do motor mais estável e no ponto de menor consumo de combustível, diminui-se o consumo e emissões do MCI.

Na Tabela 5 temos algumas das características mas importantes do híbrido Civic da Honda. A tabela inclui o MCI aplicado neste híbrido, também tem as especificações do desempenho do mesmo, como o binário máximo. Outro aspecto do híbrido que se pode confirmar na tabela é o tipo de bateria nele aplicado. Também nela está incluído o tipo de motor elétrico usado, e a potência do mesmo.

Tabela 5 – Especificações do híbrido Honda Civic [1].

Motor	Motor 4 cilindros 1,3 litro gasolina Potência máxima: 63,0 kW às 5700 rpm
Transmissão	Transmissão Contínua e Variável (CVT) ou Transmissão Manual
Motor elétrico (regeneração)	Potência máxima: 12,3 kW (MT), 12,6 kW (CVT) Binário máximo 108 N·m
Motor elétrico (assistência)	Motor DC Potência máxima: 10,0 kW Binário máximo 103,0 N·m
Bateria	Nickel Metal Hydride (Ni-MH)

### 3. CONSIDERAÇÕES DO PROJECTO

Com base em literatura disponível acerca de veículos híbridos, e em que tipos de regimes são mais vantajosos a sua utilização. Iniciou-se a base de estudo para qual será a escolha do motor de combustão interna e o sistema híbrido mais adequado para ser concebido e usado num automóvel.

Tendo como base o motor da Peugeot TU3JP-KFW com a cilindrada  $1361 \text{ cm}^3$ , que é usado em vários modelos da marca que tem um bom desempenho. Foram introduzidos os dados do MCI no programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor. O programa com as características do motor, e com as leis do comportamento termodinâmico e de mecânica do fluido que ocorrem em qualquer MCI de 4 tempos ignição por faísca ciclo Otto, permite ter com precisão o comportamento do motor em todo o seu regime, desde o binário máximo ao freio, consumo específico ao freio, e o desempenho do motor a diferentes cargas.

Para poder obter todo o desempenho do motor também são necessárias algumas características do próprio automóvel onde ele pode ser utilizado. Assim foram utilizados dados do automóvel estudado na tese de mestrado de Rui Câmara [19], como a área frontal do veículo e o coeficiente aerodinâmico do automóvel. Os valores são introduzidos nos programas de simulação para poder prever o desempenho dos motores ensaiados.

#### 3.1. Validação do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor

O programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor, para ter poder ser utilizado para obter resultados credíveis, foi testado com um motor com um desempenho e características conhecidas. O motor que foi utilizado no programa foi o TU3JP-KFW da Peugeot com a cilindrada de  $1361 \text{ cm}^3$ . Este motor equipa muitos modelos deste fabricante, mas o modelo que vai ser utilizado nesta tese é o Peugeot 206.

Na Figura 14 temos as curvas do binário ao freio e do consumo específico ao freio do motor TU3JP-KFW da Peugeot testado no programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor.

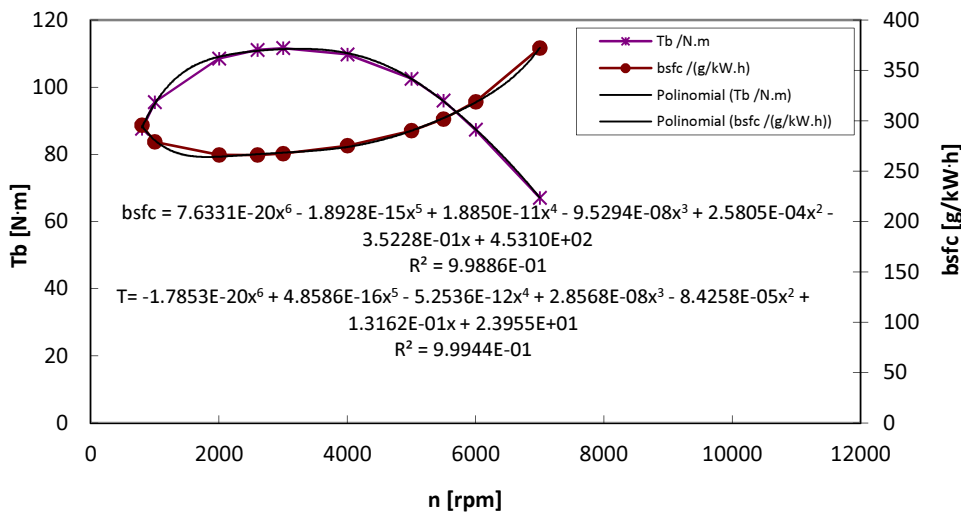


Figura 14 – Curvas de binário e consumo específico do motor TU3JP-KFW.

A Tabela 6 tem o resultado do binário máximo e a potência máxima para o motor TU3JP-KFW da Peugeot da simulação do ciclo de funcionamento. Com uma diferença mínima entre os valores anunciados pelo fabricante e os resultados obtidos através da simulação, temos confiança na utilização do programa para caracterizar qualquer MCI de ignição por faísca atmosférico.

Tabela 6 – Potência máxima e binário máximo do motor Peugeot TU3JP-KFW. Resultados da simulação e valores anunciados pelo fabricante.

	TU3JP-KFW real	TU3JP-KFW simulação
Potência máxima [kW] às [rpm]	55 às 5500	55,39 às 5500
Binário máximo [N.m] às [rpm]	110 às 2600	111,64 às 3000

Para conhecer também o comportamento do motor com a variação do acelerador foi feita uma relação entre o consumo específico ao freio mínimo e o consumo específico ao freio com a variação da posição do acelerador ou variação da pressão na válvula de admissão. Também é considerada a relação entre o binário máximo ao freio do motor com o binário ao freio com a variação da pressão na válvula de admissão. A variação da pressão na válvula de admissão é 0 kPa quando o motor esta em aceleração máxima e aumenta a pressão a medida que se diminui a aceleração.

A Figura 15 é o gráfico que relaciona para uma determinada rotação do motor a variação entre as relações  $bsfc/bsfc_{min}$  e  $Tb_{max}/Tb$ . As relações têm todas como o ponto

de partida (1,1) e a relação entre elas vai aumentando a medida que a pressão na válvula de admissão aumenta. As relações permitem-nos obter uma equação com declive e ordenada para posteriormente traçar um gráfico da variação entre a ordenada e o declive a medida que a rotação do motor é aumentada.

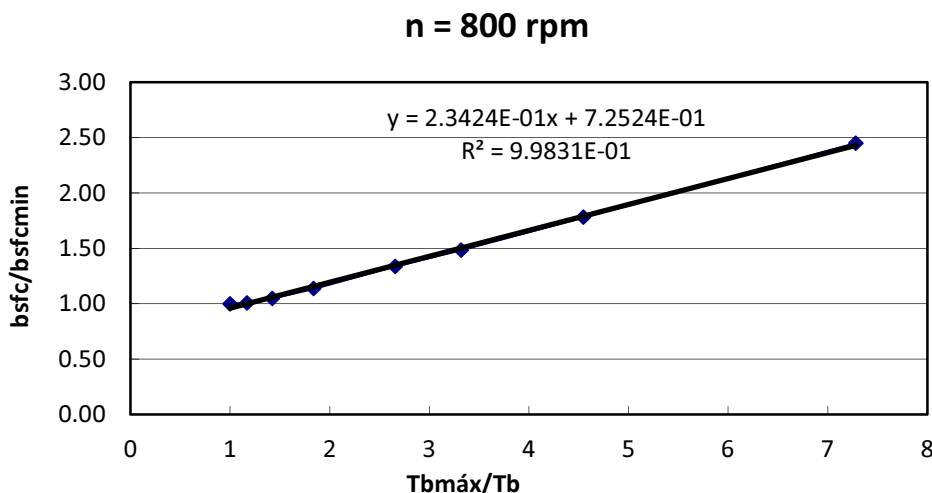


Figura 15 – Relação entre bsfc/bsfcmin e Tbmáx/Tb para uma rotação do motor.

A Figura 16 é a compilação das ordenadas e declives das várias rotações do motor TU3JP-KFW da Peugeot. Com o polinómio do declive e o polinómio da ordenada permite-nos conhecer o desempenho do motor em todo o seu regime.

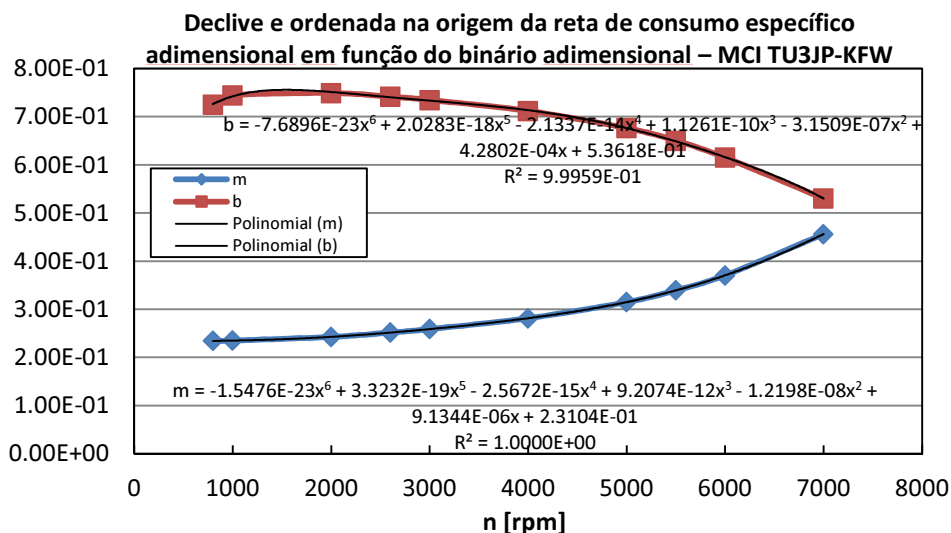


Figura 16 – Declive e ordenada na origem da reta de consumo específico adimensional em função do binário adimensional do MCI TU3JP-KFW.

### 3.2. Validação do programa de simulação do ciclo NEDC

Foi utilizado um programa que faz a simulação do ciclo NEDC. Este programa foi utilizado para calcular o consumo e as emissões de cada motor que foi ensaiado em cada automóvel. O programa foi validado comparando os resultados obtidos pelo programa e os valores publicados pela Peugeot para o modelo 206 XT 1.4 equipado com o motor TU3JP-KFW, que revelaram uma diferença inferior a 1,26 % para o consumo combinado e emissões de CO<sub>2</sub>, conforme apresentado na Tabela 7. Estes resultados permitem-nos utilizar os resultados do programa com um nível de confiança aceitável.

No programa são introduzidos dados do automóvel como por exemplo a área frontal, o coeficiente de arrasto aerodinâmico, as relações de caixa de velocidade que o fabricante aplica neste modelo, entre outros. Os resultados do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor obtidos anteriormente também são introduzidos no programa.

**Tabela 7 – Consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. Resultados da simulação e valores anunciados pelo fabricante.**

	Peugeot 206 anunciado	Peugeot 206 simulação	Diferença [%]
Consumo combinado [L/100 km]	6,60	6,68	1,21
Consumo urbano [L/100 km]	8,90	8,18	-8,08
Consumo extra-urbano [L/100 km]	5,30	5,70	7,55
Emissões de CO <sub>2</sub> [g/km]	162,00	159,96	-1,26

### 3.3. Validação do programa de simulação dos tempos de aceleração

Foi utilizado um programa que faz a simulação dos tempos de aceleração de 0-100 km/h, 0-400 m e 0-1000 m. O resultado deste programa possibilita conhecer o tempo que cada veículo demora a fazer cada uma dos ensaios anteriormente referenciados. O programa foi validado comparando os resultados obtidos pelo programa e os valores publicados pela Peugeot para o seu modelo 206 XT 1.4 equipado com o motor TU3JP-KFW que revelaram uma diferença de 12,38 % para o ensaio 0-100 km/h, uma diferença



de 3,35 % para o ensaio 0-400 m e uma diferença de 3,36 % para o ensaio 0-1000 m, conforme apresentado na Tabela 8. Estes resultados permitem-nos utilizar os resultados do programa com um nível de confiança aceitável para prever o tempo que o veículo necessita para realizar os ensaios de 0-100 km/h, 0-400 m e 0-1000 m.

No programa são introduzidos dados do automóvel como a área frontal, o coeficiente de arrasto aerodinâmico, as relações de caixa de velocidade que o fabricante aplica neste modelo. Os resultados do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor obtidos anteriormente também são introduzidos no programa.

**Tabela 8 – Tempo de aceleração nos ensaios 0-100 km/h, 0-400 m e 0-1000 m. Resultados da simulação e valores anunciados pelo fabricante.**

	Peugeot 206 anunciado	Peugeot 206 simulação	Diferença [%]
Aceleração 0-100 km/h [s]	13,4	11,74	12,38
Aceleração 0-400 m [s]	18,8	18,17	3,35
Aceleração 0-1000 m [s]	34,8	33,63	3,36

## 4. MODELAÇÃO DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Este capítulo tem como objectivo fazer uma introdução e descrição do programa de modelação do MCI. Também será feita uma descrição dos modelos matemáticos aplicados pelo programa na simulação dos motores.

### 4.1. Dados de entrada no programa

1. Diâmetro do cilindro [m];
2. Curso do êmbolo [m];
3. Relação de compressão;
4. Número de rotações da cambota por minuto [rpm];
5. Ângulo de abertura da válvula de admissão /graus APMS;
6. Ângulo de fecho da válvula de admissão /graus DPMS;
7. Ângulo de abertura da válvula de escape /graus APMS;
8. Ângulo de fecho da válvula de escape /graus DPMS;
9. Ângulo de avanço de ignição /graus APMS;
10. Riqueza da mistura ar-combustível;
11. Altura de folga da câmara de combustão [m];
12. Diâmetro da cabeça da válvula de admissão [m];
13. Levantamento máximo da válvula de admissão [m];
14. Diâmetro da cabeça da válvula de escape [m];
15. Levantamento máximo da válvula de escape [m];
16. Largura da sede da válvula de admissão [m];
17. Largura da sede da válvula de escape [m];
18. Ângulo da sede da válvula de admissão /grau;
19. Ângulo da sede da válvula de escape /grau;
20. Diâmetro da haste da válvula de admissão [m];
21. Diâmetro da haste da válvula de escape [m];

22. Combustível utilizado pelo motor.

4.2. Dados de saída no programa

1. Binário [N·m];
2. Consumo específico [g/kW·h]
3. Potência [W];
4. Trabalho por ciclo [J]
5. Rendimento volumétrico;
6. Pressão média efetiva ao freio [Pa];
7. Trabalho de bombagem [J];
8. Pressão média efetiva de fricção [Pa];
9. Velocidade média do êmbolo [m/s];
10. Pressão máxima no cilindro [Pa].

A Figura 17 é um exemplo da folha de cálculo do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor. Na Figura 17 do programa a área que se encontra dentro do círculo é onde são introduzidos a maioria dos dados de um motor. A área que esta circunscrita pelo quadrado tem alguns dos resultados, depois de a simulação ser realizada, mais importantes na caracterização do motor.

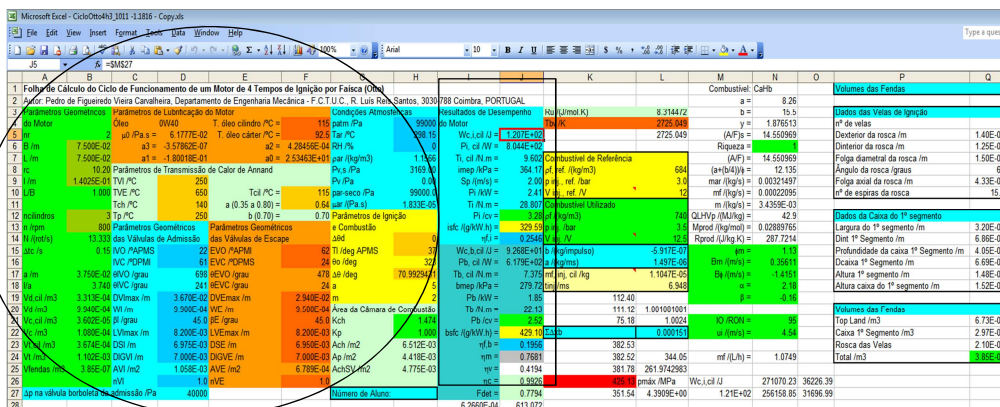


Figura 17 – Imagem da folha de cálculo do programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor.

No programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor foram introduzidos os dados do motor da Peugeot TU3JP-KFW com quatro cilindros, foram registados os valores do consumo, binário. O processo foi repetido sucessivamente para mais duas configurações de motores, com três e dois cilindros respectivamente. Como os ensaios

realizados permitem-nos conhecer o desempenho de cada motor em todo o seu regime de funcionamento. Com os resultados do programa consegue-se obter as curvas de binário ao freio de consumo específico mínimo ao freio de cada motor. O polinómio de cada curva é posteriormente necessário para ser utilizado nos programas de simulação dos tempos de aceleração e simulação do ciclo NEDC para obter ou resultados em desses ensaios.

#### 4.2.1. Parâmetros do programa de simulação

O binário num motor a quatro tempos de IF (ignição por faísca) é determinado pela pressão dentro do cilindro. Na fase de admissão a pressão no interior do cilindro é geralmente inferior à pressão atmosférica por causa da resistência do fluxo de ar no cilindro. Na fase de compressão, a pressão aumenta com o movimento do pistão para cima. Quando o pistão se aproxima da do PMS (ponto morto superior) a vela produz uma faísca para inflamar a mistura (ar/combustível) que se encontra no interior do cilindro, essa pressão aumenta rapidamente. Na fase de expansão, os gases de alta pressão no cilindro empurram o pistão para baixo, produzindo binário na cambota. Na fase de escape, os gases no interior do cilindro são retirados para fora do cilindro devido á menor pressão no exterior, os gases rapidamente deixam o interior do cilindro onde estavam a uma pressão maior.

A Figura 18 mostra um diagrama do ciclo de trabalho no interior de um cilindro de um motor a quatro tempos IF: Podemos reparar que a admissão tem o caminho (g, h, a). A seguir tempos a compressão da mistura de (a, b, c). A faísca acontece antes do êmbolo chegar ao ponto c. De seguida tempos a fase de expansão (c, d, e). Por fim o escape (e, g) quando os gases são libertados.

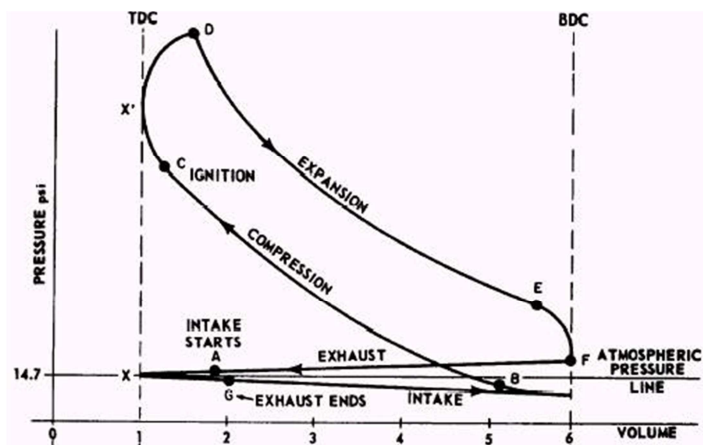


Figura 18 – Ciclo de trabalho de um motor a quatro tempos IF [22].

O binário produzido pelo motor pode ser resumido como trabalho realizado no ciclo. O trabalho realizado no ciclo,  $W_{c,in}$  [J] pode ser calculado pela Eq. (1).

$$W_{c,in} = \int_{Area A} pdV - \int_{Area B} pdV \quad (1)$$

Onde  $p$  [Pa] é a pressão no cilindro e  $V$  [m<sup>3</sup>] é o volume do cilindro. O trabalho realizado na área B é negativo porque na fase de admissão a pressão no interior do cilindro é inferior a pressão da fase de escape.

O binário do motor é medido experimentalmente em função da velocidade de rotação da cambota e ajustado pelo polinómio da Eq. (2). o binário  $\bar{T}_b$  [N·m], e  $n$  [rpm] é a velocidade de rotação da cambota.

$$\bar{T}_{b,i} = a_{3T}n_i^3 + a_{2T}n_i^2 + a_{1T}n_i + a_{0T} \quad (2)$$

A pressão média efetiva, bmep [kPa], é dado pela Eq. (3). Onde é definido como o trabalho por ciclo,  $W_{c,b,cil}$  [J], em relação ao volume da câmara de combustão,  $V_{d,cil}$  [m<sup>3</sup>].

$$bmep = \frac{W_{c,b,cil}}{V_{d,cil}} \quad (3)$$

A cilindrada de um cilindro,  $V_{d,cil}$  [m<sup>3</sup>], é dada pela Eq. (4). Onde  $B$  [m] é o diâmetro do cilindro e o  $L$  [m] é o curso do pistão.

$$V_{d,cil} = \frac{\pi B^2 L}{4} \quad (4)$$

O  $bsfc$  é o consumo específico de combustível ao freio do motor. É calculado em função da velocidade de rotação da cambota e ajustado pelo polinómio da Eq. (5), onde o  $bsfc$  é em [g/kW·h] e  $n$  é em [rpm].

$$bsfc_i = a_{3bsfc}n_i^3 + a_{2bsfc}n_i^2 + a_{1bsfc}n_i + a_{0bsfc} \quad (5)$$

O trabalho produzido pelo motor,  $W_{b,i}$  [J], num deslocamento do automóvel de  $(s_{i+1} - s_i)$ , é dada pela Eq. (6).

$$W_{b,i} = \frac{4\pi\bar{T}_{b,in_i}}{60} (t_{i+1} - t_i) \quad (6)$$

A massa de combustível,  $m_{f,i}$  [kg], consumida pelo veículo no deslocamento  $(s_{i+1} - s_i)$  é dado pela Eq. (8). onde o trabalho  $W_{b,i}$  [J] e o bsfc<sub>i</sub> [g/(kW·h)].

$$m_{f,i} = W_{b,i} \times \text{bsfc}_i \times 3,6 \times 10^{-9} \tag{7}$$

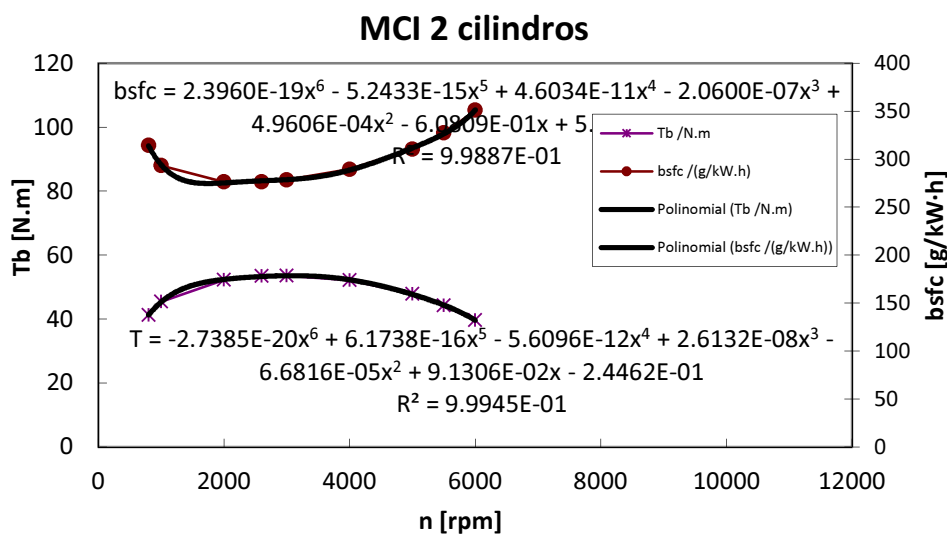
A Tabela 9 tem algumas das características dos motores que foram introduzidos no programa de simulação para a realização dos ensaios.

**Tabela 9 – Características dos motores que foram ensaiados.**

Motor	2 cilindros	3 cilindros	4 cilindros
Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	680	996	1361
Relação de compressão	10,2	10,2	10,2
Diâmetro do cilindro [mm]	75,0	75,0	75,0
Curso do pistão [mm]	77,0	77,0	77,0
Válvula de escape DVE [mm] × LVE [mm] × DIGVE [mm]	29,4 × 82 × 7	29,4 × 82 × 7	29,4 × 82 × 7
Válvula de admissão DVI [mm] × LVI [mm] × DIGVI [mm]	36,7 × 82 × 7	36,7 × 82 × 7	36,7 × 82 × 7

Depois de dos dados serem introduzidos no programa da simulação do ciclo de funcionamento do motor, obtêm-se os resultados dos ensaios.

A Figura 19 mostra as curvas do binário ao freio e do consumo específico mínimo ao freio para o MCI de 2 cilindros, resultante da simulação do funcionamento desse motor. Os polinómios das curvas que são necessários para os programas de simulação dos tempos de aceleração e do ciclo NEDC também estão apresentados.



**Figura 19 – Curvas do binário e consumo específico do MCI de 2 cilindros.**

A Figura 20 é o gráfico das curvas do binário ao freio e do consumo específico mínimo ao freio para o MCI de 3 cilindros, resultante da simulação do funcionamento desse motor. Os polinómios das curvas que são necessários para os programas de simulação dos tempos de aceleração e do ciclo NEDC também estão apresentados.

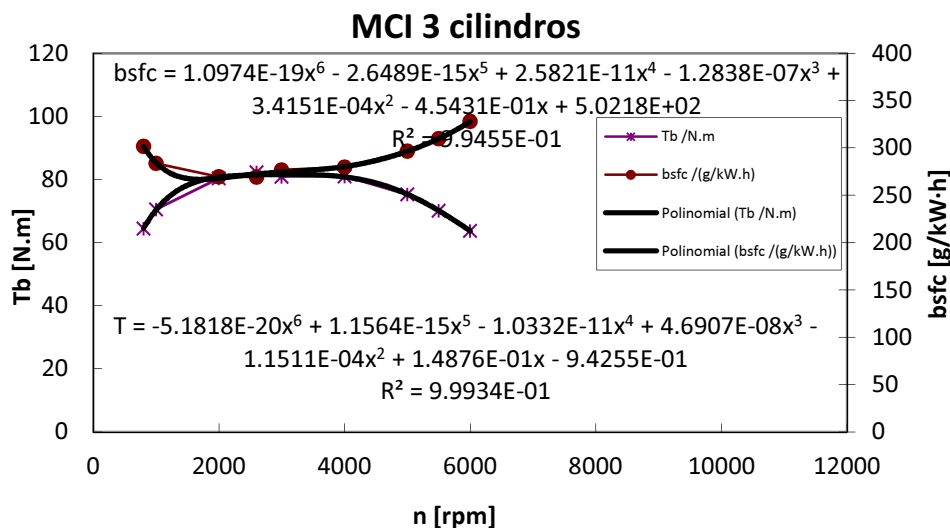


Figura 20 – Curvas do binário e consumo específico do MCI de 3 cilindros

A Figura 21 é o gráfico das curvas do binário ao freio e do consumo específico mínimo ao freio para o MCI de 4 cilindros, resultante da simulação do funcionamento desse motor. Os polinómios das curvas que são necessários para os programas de simulação dos tempos de aceleração do automóvel e o programa de simulação do ciclo NEDC.

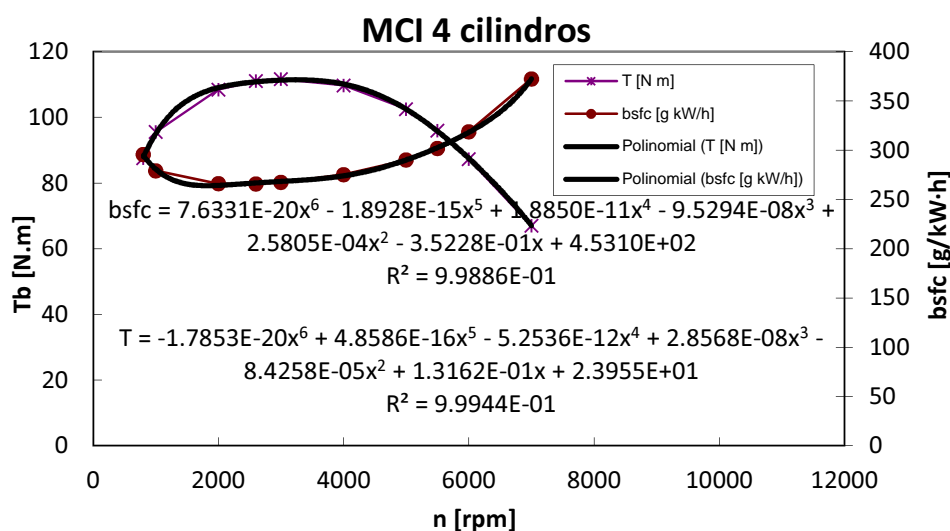


Figura 21 – Curvas do binário e consumo específico do MCI de 4 cilindros

## **5. ENSAIOS DE EMISSÕES E DESEMPENHO DO VEÍCULO**

### **5.1. Ciclo de condução NEDC**

O NEDC (Novo Ciclo Europeu da Condução) é um ciclo de condução que consiste em quatro ciclos repetidos de condução urbana, ECE-15, e um ciclo de condução extra-urbano (EUDC). O NEDC é um ciclo que é suposto representar o uso típico de um veículo automóvel na Europa. Ele é usado, entre outros fins, para avaliar os níveis de emissão dos motores dos veículos que são introduzidos no mercado automóvel. Este ciclo está regulamentado pela norma comunitária CE 715/2007 [16].

#### **5.1.1. Descrição do procedimento do ciclo NEDC**

O ciclo deve ser realizado no veículo depois deste se encontrar em repouso pelo um período mínimo de 6 horas antes do ensaio, e a temperatura ambiente deve estar entre os 20-30°C durante a realização do ensaio. Os ciclos podem ser executados em estrada plana, na ausência de vento. Como nem sempre é possível encontrar estradas com estas condições, em especial a ausência de vento, para se poder realizar o ensaio sempre que desejado, os ensaios são efectuados num banco de ensaios de rolos. Este tipo de banco contém uma máquina elétrica, para simular a força de resistência aerodinâmica do veículo e discos de inércia para simular a inércia de translação do automóvel.

A Figura 22 é uma imagem do gráfico do ensaio do NEDC. Na Figura 22 conseguimos ver todos os ciclos que constituem o ensaio. Vemos os quatro ciclos urbanos onde o automóvel não ultrapassa os 50 km/h, e o ciclo extra-urbano em que o automóvel atinge os 120 km/h.



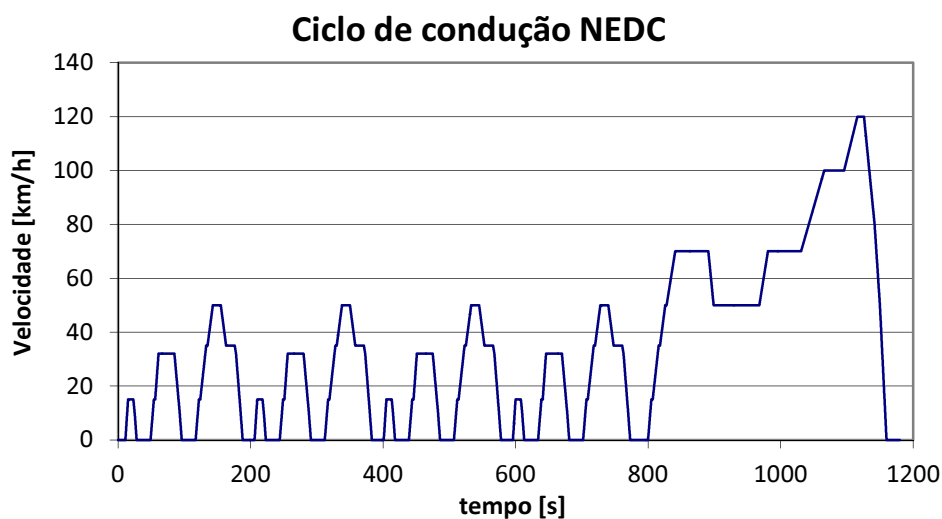


Figura 22 – Imagem do ciclo NEDC.

Várias medições são realizadas ao longo do ciclo. Os resultados disponibilizados mais relevantes para o público em geral são:

- Consumo urbano nos primeiros 780 segundos.
- Consumo extra-urbano entre 780 a 1180 s.
- Consumo do ciclo combinado (urbano e extra-urbano).
- Emissões CO<sub>2</sub> do ciclo combinado.

### 5.1.2. Folha de cálculo para o ensaio NEDC

Para poder obter as emissões de CO<sub>2</sub> dos motores nos veículos que estavam em estudo foi criado um programa para o efeito. O programa tem em conta características do automóvel e do motor. As características do automóvel mais importante são a massa do automóvel, área frontal, coeficiente de arrasto aerodinâmico, diâmetro das rodas propulsoras e relações transmissão da caixa de velocidades e diferencial. As características mais importantes do motor são a curva de binário em função da velocidade de rotação e consumo específico combustível do motor em função a velocidade de rotação e binário. Com o programa podemos prever as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km e consumo de combustível em L/100km de um dado automóvel ao efetuar o ciclo NEDC.

A Figura 23 apresenta a folha de cálculo que nos permite calcular as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de um automóvel ao percorrer o ciclo urbano e o ciclo extra-urbano do ensaio NEDC.

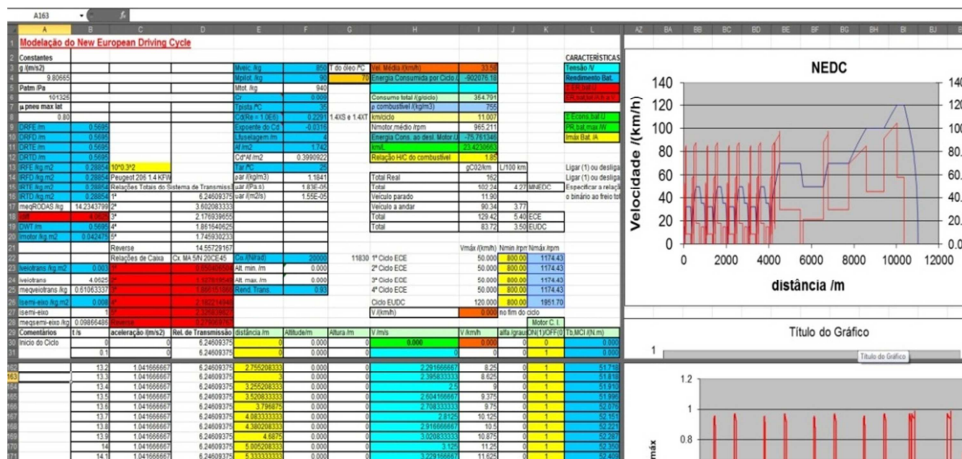


Figura 23 – Folha de cálculo do programa de simulação do ciclo NEDC.

### 5.1.2.1. Parâmetros do programa de simulação do ensaio NEDC

Sabendo que o ciclo de ensaio do NEDC tem uma distância total de 11,007 km, introduzindo os dados de cada motor, as características o automóvel, e as relações de transmissão da caixa de velocidades, na folha de cálculo, obtemos os resultados do consumo e emissões de cada conjunto motor-automóvel que sejam ensaiados.

### 5.1.2.2. Cálculo das emissões em gCO<sub>2</sub>/km

A emissão de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km é dada pela Eq. (8), onde  $m_{f,ciclo}$  é a massa de combustível consumida no ciclo total NEDC,  $d_{ciclo}$  é a distância do ciclo percorrida pelo automóvel,  $m_{CO_2}$  é a massa de CO<sub>2</sub> produzida por unidade de massa de combustível consumido,  $m_f$ .

$$gCO_2/km = \frac{m_{f,ciclo} [g]}{d_{ciclo} [km]} \frac{m_{CO_2} [g]}{m_f [g]} \quad (8)$$

Como se trabalha com uma mistura estequiométrica a riqueza da mistura ar/combustível,  $\phi$  é igual a 1,0. Com a relação H/C, da gasolina igual a  $y = 1,85$  [16]. A massa de CO<sub>2</sub> por unidade de massa de combustível é dada pela Eq. (9), onde  $M_C$  é a massa de uma mole de átomos de carbono igual a 12,0107 g/mol,  $M_O$  é a massa de uma mole de átomos de oxigénio igual a 15,9994 g/mol, e  $M_H$  é a massa de uma mole de átomos de hidrogénio igual a 1,00794 g/mol.

$$\frac{m_{CO_2} [g]}{m_f [g]} = \frac{\phi (M_C + 2M_O)}{M_C \phi + M_H y} \quad (9)$$

As emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo do circuito urbano, e do circuito extra-urbano são obtidos com a mesma fórmula sendo a distância percorrida pelo automóvel nesses ciclos de valores diferentes.

### 5.1.2.3. Cálculo do consumo de combustível em L/100 km

Com a distância percorrida pelo automóvel, a massa de combustível consumida e a duração do ensaio podemos prever o consumo do motor. Calcula-se o consumo do motor no automóvel.

O consumo do automóvel no ciclo urbano, ECE do ensaio NEDC é dado pela Eq. (10) onde  $m_{f,i}$  [g] é a massa de combustível consumida nesse ciclo do ensaio,  $\rho_f$  [kg/m<sup>3</sup>] é a massa volúmica do combustível. Para a gasolina considerou-se uma massa volúmica de 755 kg/m<sup>3</sup> aos 15°C, o que está dentro do intervalo estabelecido para a gasolina sem chumbo com um índice de octano de 95 I.O. R.M., de acordo com as normas Euro 5 e Euro 6 [16].  $d_{ECE}$  [km] é a distância percorrida pelo automóvel na parte urbana do ciclo NEDC que é constituída por 4 ciclos ECE-15 consecutivos, sendo igual a 4×1,013 km.

$$ECE \left[ \frac{\text{L}}{100\text{km}} \right] = \frac{\sum_{ECE=0}^{d_{ECE}} m_{f,i} \cdot 100}{\rho_f \cdot d_{ECE}} \quad (10)$$

Para obter o consumo no ciclo EUDC é usada a Eq. (10) com a distância que o veículo percorre no ciclo EUDC, que é igual a 6,955 km, e a massa de combustível consumida pelo automóvel durante o mesmo ciclo.

O consumo de combustível total do ensaio, é dado pela Eq. (11), onde  $m_{f,Total}$  é a massa de combustível consumida no ensaio NEDC, e  $d_{NEDC}$  é a distância total percorrida pelo veículo no ensaio NEDC.

$$NEDC \left[ \frac{\text{L}}{100\text{km}} \right] = \frac{m_{f,Total} [\text{g}] \times 100}{\rho_f \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot d_{NEDC} [\text{km}]} \quad (11)$$

### 5.1.1. Resultados obtidos do NEDC

A análise dos resultados da folha de cálculo para os vários veículos e motores permite-nos escolher o melhor motor para um dado automóvel.

A Figura 24 mostra a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> em g/km com a massa do automóvel e a cilindrada do motor. A Figura 24 mostra que a massa do automóvel é a variável que tem mais influência nas emissões de CO<sub>2</sub>. A cilindrada do motor tem uma influência pequena nas emissões de CO<sub>2</sub>, sendo que a cilindrada ótima para uma determinada massa de automóvel aumenta com o aumento da massa do automóvel. Para um automóvel com uma massa de 450 kg a cilindrada ótima é cerca de 900 cm<sup>3</sup> e para um automóvel com uma massa de 950 kg a cilindrada ótima é cerca da 1100 cm<sup>3</sup>.

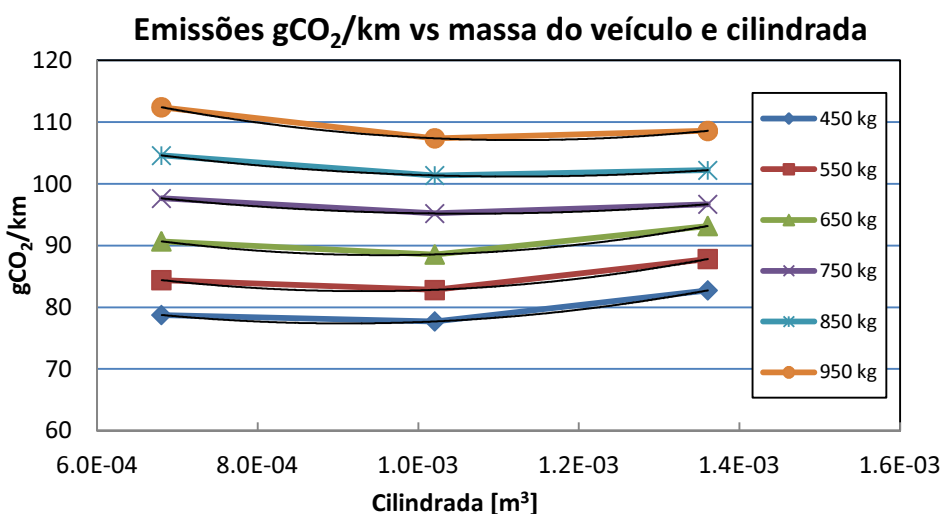


Figura 24 – Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> com a massa do automóvel e a cilindrada do motor.

## 5.2. Ensaio de aceleração

Para poder afirmar que um dado motor é o melhor para equipar um automóvel é necessário conhecer mais do seu desempenho. Com os ensaios de aceleração podemos saber quais os tempos de aceleração correspondentes a qualquer conjunto motor-automóvel, e com isso conhecer outras características do automóvel.

### 5.2.1. Folha de cálculo do tempo de aceleração

Para poder ter mais informação sobre o desempenho do automóvel com um dado motor, foi criada uma folha de cálculo para calcular o tempo que o automóvel precisa para acelerar de 0-100 km/h, para acelerar de 0-400 m e de 0-1000 m. Esta ferramenta proporciona um melhor aproveitamento do tempo, com ela podem ser testadas várias hipóteses, não sendo necessário construir o automóvel para os ensaios serem efectuados.

Conhecendo as características do um automóvel, podemos equipá-lo com qualquer motor e conhecer o seu desempenho.

A Figura 25 apresenta uma imagem da folha de cálculo que nos permite determinar os tempos de aceleração para um dado motor-veículo. Para o efeito têm que ser introduzidas na folha de cálculo a curva de binário em função da velocidade de rotação do motor, a massa do automóvel, área frontal, coeficiente de arrasto aerodinâmico, diâmetro das rodas propulsoras, momento de inércia das rodas, dos componentes do sistema de transmissão e do motor em torno do seu eixo de rotação, e relações de transmissão da caixa de velocidades e diferencial, entre outras variáveis.

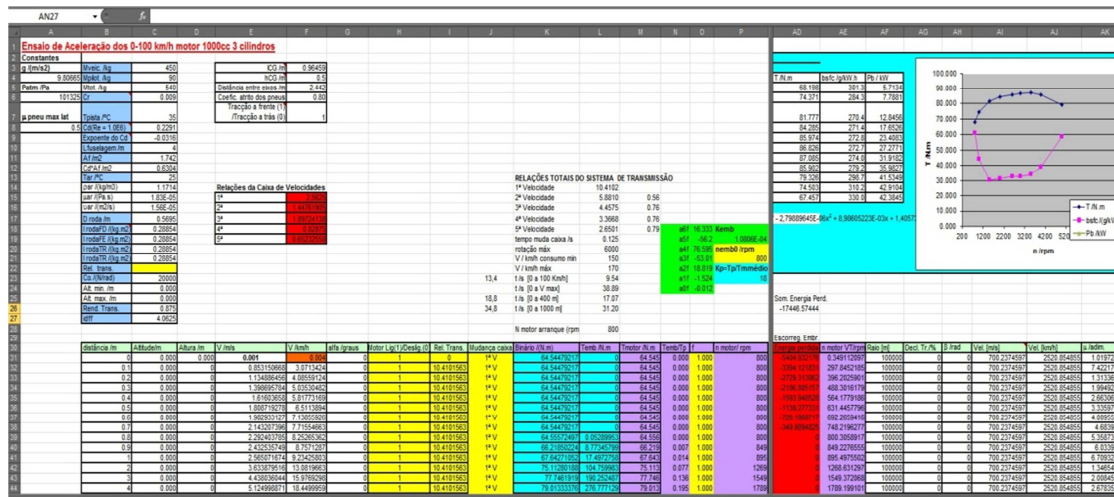


Figura 25 – Imagem da folha de cálculo usada para ensaios de aceleração.

## 5.2.2. Parâmetros do programa de simulação dos tempos de aceleração.

A seguinte secção é uma breve introdução às equações que são utilizadas pelo programa. As equações permitem-nos calcular o desempenho do automóvel quando ele esta equipado em determinado motor e caixa de velocidades.

### 5.2.2.1. Aceleração de 0-100 km/h

O tempo que um dado automóvel com uma determinada massa precisa para acelerar de 0-100 km/h é dado pela Eq. (12), onde  $(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})$  é distância percorrido pelo

automóvel entre o instante  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , e  $v_{t_{i+1}}$  é a velocidade do automóvel em [m/s] no instante  $t_{i+1}$ .

$$t_{100 \text{ km/h}}[\text{s}] = \sum_{i=0}^{n(v_{t_{i+1}}=100 \text{ km/h})} \frac{(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})}{v_{t_{i+1}}} \quad (12)$$

Para calcular a velocidade,  $v$  [m/s], em qualquer instante é utilizada a Eq. (13), onde  $m_{v,total}$  [kg] é a massa do automóvel mais a de um ocupante.  $g$  [m/s<sup>2</sup>] é a aceleração normal da gravidade.  $h$  [m] representa a altura que no caso do programa é zero, para cumprir a norma, que estabelece que os ensaios são realizados numa estrada horizontal.  $E_i$  [J] é a energia mecânica total do automóvel correspondente à distância  $d_i$ .  $D_r$  [m] é o diâmetro da roda, e por fim os  $I$  [kg m<sup>2</sup>] são os momentos de inércia de cada roda do veículo.

$$v_{i+1} = \sqrt{\frac{((E_i - (m_{v,total} g h))^2}{\left(m_{v,total} + \left(\frac{4(I_{RFD} + I_{RFE} + I_{RTD} + I_{RTE})}{D_r^2}\right)\right)}} \quad (13)$$

$E_i$  é a energia mecânica total do automóvel e é dada pela Eq. (14), onde  $F_r$  [N] é a força de resistência ao rolamento,  $F_d$  [N] é a força de arrasto aerodinâmico,  $F_{prop}$  [N] é a força de propulsão e  $F_{trav}$  [N] é a força de travagem. A distância percorrida pelo automóvel entre o instante  $t_i$  e  $t_{i+1}$  é dada pelo termo  $(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})$  [m].

$$E_i = m_{v,total} g h + \frac{1}{2} \left( m_{v,total} + \frac{4(I_{RFD} + I_{RFE} + I_{RTD} + I_{RTE})}{D_r^2} \right) v_i^2 + (F_r + F_d + F_{prop} + F_{trav})(d_{t_{i+1}} - d_{t_i}) \quad (14)$$

A força de resistência ao rolamento é dada pela Eq. (15), onde o  $C_r$  é o coeficiente de resistência ao rolamento.  $\alpha$  é o ângulo de inclinação longitudinal da estrada tendo um valor positivo quando o veículo esta a subir.  $\beta$  é o ângulo de inclinação transversal da estrada tendo um valor positivo quando a estrada desce para o lado centro da curva, no caso deste programa estes valores tomam o valor de zero porque se trata de ensaios em estrada horizontal.  $R$  [m] é o raio da curva.

$$F_r = (C_r + 4(C_{r,roda})) m_{v,total} g \cos \alpha \left( \cos \beta + \frac{v^2 \sin \alpha}{R g} \right) \quad (15)$$

A força de arrasto aerodinâmico é dada pela Eq. (16), onde  $C_d$  é o coeficiente de arrasto aerodinâmico do automóvel.  $A_f$  [m<sup>2</sup>] é a área frontal do automóvel,  $\rho_{ar}$  [kg/m<sup>3</sup>] é a massa volúmica do ar e  $v$  [m/s] é a velocidade relativa entre o automóvel e o ar, que no caso de inexistência de vento é igual a velocidade do automóvel.

$$F_d = C_d A_f \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 \quad (16)$$

A força de propulsão é dada pela Eq. (17), onde  $\mu_p$  é o coeficiente de atrito entre o pneu e o asfalto.  $l_{CG}$  é a distância entre o plano vertical que contem o eixo das rodas da frente e o plano vertical que contem o centro de gravidade do veículo.  $d_{eixo}$  [m] é a distância entre eixos,  $h_{CG}$  [m] é a altura ao solo do centro de gravidade do veículo. O expoente  $tr$  corresponde ao tipo de tração que o automóvel tem, tomando o valor 1 no caso de ser um automóvel de tração dianteira e 0 se possuir tração traseira.

$$F_{prop} = \mu_p (m_{v,total} \left( g \left( 1 - \left( \frac{l_{CG}}{d_{eixo}} \right) \right) + \left( (-1)^{tr} \left( \frac{(v_{t_{i+1}} - v_{t_i}}{(t_{i+1} - t_i))} \right) \frac{h_{CG}}{d_{eixo}} \right) \right) \quad (17)$$

A força de travagem devida a existência de uma força perpendicular à trajetória do veículo e paralela ao solo é dada pela Eq. (18), onde  $C_\alpha$  é o coeficiente de arrasto do pneu a curvar.

$$F_{trav} = - \left( m_{v,total} g \left( \frac{v^2 \cos \beta}{R g} - \sin \beta \right) \sin \left( \frac{m_{v,total} g \left( \frac{v^2 \cos \beta}{R g} - \sin \beta \right)}{C_\alpha} \right) \right) \quad (18)$$

### 5.2.2.2. Aceleração de 0-400 m

O tempo que um dado veículo com uma determinada massa precisa para acelerar do 0-400 m é dado pela Eq. (19), onde  $(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})$  é distância percorrido pelo automóvel entre o instante  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , e  $v_{t_{i+1}}$  é a velocidade do automóvel em [m/s] no instante  $t_{i+1}$ .

$$t_{400 \text{ m}} [\text{s}] = \sum_{i=0}^{n(d_{t_{i+1}}=400 \text{ m})} \frac{(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})}{v_{t_{i+1}}} \quad (19)$$

### 5.2.2.3. Aceleração de 0-1000 m

O tempo que um dado veículo com uma determinada massa precisa para acelerar do 0-1000 m é dado pela Eq. (20), onde  $(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})$  é distância percorrido pelo automóvel entre o instante  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , e  $v_{t_{i+1}}$  é a velocidade do automóvel em [m/s] no instante  $t_{i+1}$ .

$$t_{1000\text{ m}}[\text{s}] = \sum_{i=0}^{n(d_{t_{i+1}}=1000\text{ m})} \frac{(d_{t_{i+1}} - d_{t_i})}{v_{t_{i+1}}} \quad (20)$$

### 5.2.3. Resultados dos ensaios

Com as equações do programa referidas realizaram-se os ensaios para de aceleração do veículo e retiraram-se os tempos de cada ensaio para cada veículo.

#### 5.2.3.1. Resultados dos ensaios de tempo de 0-100 km/h

Esta secção contém os resultados dos ensaios dos tempos de aceleração dos veículos de 0-100 km/h, partindo do repouso numa estrada horizontal e sem vento, designados ensaios de tempo 0-100 km/h, dos veículos equipados com os três motores. Para cada veículo com uma dada massa e para cada motor foram obtidos dois resultados: O tempo que cada um precisa para acelerar de 0 a 100 km/h com uma caixa de velocidades com relações de transmissão otimizada para ter o menor tempo de aceleração de 0-100 km/h, o tempo que cada um necessita para acelerar de 0 a 100 km/h com uma caixa de velocidades com relações de transmissão otimizada para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km de um dado automóvel e motor no ensaio NEDC.

A Figura 26 mostra os resultados dos ensaios de aceleração de 0-100 km/h dos automóveis equipados com o MCI de 2 cilindros. Na Figura 26 observamos que o tempo de acelerar de 0 a 100 km/h do veículo evolui de forma quase linear com a massa do mesmo, para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km observamos também uma evolução quase linear dos tempos de aceleração com a massa do veículo.



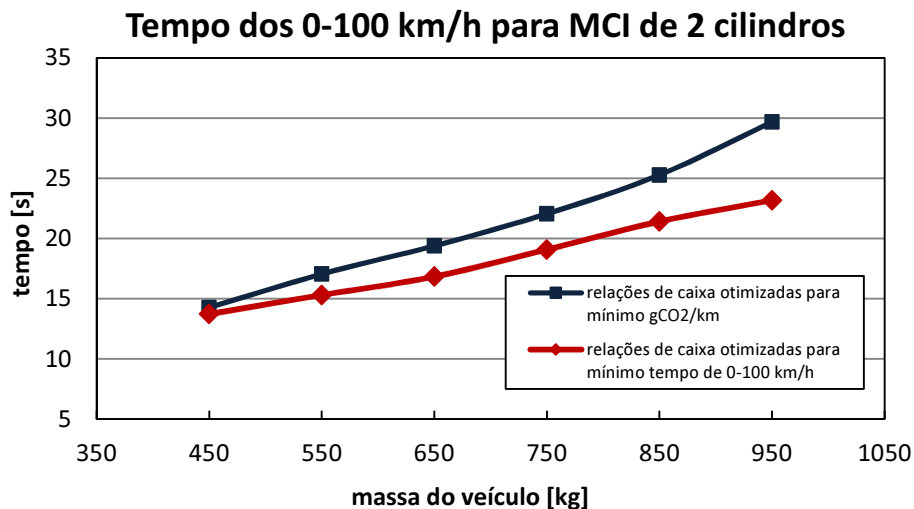


Figura 26 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-100 km/h com a massa do automóvel para o MCI de 2 cilindros.

A Figura 27 apresenta os resultados dos ensaios de aceleração de 0-100 km/h dos automóveis equipados com o MCI de 3 cilindros. Na Figura 27 observamos que o tempo de aceleração do veículo evolui quase linearmente com a massa do mesmo, para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h. Na Figura 27 observamos que para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km já não observamos uma evolução linear dos tempos de aceleração com a massa do veículo, uma vez que os veículos com massa entre os 550 kg e 750 kg têm uma variação mínima no tempo necessário para acelerarem de 0-100 km/h.

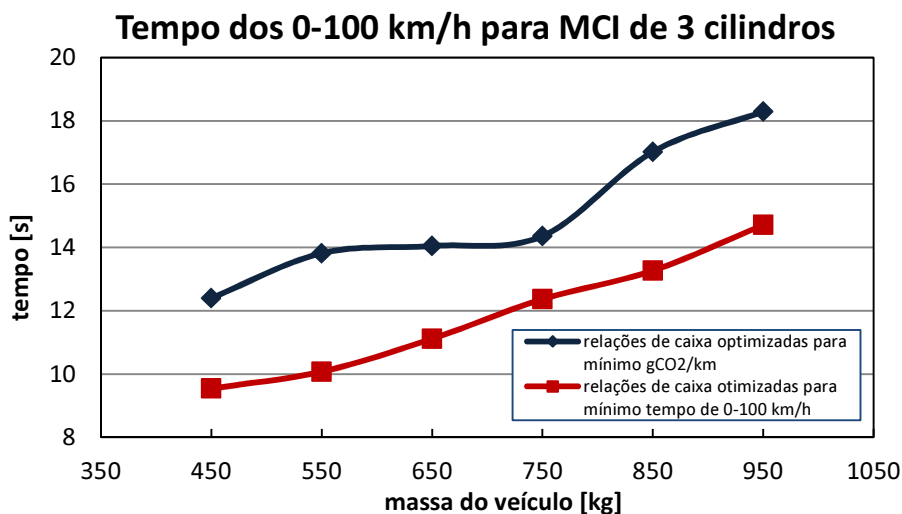


Figura 27 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-100 km/h com a massa do automóvel para o MCI de 3 cilindros.

A Figura 28 apresenta os resultados dos ensaios de aceleração de 0-100 km/h dos automóveis equipados com o MCI de 4 cilindros. Na Figura 28 observamos que o tempo de aceleração do veículo evolui quase linearmente com a massa do mesmo, para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h. Na Figura 28 observamos que para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km já não observamos uma evolução linear dos tempos de aceleração com a massa do veículo, uma vez que o veículo com massa de 650 kg tem um máximo no tempo de aceleração e os veículos com massa igual a 750 kg e 850 kg têm um tempo de aceleração de 0-100 km/h praticamente igual entre si e menor que o veículo com massa igual a 650 kg.

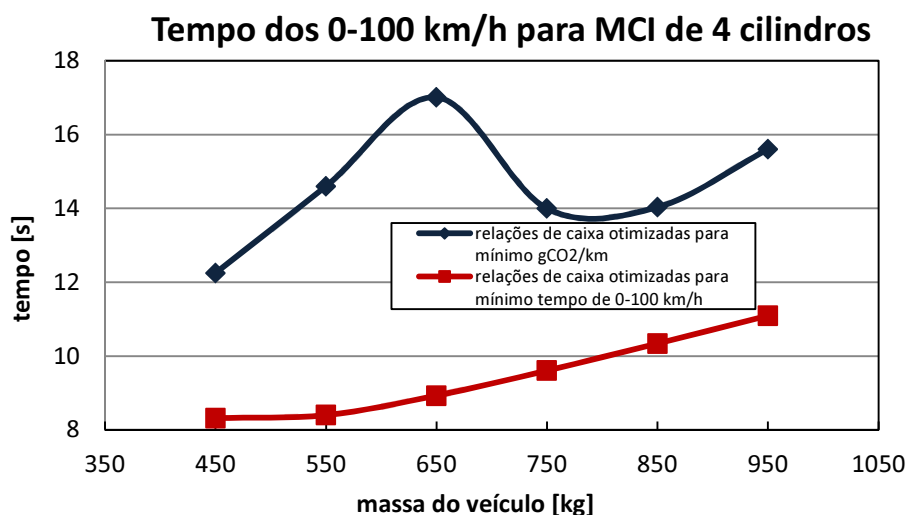


Figura 28 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-100 km/h com a massa do veículo para o MCI de 4 cilindros.

#### 5.2.3.2. Resultados dos ensaios de tempo de 0-400 m

Esta secção contém os resultados dos ensaios de tempo de aceleração do veículo para percorrer 400 m partindo do repouso numa estrada horizontal e sem vento, designados ensaios de tempo 0-400 m, dos veículos equipados com os três motores. Para cada veículo com uma dada massa e para cada motor foram obtidos dois resultados: o tempo de 0-400 m com uma caixa de velocidades com relações de transmissão otimizada para o ensaio de tempo de aceleração de 0-100 km/h, o tempo de 0-400 m com uma caixa de velocidades com relações de transmissão otimizada para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km de um dado automóvel e motor no ensaio NEDC.

A Figura 29 apresenta os resultados dos ensaios de tempo de 0-400 m dos automóveis equipados com o MCI de 2 cilindros para ir de 0-400 m. Na Figura 29

observamos que o tempo de 0-400 m evolui de forma quase linear com a massa do veículo, para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o ensaio de tempo de aceleração de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km observamos também uma evolução quase linear do tempo de 0-400 m com a massa do veículo. Os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o ensaio de tempo de aceleração de 0-100 km/h têm um tempo de 0-400 m menor que os veículos que possuem as caixas de velocidades otimizadas para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

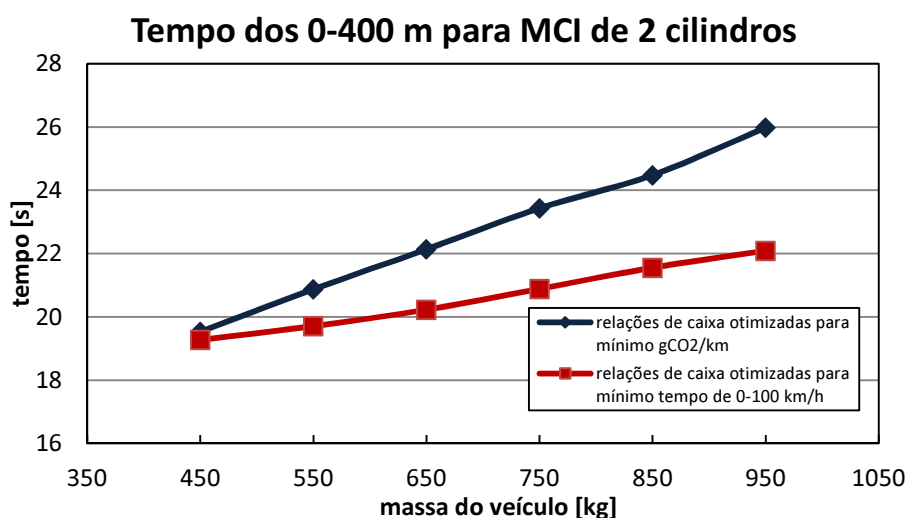


Figura 29 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-400 m com a massa do veículo para o MCI de 2 cilindros.

A Figura 30 apresenta os resultados dos ensaios dos tempos de 0-400 m dos automóveis equipados com o MCI de 3 cilindros para ir de 0-400 m. Na Figura 30 observamos que o tempo de 0-400 m evolui de forma quase linear com a massa do veículo para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o ensaio de tempo de aceleração de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com as caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km já não observamos uma evolução linear do tempo de 0-400 m com a massa do veículo, uma vez que há um aumento linear com a massa do veículo no intervalo 450-550 kg atingindo-se um máximo para a massa do veículo de 550 kg depois o tempo de 0-400 m reduz para a massa de 650 kg e mantem-se até à massa de 750 kg e a partir de 750 kg o tempo de 0-400 m volta a variar de forma linear com a massa do veículo.

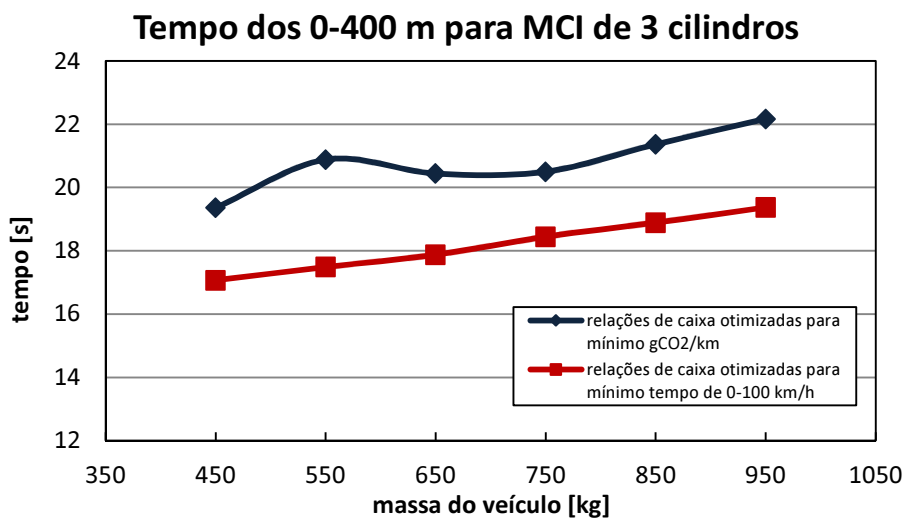


Figura 30 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-400 m com a massa do veículo para o MCI de 3 cilindros.

Na Figura 31 observamos os resultados dos ensaios dos tempos de 0-400 m dos automóveis equipados com o MCI de 4 cilindros para ir de 0-400 m. Na Figura 31 observamos que o tempo de 0-400 m evolui de forma quase linear com a massa do veículo para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o ensaio de tempo de aceleração de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com as caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km já não observamos uma evolução linear do tempo de 0-400 m com a massa do veículo, uma vez que há um aumento linear com a massa do veículo no intervalo 450-650 kg atingindo-se um máximo para a massa do veículo de 650 kg depois o tempo de 0-400 m reduz para a massa de 750 kg e mantem-se até à massa de 850 kg. A partir de 850 kg do tempo de 0-400 m volta a variar de forma linear com a massa do veículo. Os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o ensaio de tempo de aceleração de 0-100 km/h têm um tempo de 0-400 m menor que os veículos que possuem as caixas de velocidades otimizadas para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

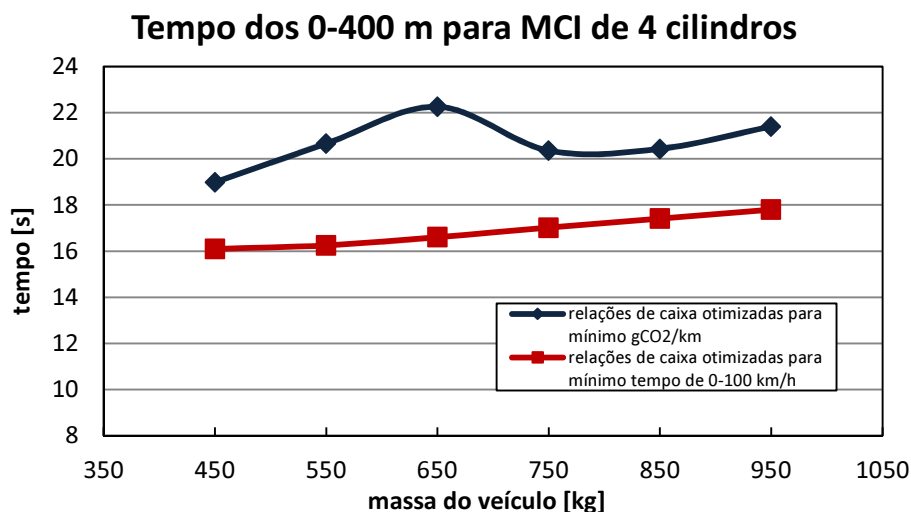


Figura 31 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-400 m com a massa do veículo para o MCI de 4 cilindros.

### 5.2.3.3. Resultados dos ensaios de tempo de 0-1000 m

Esta secção contém os resultados dos ensaios de tempo de aceleração do veículo para percorrer 1000 m partindo do repouso numa estrada horizontal e sem vento designados ensaios de tempo 0-1000 m, dos veículos equipados com os três motores. Para cada veículo com uma dada massa e para cada motor foram obtidos dois resultados: o tempo de 0-1000 m com uma caixa de velocidades com relações de transmissão otimizada para o tempo de 0-100 km/h, o tempo de 0-1000 m com uma caixa de velocidades com relações de transmissão otimizada para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km de um dado automóvel e motor no ensaio NEDC

Na Figura 32 observamos os resultados dos ensaios dos tempos de 0-1000 m dos automóveis equipados com o MCI de 2 cilindros para ir de 0-1000 m. Na Figura 32 observamos que o tempo de 0-1000 m evolui de forma quase linear com a massa do veículo, para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km observamos também uma evolução quase linear do tempo de 0-1000 m com a massa do veículo. Os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h têm um tempo de 0-1000 m menor que os veículos que possuem as caixas de velocidades otimizadas para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

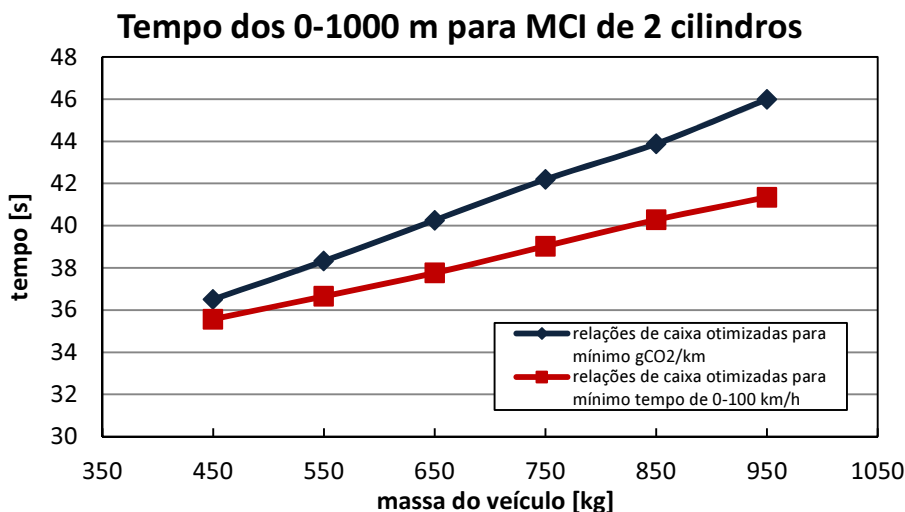


Figura 32 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-1000 m com a massa do veículo para o MCI de 2 cilindros.

Na Figura 33 apresenta os resultados dos ensaios dos tempos de 0-1000 m dos automóveis equipados com o MCI de 3 cilindros para ir de 0-1000 m. Na Figura 33 observamos que o tempo de 0-1000 m evolui de forma quase linear com a massa do veículo para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com as caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km já não observamos uma evolução linear do tempo de 0-1000 m com a massa do veículo, uma vez que há um aumento linear com a massa do veículo no intervalo 450-550 kg atingindo-se um máximo para a massa do veículo de 550 kg depois o tempo de 0-1000 m reduz ligeiramente para a massa de 650 kg e praticamente mantem-se até à massa de 750 kg. A partir de 750 kg do tempo de 0-1000 m volta a variar de forma linear com a massa do veículo. Os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h têm um tempo de 0-1000 m menor que os veículos que possuem as caixas de velocidades otimizadas para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

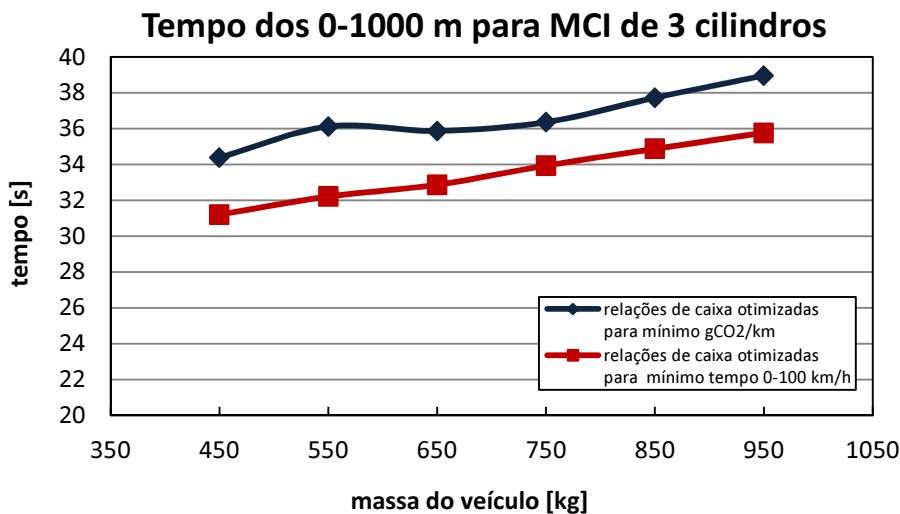


Figura 33 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-1000 m com a massa do veículo para o MCI de 3 cilindros.

A Figura 34 apresenta os resultados dos ensaios dos tempos de 0-1000 m dos automóveis equipados com o MCI de 4 cilindros para ir de 0-1000 m. A Figura 34 observamos que o tempo de 0-1000 m evolui de forma quase linear com a massa do veículo para os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h. Para os veículos equipados com as caixas de velocidades com as relações otimizadas para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km já não observamos uma evolução linear do tempo de 0-1000 m com a massa do veículo, uma vez que há um aumento linear com a massa do veículo no intervalo 450-650 kg atingindo-se um máximo para a massa do veículo de 650 kg depois o tempo de 0-1000 m reduz para a massa de 750 kg e mantém-se até à massa de 850 kg. A partir de 850 kg do tempo de 0-400 m volta a variar de forma linear com a massa do veículo. Os veículos equipados com caixas de velocidades com as relações otimizadas para o tempo de 0-100 km/h têm um tempo de 0-1000 m menor que os veículos que possuem as caixas de velocidades otimizadas para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

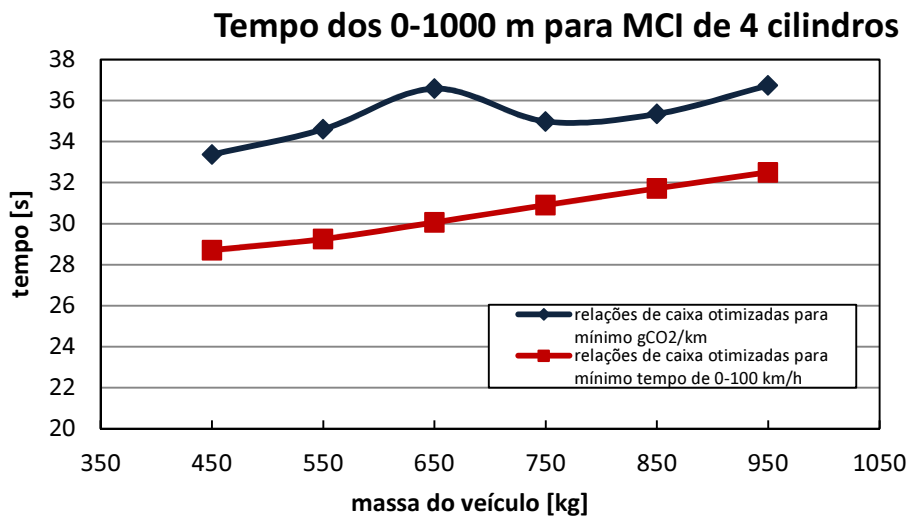


Figura 34 – Evolução dos tempos de aceleração de 0-1000 m com a massa do veículo para o MCI de 4 cilindros.



## 6. SELEÇÃO DO MCI

### 6.1. Critérios de seleção do MCI

Com os resultados dos ensaios anteriormente apresentados, estabeleceram-se critérios para escolher qual o melhor motor para equipar um automóvel utilitário. O veículo ter que ser suficientemente seguro para transportar os seus ocupantes assim a massa do veículo deve ser entre 700 kg e 800 kg. Nesse caso o motor deve poder proporcionar ao veículo um desempenho aceitável, permitindo acelerar de 0-100 km/h em menos de 15 s. O motor a escolher será o que permite ao veículo ter as menores emissões de CO<sub>2</sub> e expressas em gCO<sub>2</sub>/km.

A Figura 35 apresenta os resultados obtidos nos ensaios do tempo de aceleração de 0-100 km/h de cada automóvel equipado com os diversos motores ensaiados, e com diferentes caixas de velocidades. Com os resultados de todos os ensaios de tempo de aceleração reunidos na Figura 35, podemos fazer uma comparação rápida e precisa para escolher o melhor conjunto motor-automóvel que satisfaz os critérios de seleção estabelecidos.

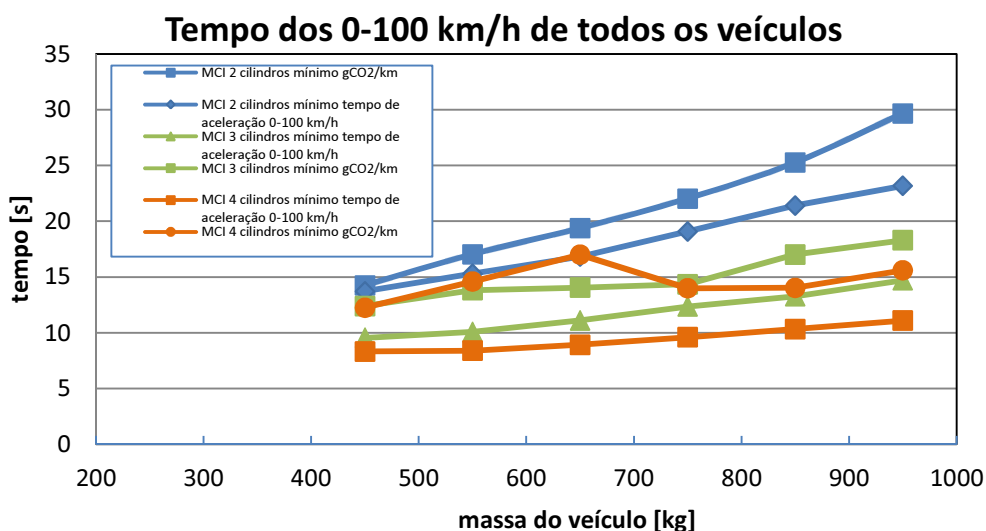


Figura 35 – Resultados do ensaio de tempo de 0-100 km/h para os vários veículos.

A Figura 36 mostra os resultados obtidos no ensaio NEDC para cada veículo equipado com os diferentes motores, e com os dois tipos de caixa de velocidades, uma a

otimizada para o mínimo tempo de aceleração de 0-100 km/h e a outra para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

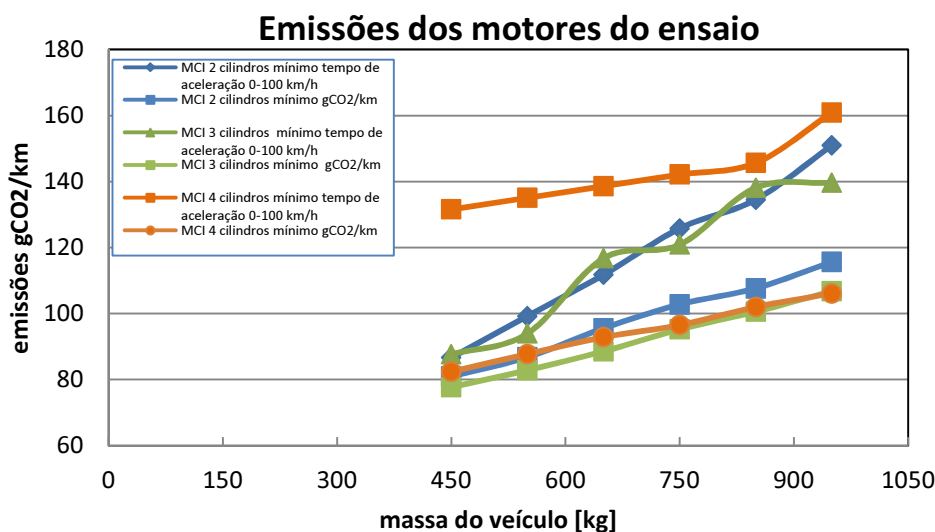


Figura 36 – Resultados das emissões de CO<sub>2</sub> para os vários veículos no ensaio NEDC.

Recorrendo à Figura 35 e à Figura 36 para selecionar o melhor conjunto motor-veículo verificamos que o melhor conjunto depende do principal critério utilizado para a escolha.

Depois de consultar a Figura 35 verificamos que no caso do critério do tempo de 0-100 km/h, há três motores que claramente cumprem o critério, e existe mais um motor-veículo em que o tempo de aceleração é próximo do pretendido. O motor de dois cilindros é o único em que o tempo de aceleração é superior em mais de 20% em relação ao estabelecido no critério.

O critério de mínimas emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km que pode ser verificado por consulta na Figura 36, permite selecionar o MCI de 3 cilindros com a caixa de velocidades otimizada para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.

O MCI de 4 cilindros é ligeiramente mais rápido mas as suas emissões são superiores às do MCI de 3 cilindros. Assim o melhor para equipar um veículo utilitário é o motor de 3 cilindros.

Em anexo encontram-se as tabelas com os vários factores utilizados nas relações de caixa de velocidades para cada situação anteriormente apresentada.

A Tabela 10 contém algumas das características do motor que melhor satisfaz os critérios que foram anteriormente estabelecidos para a escolha do motor. Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos ensaios e as características do motor escolhido. A tabela

tem o consumo do veículo nos ciclos ensaiados, o tempo de aceleração e as emissões de CO<sub>2</sub> do automóvel com o motor escolhido.

**Tabela 10 – Dados técnicos do motor que preenche os critérios de escolha.**

	<b>MEA.3</b>
Motor de combustão interna	1021 cm <sup>3</sup>
Combustível usado	Gasolina
Potência máxima [kW] / rpm	40,39 às 6000
Binário máximo [N·m] / rpm	82,29 às 2600
Consumo combinado [L/100 km]	3,98
Consumo urbano [L/100 km]	4,90
Consumo extra-urbano [L/100 km]	3,33
Emissões de CO <sub>2</sub> [g/km]	95,20
Relação de compressão	10.2:1
Diâmetro × Curso [mm × mm]	75,0 × 77,0
Velocidade máxima [km/h]	158
Aceleração 0-100 km/h [s]	14,9
Massa do veículo em vazio [kg]	750

## 6.2. Comparação com os MCI semelhantes no mercado

Com o MCI encontrado, foi-se à procura de alguns modelos de automóveis que hoje em dia circulam nas estradas com motor semelhante ao motor que obtivemos no estudo. Depois de uma pesquisa foram encontrados vários modelos de automóveis com motores parecidos ao do estudo. Nas Tabelas 11 a 13 apresentam-se esses mesmos modelos com algumas das características dos seus motores.

A Tabela 11 apresenta algumas das características do veículo Aygo da Toyota. Na tabela podemos ver os consumos realizados pelo veículo e as suas emissões nos vários ciclos. Também contém a velocidade máxima que pode atingir e o tempo que demora a alcançar os 100 km/h.

Tabela 11 – Dados técnicos do Toyota Aygo, adaptado [17].

<b>Toyota</b>	<b>Aygo</b>	
Motor de combustão interna	1.0 VVT-i 5 Speed MultiMode	1.0 VVT-i 5 Manual
Combustível usado	Gasolina	Gasolina
Potência máxima [kW] / rpm	50,0 às 6000	50,0 às 6000
Binário máximo [N·m] / rpm	93,0 às 3600	93,0 às 3600
Consumo combinado [L/100 km]	4,6	4,6
Consumo urbano [L/100 km]	5,5	5,5
Consumo extra-urbano [L/100 km]	4,1	4,0
Emissões de CO <sub>2</sub> [g/km]	109,0	109,0
Relação de compressão	10,5:1	10,5:1
Diâmetro × Curso [mm × mm]	71,0 × 84,0	71,0 × 84,0
Velocidade máxima [km/h]	157	157
Aceleração 0-100 km/h [s]	14,9	14,2
Massa do veículo em vazio [kg]	930	930

A Tabela 12 apresenta algumas das características do veículo Insight da Honda. Na tabela podemos ver os consumos realizados pelo veículo e as suas emissões nos vários ciclos. Também contém a velocidade máxima que pode atingir e o tempo que demora a alcançar os 100 km/h.

Tabela 12 – Dados técnicos do Honda Insight, adaptado [14].

<b>Honda</b>	<b>Insight 1.0</b>
Motor de combustão interna	SOHC 12 valve VTEC PGM-FI 995cc
Combustível usado	Gasolina
Potência máxima [kW] / rpm	50,0 às 5700
Binário máximo [N·m] / rpm	94,0 às 4800
Consumo combinado [L/100 km]	3,4
Consumo urbano [L/100 km]	4,1
Consumo extra-urbano [L/100 km]	3,0
Emissões de CO <sub>2</sub> [g/km]	80,0
Relação de compressão	10,8:1
Aceleração 0-100 km/h [s]	12,0
Diâmetro × Curso [mm] × [mm]	72,0 × 81,5
Massa do veículo em vazio [kg]	838

A Tabela 13 apresenta algumas das características do veículo Picanto da Kia. Na tabela podemos ver os consumos realizados pelo veículo e as suas emissões nos vários ciclos. Também contém a velocidade máxima que pode atingir e o tempo que demora a alcançar os 100 km/h.

**Tabela 13 – Dados técnicos do Kia Picanto [18].**

<b>Kia</b>	<b>Picanto 1.0 EX</b>
Motor de combustão interna	3 cilindros em linha 12v 998cc
Combustível usado	Gasolina
Potência máxima [kW] / rpm	50,75 às 6200
Binário máximo [N·m] / rpm	95,0 às 3500
Consumo combinado [L/100 km]	4,2
Consumo urbano [L/100 km]	5,4
Consumo extra-urbano [L/100 km]	3,6
Emissões de CO <sub>2</sub> [g/km]	99
Relação de compressão	10,1:1
Velocidade máxima [km/h]	153
Aceleração 0-100 km/h [s]	14,4
Diâmetro x Curso [mm] x [mm]	71,0 × 84,0
Massa do veículo em vazio [kg]	845

## 7. CONCLUSÕES

O objectivo de encontrar qual o melhor conjunto motor-veículo foi conseguido através da análise de resultados dos programas de simulação. O projecto pormenorizado do motor não foi possível de concretizar na totalidade, faltando produzir em programa de CAD os desenhos dos componentes do motor escolhido.

Os resultados obtidos dos vários programas utilizados permitem prever o comportamento do motor quando ele propuliona um veículo com uma determinada massa. O programa de simulação do ciclo de funcionamento do motor permitiu obter o desempenho e o consumo de combustível em todos os regimes de velocidade e carga de operação do motor, através da obtenção da curva de binário máximo e do plano cotado de consumo específico de cada motor.

O programa de simulação do ensaio NEDC permitiu prever o consumo e emissões de todos os veículos sem ter que construir os motores e veículos e realizar o ensaio num banco de ensaios para o efeito. O programa de simulação dos tempos de aceleração permite conhecer o tempo que cada automóvel precisa para acelerar até uma determinada velocidade ou para percorrer uma determinada distância desde a velocidade zero.

Estas ferramentas possibilitam afirmar que o motor de combustão interna mais adequado para equipar um automóvel utilitário é um de 3 cilindros com a cilindrada próxima dos 1000 cm<sup>3</sup>. O motor com estas características consegue movimentar um automóvel em circuitos urbanos e extra-urbanos com bons resultados de emissões e tempos de aceleração.

Com os resultados consegue dizer-se com clareza qual é o melhor motor para ser fabricado e equipar um automóvel utilitário. O estudo faz com que seja possível dar o passo seguinte de criar um motor para um automóvel utilitário, reduzindo o número de motores que teriam que ser fabricados e ensaiados para chegar à conclusão de qual o melhor motor para equipar o automóvel.

O passo seguinte será o projeto pormenorizado e desenho do motor em CAD de acordo com os resultados obtidos pelos programas de simulação.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Ogawa, M. Matsuki, and T. Eguchi, “Development of a Power Train for the Hybrid Automobile The Civic Hybrid”, *SAE Paper*, No. 2003-01-0083.
- [2] D. Sclar, “What Are Hybrid Vehicles?” Acedido a 3 de Dezembro 2010, em: <http://www.dummies.com/how-to/content/what-are-hybrid-vehicles.navId-323640.html>.
- [3] A. Seneca (2010), “Ultracapacitor heavy hybrid vehicle: Model Predictive Control using future information to improve fuel consumption”, M.Sc. Thesis, Clemson University, Acedido a 6 de Dezembro 2010, em: <http://www.grin.com/en/doc/248773/ultracapacitor-heavy-hybrid-vehicle-model-predictive-control-using-future>.
- [4] SA 5 de Maio 2011, “How Hybrids Work” Acedido a 5 de Dezembro 2010, em: <http://4mechanical.com/how-hybrids-work.html>
- [5] T. Ozeki and M. Umeyama, “Development of Toyota’s Transaxle for Mini-van Hybrid Vehicles”, *SAE Paper*, No. 2002-01-0931.
- [6] M. Takimoto, “Experience and Perspective of Hybrids”, *SAE Paper*, No. 2002-21-0068.
- [7] K. Itagaki, T. Teratani, Kuramochi, S. Nakanura, T. Tachibana, H. Nakao, and Y. Kamijo, “Development of the Toyota Mild-Hybrid System (THS-M)”, *SAE Paper*, No. 2002-01-0990.
- [8] T. Inoue, M. Kusada, H. Kanai, S. Hino, and Y. Hyodo, “Improvement of a Highly Efficient Hybrid Vehicle and Integrating Super Low Emissions”, *SAE Paper*, No. 2000-01-2930.
- [9] Administração Toyota (Julho 2010), “Toyota Prius”, Acedido a 5 de Dezembro 2010, em <http://autoraider.com/2010/07/toyota-prius/>.
- [10] G. Gao, (23 de Junho 2009), “Guangzhou Toyota to build Previa MPV in 2012,” Acedido a 20 de Dezembro 2010, em <http://autonews.gasgoo.com/china-news/guangzhou-toyota-to-build-previa-mpv-in-2012-090623.shtml>.
- [11] (8 de Maio 2009), “Toyota Crown and Camry in China”, Acedido a 20 de Dezembro 2010, em <http://toyotaworld.net/2009/05/toyota-crown-and-camry-in-china/>.

- 
- [12] T. Pollard, (4 de Setembro 2008), “Honda Insight 2 concept (2009) first photos,” Acedido a 20 de Dezembro 2010, em: <http://www.carmagazine.co.uk/News/Search-Results/First-Official-Pictures/Honda-Insight-2-concept-2009-first-photos/>.
- [13] K. Aoki, S. Kuroda, S. Kajiwara, H. Sao, and Y. Yamamoto, “Development of Integrated Motor Assist Hybrid System: Development of the Insight, a personal Hybrid Coupe”, *SAE Paper*, No. 2000-01-2216.
- [14] R. Hodkinson, J. Fenton, “Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design”. Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2001.
- [15] Enciclopédia Wikipedia, *Honda Insight*, Acedido a 5 de Dezembro 2010, em [http://en.wikipedia.org/wiki/Honda\\_Insight](http://en.wikipedia.org/wiki/Honda_Insight)
- [16] Regulamento (CE) n° 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de Junho de 2007.
- [17] Toyota Acedido a 5 de Fevereiro 2011, em: [http://www.toyota-europe.com/cars/new\\_cars/aygo/fullspecs.aspx](http://www.toyota-europe.com/cars/new_cars/aygo/fullspecs.aspx)
- [18] Ouro J., “Teste Kia Picanto 1.0 EX (69 cv)”, *Auto Foco*, n°583, p 26-27, 26 de Maio a 1 de Junho de 2011.
- [19] R. Câmara, “Estudo Aerodinâmico da Carroçaria de um Veículo Automóvel Utilitário Cidadino”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Automóvel, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.
- [20] Acedido a 20 de Maio 2011 <http://www.tpub.com/engine3/en3-15.htm>
- [21] John B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill International Editions, Automotive Technology Series, 1988.
- [22] Yunus A. Çengel and Michael A. Boles, “Thermodynamics: An Engineering Approach”, McGraw-Hill, 5<sup>th</sup> edition, 2006.
- [23] Ciclo Otto, Acedido a 20 de Março 2011, em: <http://www.tpub.com/engine3/en3-15.htm>
- [24] *Revue Technique Automobile*, “Peugeot 206 Phase 1 de 09/1998 à 03/2003 essence 1.1-1.4-1.6 (8 et 16 soupapes) Diesel 1.9 D et 2.0 HDi”, E.T.A.I., Paris, Janvier 2009.



## ANEXO

### Relações de caixa

Todas as caixas de velocidades utilizadas nas simulações nos programas têm por base a caixa de velocidade do Peugeot 206, MA/5N índice 20CF09 [24]. A cada relação de transmissão da caixa de velocidades é aplicado um factor para reduzir ou aumentar a relação de acordo com o pretendido a nível de desempenho do veículo. Se a caixa pretendida for para menor tempo aceleração ou se for para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km do veículo. Na Tabela 14 são apresentadas as relações utilizadas na caixa de velocidades do Peugeot 206 e que são base para a caixa de velocidades dos veículos em estudo.

Tabela 14 – Relações da caixa de velocidades do Peugeot 206.

Mudança	Relação de transmissão
1ª	(41/12)
2ª	(38/21)
3ª	(37/29)
4ª	(39/40)
5ª	(33/43)
Marcha atrás	(43/12)

As relações de transmissão da caixa de velocidades utilizada são ajustadas de acordo com o motor e a massa do veículo. As relações de transmissão são afinadas para obter o mínimo emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km num caso ou o menor tempo aceleração do veículo noutro caso. A seguir são apresentadas as tabelas com os factores multiplicativos de cada relação de caixa para cada caixa de velocidades, para cada motor e para as diferentes massas que o veículo pode ter.

### Relações de transmissão para o MCI de 4 cilindros

As tabelas seguintes contêm os factores multiplicativos, de cada relação de transmissão, usados em cada caixa de velocidades para minimizar o tempo aceleração ou

minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km. As caixas são aplicadas em cada veículo de massa diferente com o motor de 4 cilindros.

**Tabela 15 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para o mínimo emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.**

	950 kg	850 kg	750 kg	650 kg	550 kg	450 kg
1ª	0,45	0,45	0,40	0,30	0,30	0,30
2ª	0,49	0,48	0,30	0,38	0,37	0,37
3ª	0,42	0,43	0,39	0,35	0,35	0,34
4ª	0,47	0,48	0,43	0,40	0,40	0,40
5ª	0,56	0,55	0,52	0,49	0,46	0,42

**Tabela 16 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para menor tempo de aceleração 0-100 km/h.**

	950 kg	850 kg	750 kg	650 kg	550 kg	450 kg
1ª	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2ª	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3ª	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4ª	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5ª	1,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

### Relações de transmissão para o MCI de 3 cilindros

As tabelas seguintes contêm os factores multiplicativos, de cada relação de transmissão, usados em cada caixa de velocidades para minimizar o tempo de aceleração ou minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km. As caixas são aplicadas em cada veículo de massa diferente com o motor de 3 cilindros.

**Tabela 17 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para o mínimo emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.**

	950 kg	850 kg	750 kg	650 kg	550 kg	450 kg
1ª	0,60	0,60	0,65	0,50	0,40	0,40
2ª	0,71	0,65	0,65	0,55	0,45	0,40
3ª	0,57	0,53	0,50	0,45	0,40	0,35
4ª	0,64	0,60	0,60	0,50	0,46	0,41
5ª	0,77	0,73	0,70	0,65	0,61	0,57

**Tabela 18 – Fatores da caixa de velocidades otimizada para menor tempo de aceleração 0-100 km/h.**

	950 kg	850 kg	750 kg	650 kg	550 kg	450 kg
1ª	1,20	1,10	0,45	0,85	0,72	0,75
2ª	1,20	1,10	1,00	1,00	0,88	0,80
3ª	1,10	1,20	1,00	1,00	0,86	0,86
4ª	1,10	1,10	1,00	1,00	0,75	0,85
5ª	1,10	1,20	1,00	1,00	0,70	0,85

### Relações de transmissão para o MCI de 2 cilindros

As tabelas seguintes contêm os factores multiplicativos, de cada relação de transmissão, usados em cada caixa de velocidades para mínimo tempo de aceleração ou minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km. As caixas são aplicadas em cada veículo de massa diferente com o motor de 2 cilindros.

**Tabela 19 – Factores da caixa de velocidades otimizada para o mínimo de emissões de CO<sub>2</sub> em gCO<sub>2</sub>/km.**

	950 kg	850 kg	750 kg	650 kg	550 kg	450 kg
1ª	0,68	0,71	0,70	0,72	0,75	0,75
2ª	1,00	0,93	0,89	0,82	0,75	0,75
3ª	0,80	0,74	0,72	0,65	0,57	0,55
4ª	0,95	0,88	0,86	0,80	0,70	0,60
5ª	1,23	1,13	1,12	1,05	0,91	0,84

**Tabela 20 – Factores da caixa de velocidades otimizada para menor tempo de aceleração 0-100 km/h.**

	950 kg	850 kg	750 kg	650 kg	550 kg	450 kg
1ª	1,72	1,62	1,50	1,20	1,00	0,79
2ª	1,58	1,52	1,35	1,20	1,00	0,81
3ª	1,55	1,31	1,31	1,20	1,00	0,85
4ª	1,62	1,30	1,26	1,20	1,00	0,80
5ª	1,50	1,30	1,25	1,05	1,00	0,88

### Variáveis fixas na simulação do tempo de aceleração e no do ciclo NEDC

Nos programas de simulação do ciclo NEDC e de simulação do tempo de aceleração há variáveis do automóvel que são fixas como o diâmetro e o momento de inércia das rodas.

**Tabela 21 – Variáveis fixas nas simulações dos tempos de aceleração e nas simulações do ciclo NEDC.**

	Variáveis fixas dos veículos
Diâmetro da roda [m]	0,5831
Momento de inércia de cada roda [kg·m <sup>2</sup> ]	0,28854
Área frontal [m <sup>2</sup> ]	1,742
Coefficiente de arrasto aerodinâmico	0,2291
Rendimento da transmissão	0,875
Relação do diferencial	(65/16)

O diâmetro da roda foi calculado com base no pneu 175/65 R14, sendo esta medida de pneumático que foi escolhida para equipar o veículo. O momento de inércia da roda foi

obtido através do programa Autodesk Inventor onde foi desenhada a jante e foi retirado o valor do momento de inércia para o material, aço, em que as jantes serão construídas. Os valores da área frontal e do coeficiente de arrasto aerodinâmico foram retirados da tese de mestrado do Rui Câmara [19]. O valor da relação do diferencial é igual ao utilizado pela Peugeot para esta caixa de velocidades.