



# ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DA GESTÃO DA EGR UTILIZADA EM UNIDADES DE CONTROLO EDC15P+

**RÚBEN JOSÉ FERREIRA NOGUEIRA**

outubro de 2024

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DA GESTÃO DA VÁLVULA  
EGR UTILIZADA EM UNIDADES DE CONTROLO DO  
MOTOR BOSCH EDC15P+**

**Rúben José Ferreira Nogueira**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Automóvel**

**Orientador: Prof. Dr. Fernando José Ferreira**  
**Co-Orientador: Eng. Miguel Ferreira da Cunha**

**Júri:**

Presidente:

Prof. Dr. Jorge Manuel Costa Da Fonseca Justo, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Prof. Dr. Fernando José Ferreira, Professor Coordenador, ISEP

Prof. Dr. Miguel Ângelo Nogueira Costa Oliveira, Professor Adjunto Convidado, ISEP

Porto, outubro 2024



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio incondicional, pelo amor e por me acompanharem sempre, não apenas durante a fase de desenvolvimento da Dissertação, mas ao longo de todo o percurso acadêmico.

À Bia, expresso o meu sincero agradecimento por todo o amor, cumplicidade, incentivo, preocupação e pelo apoio prestado no desenvolvimento da Dissertação.

À minha avó e tios agradeço por todas as palavras e gestos de motivação.

Ao Orientador Professor Doutor Fernando José Ferreira, expresso o meu mais sincero reconhecimento pela oportunidade concedida de realizar a Dissertação na área em que atuo profissionalmente, salientando toda a sua disponibilidade, conhecimento e aconselhamento ao longo da Dissertação.

À CHECKSUM e ao Co-Orientador Engenheiro Miguel Ferreira da Cunha, o meu agradecimento por todos os ensinamentos, conselhos e pela generosidade demonstrada na disponibilização dos equipamentos necessários para a concretização da Dissertação.

Ao Ivo, por todos os ensinamentos e pela partilha da sua experiência académica, e aos seus pais, pelo carinho e pelos gestos de bondade que tiveram para comigo.

Por fim, agradeço a todos os professores e colegas que fizeram parte do meu percurso académico, por toda a contribuição que, de algum modo, prestaram.

Obrigado por terem transformado um sonho em realidade!



## Resumo

Os motores de combustão interna, essenciais nas atividades modernas, estão em constante evolução. Contudo, o seu uso intensivo produz emissões de gases prejudiciais à atmosfera, suscitando preocupações ambientais. A necessidade de conciliar a eficiência dos motores com a redução de poluentes tornou-se uma prioridade, visando alcançar um equilíbrio sustentável entre a inovação tecnológica e a preservação ambiental. Neste contexto, o sistema de recirculação de gases de escape (EGR) assume-se como uma inovação crucial na redução das emissões.

Assim, ao longo da Dissertação, foi realizado um estudo sobre o sistema de EGR utilizado pelo fabricante no SEAT® Ibiza 1.4 TDI, com a unidade de controlo do motor EDC15P+. O estudo consistiu, em primeiro lugar, em demonstrar as diferentes formas de aceder à calibração da unidade de controlo, apresentando também as suas principais características. Posteriormente, foi iniciado o estudo do sistema de EGR, com base na documentação do fabricante, sendo apresentada e verificada na prática com o auxílio do *software* WinOLS® e do emulador da FLASH OLS 300. A utilização do equipamento OLS 300 permitiu que todas as alterações à calibração original fossem realizadas em tempo real no veículo, possibilitando a simulação de diferentes cenários de gestão do sistema de EGR.

O estudo foi realizado em banco de potência, com o auxílio de uma máquina de diagnóstico para visualização de parâmetros em tempo real. Utilizou-se também um osciloscópio para monitorizar o comportamento do atuador da válvula EGR e da borboleta do coletor de admissão, elementos essenciais no controlo do sistema. Adicionalmente, foi utilizado um analisador de gases para verificar a composição dos gases de escape em função das alterações realizadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** ECU, EGR, Fabricante OEM, Gestão de injeção, Motor de combustão interna, *diesel*, Programação e Reprogramação da ECU



## Abstract

Internal combustion engines, essential in modern activities, are constantly evolving. However, their intensive use generates emissions of harmful gases into the atmosphere, raising environmental concerns. The need to reconcile engine efficiency with pollutant reduction has become a priority, aiming to achieve a sustainable balance between technological innovation and environmental preservation. In this context, the Exhaust Gas Recirculation (EGR) system is considered a crucial innovation in reducing emissions.

Thus, in this Dissertation, a study was conducted on the EGR system used by the manufacturer in the SEAT® Ibiza 1.4 TDI, equipped with the EDC15P+ engine control unit. The study initially focused on demonstrating the different ways to access the control unit's calibration, also presenting its main characteristics. Subsequently, the EGR system was analyzed based on the manufacturer's documentation, and its functionality was verified in practice using the WinOLS® *software* and the FLASH OLS 300 emulator. The OLS 300 allowed all changes to the original calibration to be performed in real time on the vehicle, enabling the simulation of different EGR system management scenarios.

The study was conducted on a dynamometer, with the assistance of a diagnostic machine to monitor real-time parameters. An oscilloscope was also used to monitor the behavior of the EGR valve actuator and the intake manifold throttle, both essential elements in controlling the system. Additionally, a gas analyzer was used to verify the composition of the exhaust gases as a function of the changes made.

**KEYWORDS:** ECU, EGR, Injection management, Internal combustion engine, Diesel, OEM Producer, ECU Programming and Reprogramming



# Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos e Símbolos .....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.4. Organização da Dissertação .....	4
2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Motores de Ciclo <i>Diesel</i> .....	5
2.1.1. Evolução e Desenvolvimento do Ciclo <i>Diesel</i> .....	5
2.1.2. Princípio e Ciclo de Funcionamento dos Motores <i>Diesel</i> .....	6
2.1.3. Regulamentação Euro: Avaliação de Emissões e Conformidade em Veículos .....	6
2.2. Estratégias de Redução de Emissões .....	7
2.2.1. Evolução dos Testes de Controlo de Emissões: NEDC vs WLTP .....	8
2.2.2. Processo de Combustão.....	9
2.2.3. Formato do Pistão.....	11
2.2.4. Borboletas do Coletor de Admissão .....	12
2.2.5. Influência do Ponto de Início de Injeção de Combustível em Motores <i>Diesel</i> ...	12
2.2.6. Pré Injeção de Combustível .....	14
2.2.7. Pressão de Injeção de Combustível .....	15
2.3. Sistema de EGR.....	16
2.3.1. Tipos de Sistemas de EGR .....	18
2.3.2. Influência da Taxa de EGR no Consumo e nas Emissões .....	20
2.4. Sistema de Filtro de Partículas .....	21
2.5. Catalisador de Oxidação.....	24
2.6. Sonda Lambda .....	25
2.7. Conjunto do Catalisador e Filtro de Partículas.....	26
2.8. Sistema de Redução Catalítica Seletiva.....	27
2.8.1. Precauções no Processo de Enchimento do AdBlue.....	28
2.8.2. Processo de Transformação do $NO_x$ .....	29
2.8.3. Sistema Base de Redução Catalítica Seletiva .....	31
3. Gestão da EGR Segundo o Fabricante e as Características Principais da ECU .....	33
3.1. Unidade de Controlo do Motor.....	33
3.2. Modos de Leitura e Escrita da Unidade de Controlo do Motor .....	34
3.2.1. Modo <i>Bench</i> .....	34

3.2.2. Modo <i>Boot</i> .....	40
3.3. Controlo do Sistema da EGR Segundo o Fabricante .....	46
3.3.1. Seletor de Quantidade de Combustível .....	46
3.3.2. Cálculo do Valor de Real de Massa de Ar .....	47
3.3.3. Cálculo do Valor de Referência de Massa de Ar .....	49
3.3.4. Monitorização e Desativação .....	51
3.3.5. Controlo Paralelo .....	55
3.3.6. Regulador .....	55
4. Verificação Experimental da Calibração BOSCH® e Respetiva Reprogramação da ECU.....	57
4.1. Preparação da ECU para Reprogramação em Tempo Real .....	60
4.2. Instalação da ECU Reprogramável em Tempo Real e Preparação do Veículo .....	64
4.3. Reprogramação e Verificação Experimental da Calibração Apresentada no Sub- subcapítulo 3.3.3.....	65
4.4. Reprogramação e Verificação Experimental da Calibração Apresentada no Sub- subcapítulo 3.3.4.....	76
5. Conclusão .....	77
5.1. Conclusões finais .....	77
5.2. Trabalhos futuros .....	79
5.3. Limitações e Apreciação Global .....	79
6. Referências.....	81
Declaração de Integridade .....	83

## Lista de Figuras

Figura 1 - Ciclo de trabalho Diesel, adaptado de [4] .....	6
Figura 2- Influência da mistura nos produtos de reação da combustão, adaptado de [12].....	10
Figura 3- Influência do formato do pistão no processo de combustão, adaptado de [11] .....	11
Figura 4- Borboletas presentes no coletor de admissão, adaptado de [11].....	12
Figura 5- Influência do ponto de início de injeção de combustível, adaptado de [11].....	13
Figura 6- Influência do início de injeção nas emissões, adaptado de [11].....	14
Figura 7- Influência da pré injeção de combustível no ruído gerado pelo motor, adaptado de [10].....	15
Figura 8- Influência da pressão de injeção de combustível combinada com o ponto de início de injeção, adaptado de [11].....	15
Figura 9- Sistema base de funcionamento da EGR, adaptado de [12].....	16
Figura 10- Válvula solenoide de controlo do mecanismo da EGR com recurso a vácuo .....	17
Figura 11- Mecanismo elétrico de controlo do atuador da EGR.....	17
Figura 12- Eficiência do catalisador de oxidação .....	18
Figura 13- Sistema de EGR de alta pressão, adaptado de [11] .....	19
Figura 14- Sistema de EGR de baixa pressão, adaptado de [11].....	19
Figura 15- Influência da utilização da EGR nas emissões (a) e (b) e no consumo de combustível (c), adaptado de [11] .....	21
Figura 16- Representação de um filtro de partículas, adaptado de [11] .....	22
Figura 17- Sistema base de um filtro de partículas.....	23
Figura 18- Eficiência do catalisador em função da mistura de combustível utilizada, adaptado de [21].....	24
Figura 19- Representação base de uma sonda lambda .....	26
Figura 20- Conjunto de catalisador e filtro de partículas.....	27
Figura 21- Influência da composição do Adblue no seu ponto de congelação [27] .....	28
Figura 22- Injeção de AdBlue no sistema de escape.....	29
Figura 23- Reações químicas no catalisador de hidrólise .....	29
Figura 24- Conversão do $NO_x$ .....	30
Figura 25- Oxidação da amónia restante .....	30
Figura 26- Sistema base de redução catalítica seletiva .....	32
Figura 27 - Localização da Unidade de Controlo do Motor .....	33
Figura 28 - Características Principais da Unidade de Controlo do Motor.....	34
Figura 29 - Fonte de Alimentação .....	35
Figura 30 - Esquema de ligações para leitura e escrita da unidade de controlo do motor .....	35
Figura 31 - Cabo específico para unidades de controlo do motor EDC15P+ .....	36
Figura 32 - Plataforma de testes .....	36
Figura 33 - Ligação da unidade de controlo do motor à plataforma de testes e respetiva verificação do consumo de corrente .....	37
Figura 34 - Equipamento de diagnóstico e de reprogramação de unidades de controlo do motor .....	38

Figura 35 - Apresentação do esquema base para a leitura da informação da unidade de controlo do motor.....	38
Figura 36 – Procedimento para identificação da unidade de controlo do motor no equipamento do MPPS .....	39
Figura 37 - Características apresentadas no MPPS após a identificação da unidade de controlo do motor.....	39
Figura 38 - Leitura dos dados do imobilizador contidos na EEPROM .....	40
Figura 39 - Componentes principais da unidade de controlo do motor.....	41
Figura 40 - Processador.....	42
Figura 41 - EEPROM 24C04 .....	42
Figura 42 - Número de chassis apresentado na estrutura do veículo .....	43
Figura 43 - Número de chassis apresentado na informação da EEPROM .....	43
Figura 44 - FLASH AM29F400BT.....	44
Figura 45 - Pino de boot.....	45
Figura 46 - Leitura de calibração da unidade de controlo em modo boot .....	45
Figura 47 - Esquema base de controlo do sistema de EGR.....	46
Figura 48 - Seletor de quantidade de combustível de referência.....	47
Figura 49 - Cálculo do valor real de massa de ar .....	48
Figura 50 - Controlo de plausibilidade .....	49
Figura 51 - Cálculo do valor de referência de massa de ar .....	50
Figura 52 - Monitorização do sistema de EGR .....	51
Figura 53 - Desativação do sistema de EGR em função da temperatura do líquido de refrigeração do motor na fase de arranque .....	52
Figura 54 - Desativação do permutador de calor em função da temperatura do motor e da massa de ar de referência.....	53
Figura 55 - Desativação do sistema de EGR em função da quantidade de injeção de referência.....	54
Figura 56 - Desativação do sistema de EGR em função do pedido de pressão de turbo .....	55
Figura 57 - Software WinOLS® com a apresentação dos setores e respetiva calibração .....	57
Figura 58 - Descrição detalhada da aplicação do Damos na calibração .....	58
Figura 59 - Exemplo da comprovação da gestão do sistema da EGR segundo o fabricante na calibração da ECU .....	59
Figura 60 - Apresentação das propriedades do mapa arwMLGRDKF e comprovação da gestão do sistema da EGR segundo o fabricante.....	60
Figura 61 - Remoção da FLASH da ECU .....	61
Figura 62 - Remoção do excesso de solda com recurso a malha de cobre e a um ferro de soldar a estanho.....	61
Figura 63 - Processo de montagem do adaptador do OLS 300.....	62
Figura 64 - Comunicação da unidade de comando com o OLS 300 e o WinOLS® .....	63
Figura 65 - Fixação do veículo ao banco do ensaio.....	64
Figura 66 - Substituir a ECU original do veículo pela ECU de testes incorporada com o emulador OLS 300.....	65
Figura 67 - Excerto da parte relevante do esquema elétrico da ECU para realizar o ensaio.....	66

Figura 68 - Ligação do osciloscópio ao atuador válvula EGR e à borboleta do coletor de admissão para verificação do duty-cycle .....	67
Figura 69 - Ciclo de trabalho do atuador da válvula EGR e da borboleta do coletor de admissão ao ralenti .....	68
Figura 70 - Alteração do valor de massa de ar de referência para o valor máximo do mapa ...	69
Figura 71 - Ciclo de trabalho da válvula EGR e da borboleta do coletor de admissão ao ralenti em função do valor máximo de massa de ar de referência do mapa .....	70
Figura 72 – Instalação do analisador de gases e da sonda lambda no escape .....	70
Figura 73 - Influência da utilização da EGR nas emissões ao ralenti com a calibração original (a) e (b) e com o mapa base de massa de ar de referência modificado (c) e (d).....	72
Figura 74 - Comprovação e apresentação do esquema da Figura 51 na calibração.....	73
Figura 75 - Alteração do valor de massa de ar de referência para comprovação da gestão da calibração realizada pela BOSCH® .....	74
Figura 76 - Correções realizadas ao valor base de massa de ar em função da pressão atmosférica e da temperatura do líquido de refrigeração do motor .....	74
Figura 77 - Apresentação dos valores de massa de ar pedido e o respectivo valor de massa de ar medido visualizados na máquina de diagnóstico .....	75
Figura 78 - Alteração do tempo mínimo para que o veículo reconheça que existe uma anomalia no sistema da EGR.....	76



## **Lista de Tabelas**

Tabela 1- Normas Euro, adaptado de [5] .....	7
Tabela 2- Comparação de testes de emissões NEDC vs WLTP, adaptado de [8] .....	8



## Lista de Acrónimos e Símbolos

<i>HNCO</i>	Ácido isociânico
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Água
<i>NH<sub>3</sub></i>	Amoníaco
ACEA	<i>Association des Constructeurs Européens d'Automobiles</i>
<i>C</i>	Carbono
<i>NO<sub>x</sub></i>	Compostos à base de Óxidos de Nitrogénio
CAN	<i>Controller Area Network</i>
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Carbono
<i>SO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Enxofre
ECU	<i>Engine Control Unit</i>
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos
<i>H</i>	Hidrogénio
MPPS	<i>Magic Power Pro Service</i>
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
<i>N</i>	Nitrogénio
OBD	<i>On-Board Diagnostics</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
<i>O<sub>2</sub></i>	Oxigénio
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RAM	<i>Random Access Memory</i>
<i>(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO</i>	Ureia
VDA	<i>Verband der Automobilindustrie</i>
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure</i>



# 1. Introdução

Neste capítulo, faz-se uma introdução ao tema em análise, explicando o contexto e a importância do estudo realizado. Em seguida, apresenta-se a motivação que levou à escolha deste tema e definem-se os principais objetivos a alcançar com o trabalho. Por fim, é fornecida uma visão geral da estrutura do documento, destacando os principais tópicos que foram abordados ao longo da Dissertação.

## 1.1. Contextualização

Atualmente, os motores de combustão interna desempenham um papel crucial nas diversas atividades realizadas pela sociedade moderna, passando por constantes fases de desenvolvimento e atualização. No entanto, a sua utilização excessiva promove a emissão de grandes quantidades de gases de escape para a atmosfera, abordando questões ambientais que exigem a implementação de medidas para mitigar os impactos prejudiciais, tanto para o ambiente como para a saúde de todos os seres vivos. Por isso, a busca de soluções que permitam conciliar a eficiência dos motores com a redução dos efeitos poluentes, tornou-se uma prioridade para garantir um equilíbrio sustentável entre a inovação tecnológica da engenharia e a preservação do meio ambiente.

O sistema de recirculação de gases de escape (EGR) revela-se uma inovação crucial na redução de emissões nos motores de combustão interna. Ao redirecionar-se uma parte dos gases de escape à câmara de combustão, permite uma diminuição da temperatura do processo de combustão, reduzindo a probabilidade de formação de óxidos de nitrogénio ( $NO_x$ ) prejudiciais para o meio ambiente. Desta forma, foi abordado as suas aplicações, benefícios e desafios.

Ao longo da Dissertação foi apresentado e verificado como é realizado o controlo eletrónico do sistema, simulando diversos cenários de gestão do mesmo e analisado o comportamento do veículo com auxílio de máquinas de diagnóstico e equipamentos de medição tais como osciloscópio e analisadores de gases de escape.

Como ponto de partida, foi necessário compreender como é feito o controlo do sistema de EGR, ou seja, em que dados e sensores se baseia e que tipo de componentes utiliza para receber os sinais, interpretá-los e de seguida colocar o sistema em funcionamento em função do mapeamento realizado na unidade de controlo do motor.

A unidade de controlo utilizada para o estudo é uma EDC15P+ do fabricante BOSCH®, amplamente instalada em veículos do grupo VAG, e em particular no SEAT® Ibiza 1.4 TDI, que foi utilizado como objeto de estudo.

Após estas considerações, foi necessário utilizar um *software* capaz de efetuar a leitura das memórias da unidade de controlo do motor, que contém toda a informação necessária. Em seguida, recorrendo ao *software* de reprogramação WinOLS®, iniciou-se o processo de mapeamento. Mapeamento esse que foi realizado em tempo real, ou seja, com o veículo no banco de potência, permitindo executar diversos testes e analisar os resultados obtidos. Realçar que, para uma melhor interpretação e auxílio no mapeamento da unidade de controlo recorreu-se à utilização de um Damos/A2L.

A Dissertação foi realizada nas instalações da empresa CHECKSUM, uma entidade com mais de duas décadas de experiência no setor automóvel e especializada em serviços de eletrónica, localizada na Rua Dom Frei António Montenegro, nº 390, Armazém A, 4465-572, em Leça do Balio, pertencente à cidade de Matosinhos. O desenvolvimento do trabalho de estudo foi desenvolvido com o auxílio do Co-Orientador Engenheiro Miguel Ferreira da Cunha, formado em Engenharia Mecânica Automóvel no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

A CHECKSUM oferece uma variedade de serviços, destacando-se no diagnóstico avançado de deteção de avarias em veículos, utilizando máquinas de diagnóstico e ferramentas como o osciloscópio para obtenção de resultados mais precisos e acreditados. Além disso, realiza testes especializados às unidades de controlo, verificando se as mesmas apresentam um correto funcionamento. Caso estejam em mau estado, podem ser feitos dois processos, em que o primeiro consiste na reparação da mesma e caso a gravidade dos danos não justifiquem a tentativa de reparação, é realizado o processo de clonagem da informação contida na unidade de controlo original para uma nova, permitindo o arranque do motor e o correto funcionamento do veículo.

A CHECKSUM também se destaca na reprogramação e afinação de unidades de controlo do motor, com o objetivo de otimizar a potência disponível, proporcionando uma experiência de condução mais agradável. No contexto do desporto automóvel, realiza trabalhos especializados de afinação e ajuste em banco de potência, visando tornar os veículos mais eficientes e competitivos.

Com a sua vasta experiência na área da eletrónica automóvel, rege formações para diversos tipos de sistemas de injeção, contribuindo para a expansão do conhecimento no domínio das unidades de controlo do motor.

## 1.2. Motivação

A motivação subjacente ao estudo detalhado do sistema de EGR é fundamentada na crescente preocupação ambiental e nas implicações diretas para a saúde pública. O sistema em questão desempenha um papel crucial na mitigação das emissões poluentes, contribuindo de maneira significativa para a preservação do meio ambiente.

Desta forma, pretendeu-se apresentar, analisar e verificar a gestão da EGR utilizada por um fabricante automóvel, dado que se trata de informação restrita que foi demonstrada ao longo da Dissertação, proporcionando um conhecimento adicional em relação ao que já se encontra disponível. Foram também apresentadas as principais características de uma unidade de

controlo EDC15P+, os modos de extração da sua informação, bem como a identificação e função dos seus componentes principais.

### 1.3. Objetivos

O objetivo desta Dissertação consiste em realizar um estudo pormenorizado ao sistema de EGR em motores *diesel*, equipado em unidades de controlo EDC15P+. Por isso, pretende-se:

- Apresentar e verificar a estratégia de gestão utilizada pelo fabricante;
- Demonstrar as formas de aceder à informação contida nas unidades de controlo do motor;
- Apresentar as diversas formas de mapear e recalibrar a ECU (*Engine Control Unit*);
- Mostrar em tempo real (via *RAM (Random Access Memory)*), a resposta da ECU e toda a gestão de diagnóstico da mesma;
- Simular diferentes cenários de gestão e interpretar os resultados.

Para cumprir com todos os requisitos foi necessário:

- Simulador da ECU em tempo real;
- Banco de ensaio/Monitorização;
- Equipamentos de diagnóstico e *datalog*;
- *Software* para edição, tratamento e interpretação da calibração *damos/A2L*;
- *Hardware e Software* para leitura/ escrita da calibração.

## 1.4. Organização da Dissertação

A Dissertação está estruturada em cinco capítulos distintos.

No Capítulo 1, correspondente à introdução, é apresentado o tema da Dissertação, bem como os principais objetivos a atingir. Além disso, é também apresentada a motivação subjacente ao desenvolvimento do tema e a respetiva organização do documento.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, detalhando estratégias para a redução de emissões. Dá-se especial ênfase ao sistema de EGR, sendo minuciosamente analisados os seus prós e contras, assim como os diferentes tipos de sistemas existentes e os respetivos modos de funcionamento. Também são abordados os sistemas de filtro de partículas, catalisadores de oxidação e sistemas de redução seletiva, visto que desempenham um papel crucial na diminuição das emissões. Adicionalmente, são apresentadas as condições ideais de funcionamento do motor, que não só reduzem a emissão de gases poluentes como também asseguram uma boa eficiência do veículo.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação da unidade de controlo do motor utilizada como base para o desenvolvimento da Dissertação, destacando as suas principais características e as diferentes formas de aceder à calibração. Este capítulo também se destina a demonstrar o controlo do sistema de EGR de acordo com as especificações do fabricante.

O Capítulo 4 é dedicado à realização da parte prática da Dissertação, preparando-se a unidade de controlo para ser reprogramada em tempo real, utilizando o emulador da FLASH OLS 300 e o *software* WinOLS®. A configuração da unidade de controlo para reprogramação em tempo real tem como objetivo facilitar o processo de testes. Posteriormente, é verificado, na prática, a gestão da EGR implementada pelo fabricante.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões e limitações do trabalho realizado, assim como propostas para trabalhos futuros.

## 2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo é dedicado à análise crítica do conhecimento existente do tema a abordar, explorando as contribuições de estudos anteriores para contextualizar e fundamentar o trabalho realizado.

### 2.1. Motores de Ciclo *Diesel*

Os motores a *diesel* desempenham um papel crucial no panorama automóvel e industrial, desenvolvendo veículos e máquinas essenciais para a sociedade moderna. Ao longo das décadas, estes motores passaram por uma notável evolução, marcada por avanços tecnológicos e pela necessidade de cumprir rigorosas regulamentações ambientais.

Neste subcapítulo será abordado o seu processo de desenvolvimento, os seus princípios fundamentais de funcionamento e, por último, analisar as regulamentações ambientais que delinearão a indústria automóvel e incentivaram o desenvolvimento de sistemas de redução de emissões, que foram continuamente aprimorados para cumprir com as restrições pretendidas.

#### 2.1.1. Evolução e Desenvolvimento do Ciclo *Diesel*

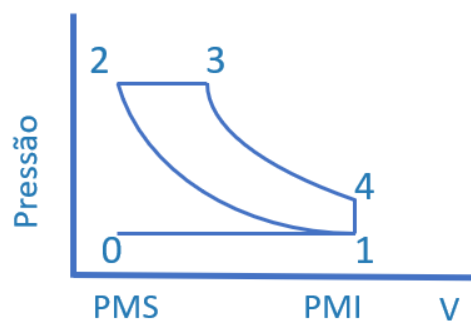
O motor de combustão interna a quatro tempos, utilizando *diesel* como combustível, foi desenvolvido por Rudolf Diesel em 1892. Rudolf nasceu em 1858 em Paris; no entanto, devido ao desfecho da Guerra Franco-Prussiana em 1870, foi obrigado a mudar-se para a Alemanha. Lá, realizou os seus estudos académicos e formou-se em Engenharia Mecânica, destacando-se como o melhor aluno.

Os seus resultados académicos excepcionais levaram ao convite para trabalhar com um professor universitário na área da termodinâmica, proporcionando-lhe competências essenciais para iniciar o desenvolvimento do motor de combustão interna *diesel* em 1885. Após alguns anos de pesquisa e desenvolvimento, em 1892, Rudolf conseguiu colocar o motor a funcionar pela primeira vez. Embora tenha operado apenas por alguns segundos, isso permitiu que Rudolf continuasse a desenvolver o seu projeto. Em 1896, apresentou uma solução funcional, com um rendimento termodinâmico significativamente superior ao da máquina a vapor, contribuindo assim para a revolução industrial [1] [2] [3].

### 2.1.2. Princípio e Ciclo de Funcionamento dos Motores *Diesel*

No ciclo teórico, o motor de combustão interna *diesel* opera admitindo ar durante a fase de admissão, no movimento descendente do pistão. Em seguida, ocorre a compressão, aumentando consideravelmente a temperatura e pressão na câmara de combustão. No final dessa fase, o combustível é injetado, iniciando a expansão a pressão constante. Após o fim da injeção, ocorre o ciclo de expansão, movendo o pistão até ao ponto morto inferior (PMI). No PMI a válvula de escape é aberta, ocorrendo o fenómeno de escape livre, diminuindo a pressão no interior do cilindro a volume constante. Por fim, o movimento até ao PMS do motor expulsa os gases resultantes da combustão para o sistema de escape [4].

De seguida, apresenta-se a Figura 1 que ilustra o ciclo teórico *diesel*.



- 0-1: Admissão
- 1-2: Compressão
- 2-3: Expansão a pressão constante
- 3-4: Expansão
- 4-1: Escape livre a volume constante
- 1-0: Escape

Figura 1 - Ciclo de trabalho Diesel, adaptado de [4]

### 2.1.3. Regulamentação Euro: Avaliação de Emissões e Conformidade em Veículos

A grande vantagem dos motores *diesel*, como já referido anteriormente, reside no seu rendimento termodinâmico, devido à sua elevada taxa de compressão. Por isso, o número de motores e veículos em circulação tem vindo a aumentar exponencialmente, contribuindo para o aumento das emissões de gases poluentes para a atmosfera, o que, por sua vez, prejudica a conservação do planeta e, conseqüentemente, a saúde humana. Desta forma, a partir da década de 80, a União Europeia sentiu a necessidade de desenvolver diretrizes para os veículos vendidos no Espaço Económico Europeu, que definissem os respetivos limites de emissões, aplicando a norma Euro 1 a partir do ano de 1992. Ao longo dos anos e com a visão de continuar a reduzir o número de emissões, através do desenvolvimento científico e tecnológico, foram criadas outras diretrizes. Atualmente, a que se encontra em vigor é a Euro 6. Salienta-se

também que, com o surgimento da obrigatoriedade do controlo das emissões de partículas ultrafinas, os fabricantes de automóveis sentiram a necessidade de implementar sistemas de escape com filtros de partículas, a partir da norma Euro 5 (apesar de algumas marcas já terem adotado essa solução anteriormente). Na Tabela 1, de acordo com a Associação de Construtores Europeus de Automóveis (ACEA), pode verificar-se a evolução das normas que restringem as emissões para motores *diesel* [5] [6].

Tabela 1- Normas Euro, adaptado de [5]

Características da Norma	Data de Aprovação	$NO_x+HC$ g/km	Massa de Partículas de g/km	Número de Partículas Ultrafinas por Quilómetro
Euro 1	01/07/1992	0,97	0,14	-
Euro 2	01/01/1996	0,9	0,1	-
Euro 3	01/01/2000	0,5	0,05	-
Euro 4	01/01/2005	0,25	0,025	-
Euro 5	01/09/2009	0,18	0,0045	$6 \times 10^{11}$
Euro 6	01/09/2014	0,08	0,0045	$6 \times 10^{11}$

A norma Euro 7, já definida, deverá entrar em vigor em 2025 e aborda três questões identificadas na norma Euro 6, que não contribuíram de forma eficiente para a redução necessária das emissões rodoviárias. Estes problemas incluem a complexidade das normas de emissões para veículos, limites de gases poluentes excessivos e um controlo insuficiente das emissões em condições reais de condução, que de acordo com a norma Euro 7, apresenta como objetivo reduzir as emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para a atmosfera a 100% até 2035. No entanto, as exigências de emissões inicialmente propostas por esta norma eram praticamente inexecutáveis, dada a restrição temporal ser extremamente curta, requerendo um esforço significativo da engenharia no desenvolvimento de novos sistemas de antipoluição e nos respetivos ensaios, acarretando custos elevados para a indústria e, por conseguinte, para o consumidor final. Assim, a União Europeia reformulou a diretiva, mantendo os limites impostos de emissões provenientes da combustão conforme definido na norma Euro 6, no entanto, propõe o controlo das partículas provenientes do uso dos travões e dos pneus. Além disso, dado o aumento significativo de veículos elétricos, a União Europeia deseja estabelecer requisitos mínimos para o desempenho e a durabilidade das baterias desses veículos [7].

## 2.2. Estratégias de Redução de Emissões

Neste subcapítulo serão abordadas estratégias de redução de emissões, com o foco na conformidade dos veículos nos padrões rigorosos de controlo ambiental, para a promoção de um ambiente mais limpo e sustentável.

### 2.2.1. Evolução dos Testes de Controlo de Emissões: NEDC vs WLTP

Antes dos veículos serem lançados no mercado para serem comercializados, desde a década de 80, foi criado o teste laboratorial *New European Driving Cycle* (NEDC). Este teste consiste na realização de ensaios no veículo para verificar o consumo de combustível e as respetivas emissões de  $CO_2$ . Devido ao aumento das restrições das emissões, tornou-se necessário desenvolver outro sistema mais rigoroso, capaz de aproximar os testes realizados ao tipo de condução diária. Surgiu então a *Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure* (WLTP), que entrou em vigor em setembro de 2017.

Importa realçar que, caso os limites impostos pela União Europeia não sejam cumpridos, os construtores dos veículos serão obrigados a pagar multas por cada grama de  $CO_2$  acima do limite estabelecido. Isso é altamente indesejável, pois implica também que os proprietários desses veículos paguem impostos significativamente mais elevados. Na Tabela 2, apresentam-se as principais diferenças entre os ensaios descritos anteriormente [8] [9].

Tabela 2- Comparação de testes de emissões NEDC vs WLTP, adaptado de [8]

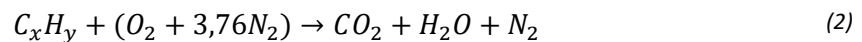
Método de Ensaio	NEDC	WLTP
Ciclo de Ensaio	Simple e menos realista	Mais complexo e aproximado às condições normais de circulação
Tempo de Ensaio	20 minutos	30 minutos
Distância de Ensaio	11 km	23,25 km
Fases do Ensaio	2 fases, sendo 66% do tempo realizado em cidade e os restantes 34% em regime não urbano	4 fases, sendo 52% do tempo em cidade e 48% em regime não urbano
Velocidade Média	34 km/h	46,5 km/h
Velocidade Máxima	120 km/h	131 km/h
Equipamento adicional	Não é relacionado o consumo de combustível com as emissões de $CO_2$ para a atmosfera	São utilizados diferentes equipamentos de medição de emissões para os diferentes tipos de veículos
Troca de caixa	As trocas de caixa são feitas em locais predefinidos	As trocas de caixa são feitas em locais diferentes para cada tipo de veículo
Temperaturas do ensaio	20 – 30°C	Os ensaios são feitos a 23°C, mas são efetuadas correções para temperaturas de 14°C (temperatura média Europeia)

### 2.2.2. Processo de Combustão

Desta forma, para que as fabricantes de automóveis consigam cumprir com a legislação, é necessário compreender minuciosamente todo o processo de combustão. Os combustíveis convencionais são hidrocarbonetos ( $HC$ ), com uma formulação genérica  $C_xH_y$ , constituídos por átomos de carbono ( $C$ ) e hidrogénio ( $H$ ) que, quando combinados com oxigénio ( $O_2$ ) em condições ideais, geram  $CO_2$  e água ( $H_2O$ ), conforme apresentado na equação química (1) [4] [10] [11].

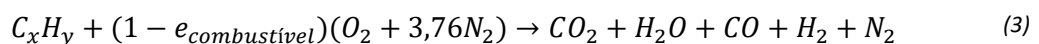


Contudo, na realidade, o processo de combustão de um  $HC$  é mais complexo, uma vez que a atmosfera contém outros gases além do  $O_2$ , como, por exemplo, em grande quantidade, o nitrogénio ( $N_2$ ), conforme apresentado na equação química (2) [4].



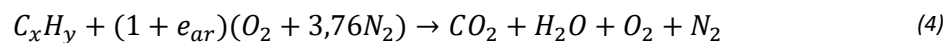
As alterações dos reagentes na reação química geram outros produtos de reação, sendo os principais o monóxido de carbono ( $CO$ ),  $HC$ , óxidos de nitrogénio ( $NO_x$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). Salienta-se também que a quantidade de  $CO_2$  e  $H_2O$  obtidas varia entre 10 e 20%, enquanto a de  $N_2$  e  $O_2$  varia entre 80 e 90%. Essas percentagens podem ser alteradas dependendo das condições em que o processo de combustão ocorre.

No caso da mistura ser rica, ou seja, apresentar um excesso de combustível, reduzirá a quantidade de  $CO_2$  e  $H_2O$ , resultando no aparecimento de  $CO$  e  $H_2$  nos produtos de reação, resultantes da queima incompleta do  $C$  e do  $H$ , conforme a equação química (3). Estes produtos promovem a formação de  $HC$  e  $CO$  sendo que o seu desenvolvimento ocorre em maior quantidade em motores a gasolina, uma vez que estes trabalham com misturas muito próximas da estequiométrica, contribuindo para a formação de nevoeiro fotoquímico e o surgimento de doenças respiratórias [4] [10] [11].



$e_{combustível} \rightarrow$  excesso de combustível

Se a mistura for pobre, ou seja, apresentar excesso de ar, existirá muito  $O_2$  e  $N_2$  não queimado no processo de combustão, que por consequência aparecerão então nos produtos de reação, como mostra a equação química (4). Deve-se salientar que esta abordagem é mais importante para motores a gasolina, uma vez que veículos a *diesel* operam sempre com excesso de ar e admitindo apenas ar e não propriamente com mistura. A combinação destes dois gases com temperaturas da câmara de combustão acima dos  $1750^\circ\text{C}$  promovem o aparecimento de  $NO_x$ , que também são gases considerados prejudiciais para a saúde [4] [10] [11].



$e_{ar} \rightarrow$  excesso de ar

Através das equações químicas (3) e (4), é possível verificar que a alteração do tipo de mistura influencia diretamente nos produtos de reação obtidos. Para tornar este conceito mais perceptível, é apresentada a Figura 2. Assim sendo, pode verificar-se que para misturas mais ricas, a quantidade de  $HC$  e  $CO$  são mais elevadas e vão diminuindo à medida que o valor da relação ar-combustível aumenta. Por outro lado, em ciclo OTTO, a quantidade de emissões de  $NO_x$  sobe até uma relação de ar-combustível de aproximadamente 17, mas de seguida volta a decrescer. Desta forma, para obter um processo de combustão ideal, o melhor seria utilizar misturas extremamente pobres, permitindo emitir valores baixos dos três gases em estudo. No entanto, na prática, não é exequível utilizar misturas com valor a rondar os 20, pois o motor não consegue funcionar corretamente. Por isso, em alternativa, os construtores dos veículos utilizam relações muito próximas da estequiométrica (14,7), pois essa é a que permite ter um bom desempenho do motor para quantidades de combustível que propiciam reduzir o nível de emissões para a atmosfera. [4] [12].

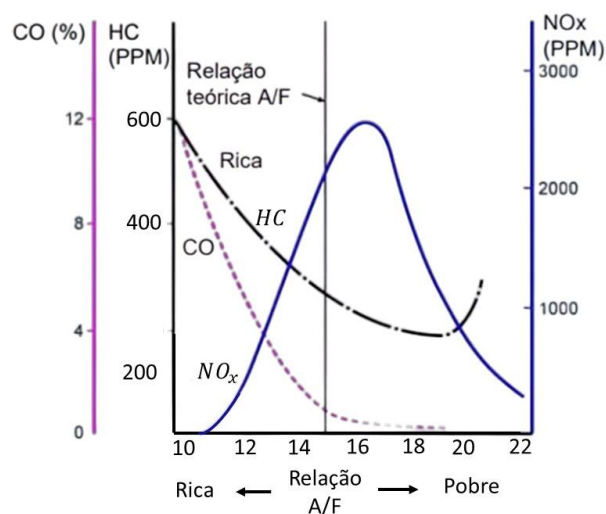


Figura 2- Influência da mistura nos produtos de reação da combustão, adaptado de [12]

### 2.2.3. Formato do Pistão

A afinação da mistura não é uma metodologia capaz de cumprir, por si só, com as normas Euro estabelecidas pelas Organizações da União Europeia. Portanto, é necessário implementar novas estratégias que o permitam fazer.

Além do tipo de mistura utilizada, as condições de operação do motor também são extremamente importantes. Assim, no processo de desenvolvimento do veículo, deve-se ter em conta o formato da câmara de combustão e das condutas de admissão, se o ar é naturalmente aspirado ou sobrealimentado, se utiliza o sistema de EGR e a forma como é feita a injeção de combustível.

Para que haja uma correta homogeneização da mistura, é essencial que a entrada de ar no motor seja feita de forma eficiente, assim como o formato do pistão e, conseqüentemente, a configuração da câmara de combustão, devem ser muito bem estudados. Todos os aspetos referidos, permitem um aumento do movimento do fluxo de ar e combustível no interior do cilindro, e desse modo, obter um processo de combustão mais eficaz. O tipo de pistão mais utilizado atualmente nos motores *diesel* possui um formato em  $\omega$ , como é possível visualizar na Figura 3 [11].

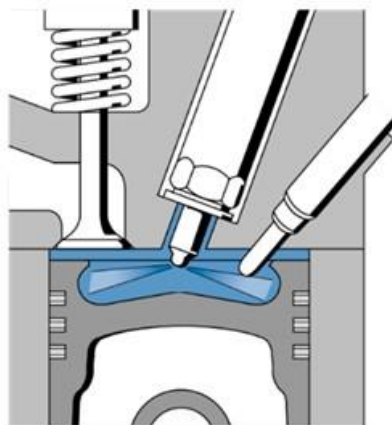


Figura 3- Influência do formato do pistão no processo de combustão, adaptado de [11]

Este tipo de pistão permite, para além de uma melhor homogeneização da mistura, aumentar a temperatura da câmara de combustão. Isso, por sua vez, resulta num aumento da pressão no cilindro, proporcionando uma melhor queima da mistura e, desta forma, diminuir as emissões de  $CO_2$ ,  $HC$ ,  $CO$  e fuligem. Contudo, este aumento de temperaturas no interior do cilindro propicia um aumento da formação de  $NO_x$ , que terá de ser tratado no sistema de escape [11] [13] [14].

#### 2.2.4. Borboletas do Coletor de Admissão

De forma a aprimorar o processo de combustão, são também utilizadas um conjunto de borboletas no coletor de admissão. Estas permitem direcionar com precisão o ar para dentro do cilindro, criando os turbilhões necessários na fase de admissão e compressão, para a mistura do ar e do combustível, em ciclo OTTO, de forma mais rápida e completa. A turbulência do ar também facilita a combustão no momento da injeção do *diesel* no fim da fase de compressão. O movimento gerado por este mecanismo controla o ar admitido para o cilindro, influenciando diretamente na carga do mesmo. Dessa forma, é possível otimizar o desempenho do motor para diferentes condições de carga e velocidade, ao mesmo tempo em que se controla o consumo de combustível. Este mecanismo é comandado a partir da unidade de controlo do motor, estando fechado para baixa carga e baixas rotações, e aberto na sua posição máxima para cargas elevadas e regimes de rotação também elevados. A Figura 4 apresenta o mecanismo descrito anteriormente [11].

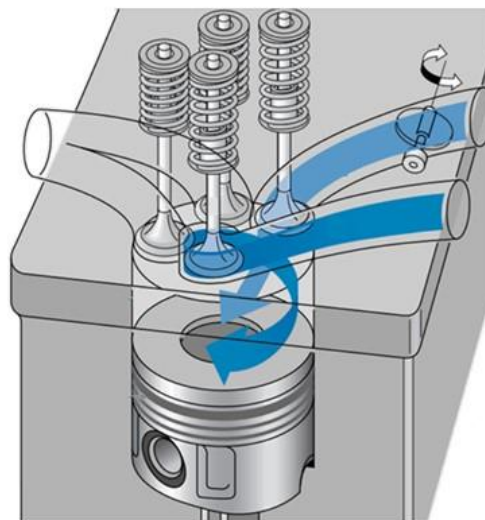


Figura 4- Borboletas presentes no coletor de admissão, adaptado de [11]

#### 2.2.5. Influência do Ponto de Início de Injeção de Combustível em Motores *Diesel*

Um aspeto muito importante em motores de ciclo *diesel* é o momento e a duração da injeção de combustível, uma vez que têm um efeito decisivo no início da combustão da mistura de ar-combustível, o que afetará conseqüentemente o nível de emissões, a quantidade de combustível utilizada e o ruído do funcionamento do motor. O controlo do momento e da duração da injeção varia em função da carga do motor, da sua velocidade de rotação e da respetiva temperatura, como é possível visualizar na Figura 5 [4] [11].

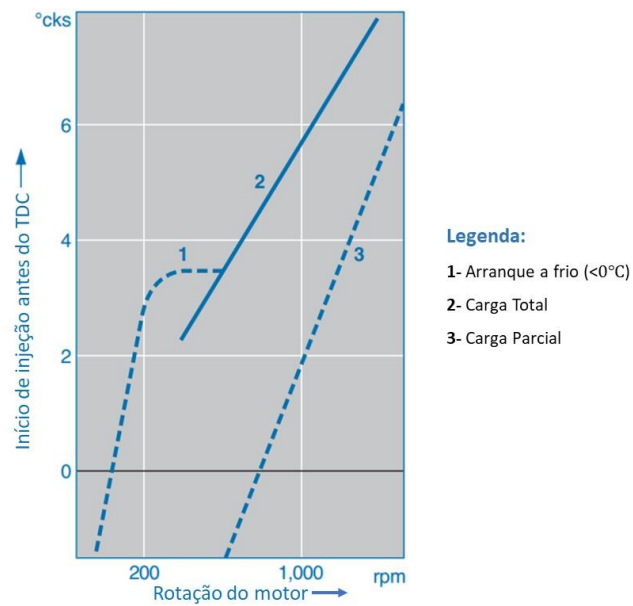


Figura 5- Influência do ponto de início de injeção de combustível, adaptado de [11]

Como já mencionado anteriormente, o avanço ou atraso da injeção de combustível é um ponto de extrema importância, tanto para o consumo e respectivos níveis de emissões, quanto para o correto funcionamento do motor. Normalmente, os pontos de combustão ótimos encontram-se entre 0 e 8° antes do PMS; no entanto, esses valores podem ser alterados em função da carga imposta ao motor, da sua rotação e também da temperatura de funcionamento.

Importante salientar que os avanços de injeção não devem ser excessivamente elevados, pois resultam num processo de combustão muito antecipado, gerando pressões muito elevadas muito antes do PMS, o que reduz consideravelmente a sua eficiência. Esse evento aumentará significativamente a temperatura da câmara de combustão, elevando consideravelmente a formação de  $NO_x$ . Por outro lado, permite a redução das emissões de  $HC$ . Caso haja um atraso na injeção de combustível, a combustão ocorrerá em condições de temperatura e pressão mais baixas, reduzindo a formação de  $NO_x$ , mas aumentando a concentração de  $HC$  não queimados, como é possível visualizar na Figura 6 . [11]

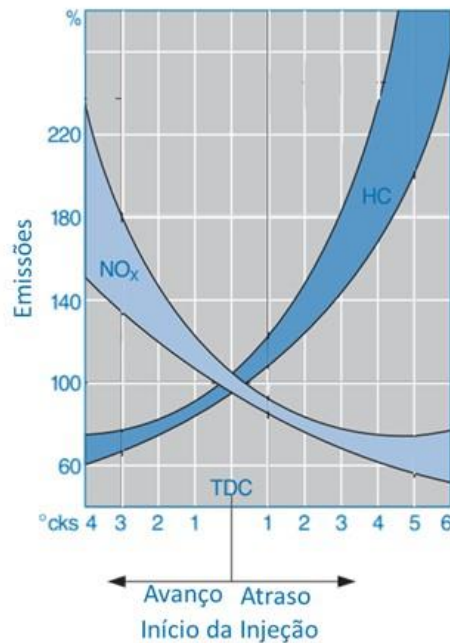


Figura 6- Influência do início de injeção nas emissões, adaptado de [11]

### 2.2.6. Pré Injeção de Combustível

Além de determinar o momento certo para o início da injeção no motor, é também importante verificar se esta deve ser feita de uma só vez, ou seja, com apenas uma injeção de combustível, ou se deve ser realizada de forma faseada. Ao efetuar-se uma pré-injeção de combustível na última fase da compressão, permite que a pressão e a temperatura na câmara de combustão aumentem gradualmente, obtendo assim um processo de queima mais completo, o que reduzirá o ruído do motor (Figura 7), especialmente com o auxílio do sistema de EGR. Após a pré-injeção e o início da combustão, é essencial realizar uma injeção principal que permita uma boa mistura com o objetivo de reduzir as emissões de  $NO_x$ . Um ponto a ter em consideração é que, para rotações mais elevadas, há menos tempo disponível para a formação de  $NO_x$  na câmara de combustão. Contudo, para regimes de rotação mais elevadas, o sistema de EGR não utiliza tantos gases provenientes do sistema de escape, portanto, não se pode afirmar que, para rotações mais elevadas, existe um menor nível de emissões. Também é importante destacar que, para regimes de rotação superiores, há a formação de uma mistura mais homogênea, permitindo uma queima mais eficiente e, assim, a redução da quantidade de fuligem [10].

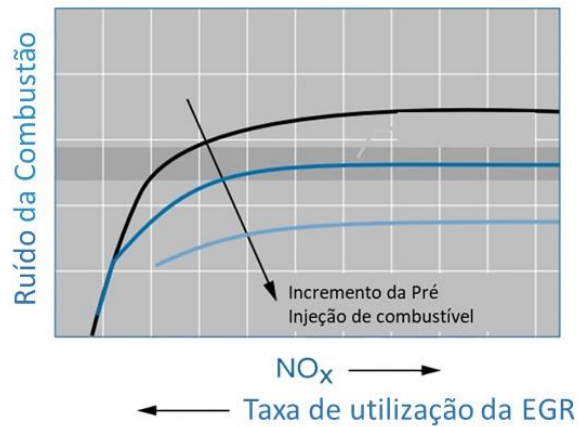


Figura 7- Influência da pré injeção de combustível no ruído gerado pelo motor, adaptado de [10]

### 2.2.7. Pressão de Injeção de Combustível

Um aspeto também bastante importante é a pressão a que o combustível é injetado. Com uma pressão mais elevada, é possível criar uma mistura mais homogénea, reduzindo o fumo libertado pelo escape, que pode ser mais significativo se for combinada com um avanço de injeção relativamente ao PMS, conforme representado na Figura 8 na representação (b). A diferença no consumo de combustível para diferentes pressões de injeção não é muito relevante, contudo, pode ser reduzido com o avanço da injeção, conforme representação (a) da Figura 8 [11].

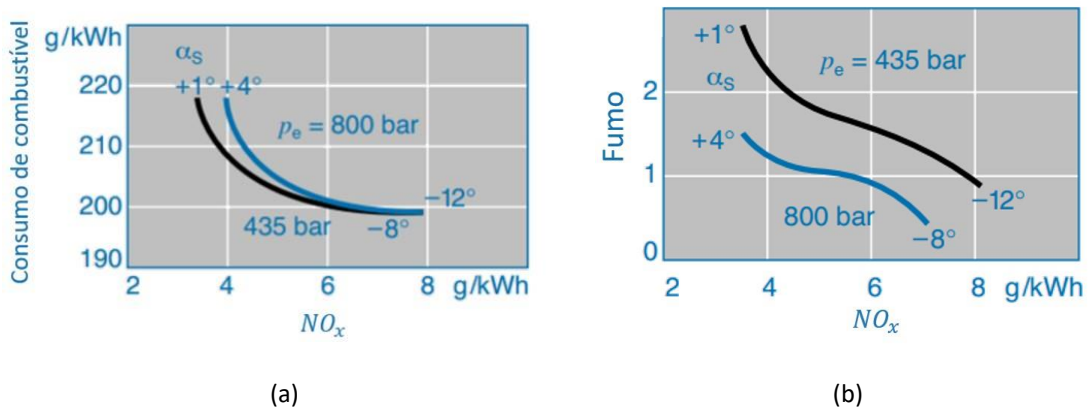


Figura 8- Influência da pressão de injeção de combustível combinada com o ponto de início de injeção, adaptado de [11]

### 2.3. Sistema de EGR

Apesar de todos os sistemas descritos anteriormente serem importantes no controlo das emissões, um dos primeiros a ser implementado foi o sistema de EGR, que tem como principal objetivo reutilizar gases provenientes do sistema de escape e reintroduzi-los novamente no motor. Esta reintrodução vai diminuir a concentração de  $O_2$  na câmara de combustão, reduzindo também a temperatura no cilindro e, conseqüentemente, a produção de  $NO_x$ , uma vez que estes originam-se a temperaturas superiores a  $1750^\circ C$  e a partir da concentração de  $O_2$  e  $N$  presentes na mistura. Na generalidade, este sistema permite reduzir as emissões entre 10 a 20% [4] [11] [15].

De seguida, de acordo com a Figura 9, é apresentado um esquema base com os componentes essenciais para o funcionamento do sistema da EGR.

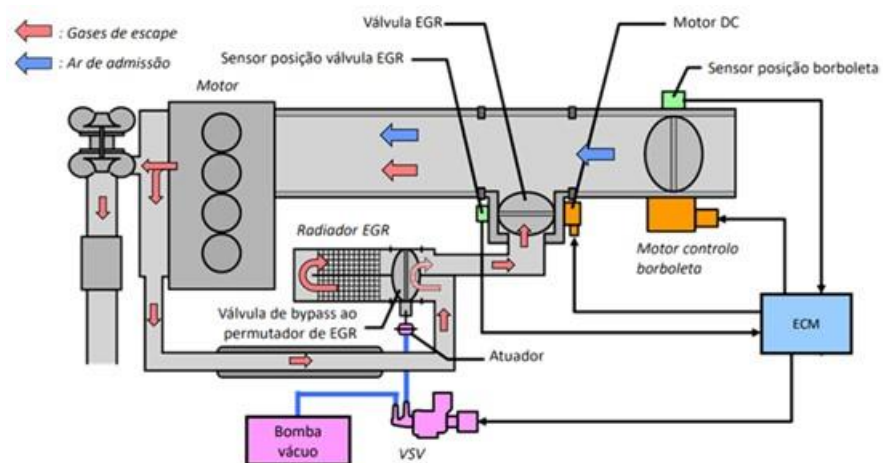


Figura 9- Sistema base de funcionamento da EGR, adaptado de [12]

O controlo do sistema EGR é realizado mediante a medição do fluxo de ar na conduta de admissão, através do respetivo sensor de massa de ar, que envia um sinal em volts para a unidade de controlo do motor, podendo também ser complementado pelos sensores de oxigénio incorporados no escape. Com base nesses dados e na posição do pedal do acelerador, a ECU realiza os cálculos necessários para determinar a quantidade de gases de escape a recircular. Para efetuar essa dosagem, é comum utilizar um mecanismo com um pistão que permanece aberto por mais tempo, de acordo com um sinal enviado pela ECU. Em carros mais antigos, este sinal de tensão, é função do *duty cycle* efetuado pela unidade de comando do motor, sendo aplicado a uma válvula solenoide (conforme representado na Figura 10), que, dependendo do sinal de tensão recebido, controla o vácuo aplicado ao mecanismo da EGR, proveniente do coletor de admissão ou de uma bomba de vácuo externa, influenciando diretamente no curso que a mesma realiza [10] [15] [16] [17].



Figura 10- Válvula solenoide de controle do mecanismo da EGR com recurso a vácuo

Para automóveis mais recentes, é utilizado um mecanismo elétrico, conforme apresentado na Figura 11, alimentado com uma tensão de 12 volts proveniente da bateria no terminal 1. O seu acionamento ocorre quando o solenoide recebe um sinal de massa no terminal 5, comandado pela ECU, de acordo com os cálculos realizados. Assim, este permanecerá acionado por mais tempo em função do sinal pulsado de massa recebido. Para que a unidade de comando do motor saiba exatamente em que posição a válvula EGR se encontra, é utilizado um potenciômetro. Esse potenciômetro apresenta uma resistência interna que varia em função da posição da válvula, gerando um sinal de tensão variável. Normalmente, este componente é alimentado com 5 volts, sendo aplicados ao terminal 2, e uma referência de 0 volts no terminal 4, resultando num sinal de tensão no terminal 3 em função da posição do sistema.

Importa salientar que em ambos os métodos descritos é utilizada na conduta de admissão uma borboleta controlada pela unidade de controle do motor. Isso ocorre com o objetivo de restringir a passagem de ar proveniente da atmosfera, resultando numa maior eficiência na reintrodução dos gases de escape no motor [12].

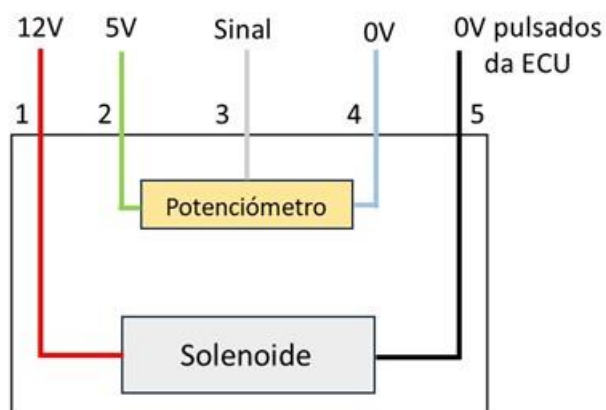


Figura 11- Mecanismo elétrico de controle do atuador da EGR

Como mencionado anteriormente, a utilização do sistema EGR permite a redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera. No entanto, apresenta uma contrapartida, uma vez que esses gases provenientes da combustão encontram-se a temperaturas muito elevadas. Ao serem misturados na conduta de admissão com o ar proveniente da atmosfera, aquecem-no consideravelmente, diminuindo o rendimento do motor e aumentando a temperatura da combustão, o que está diretamente relacionado com a formação de  $NO_x$ . Por isso, utiliza-se um permutador de calor. No entanto, em situações em que o motor está frio e sabendo que o motor apresenta maior eficiência de potência e menor quantidade de emissões para a sua temperatura normal de funcionamento ( $90^\circ\text{C}$ ), é essencial que este atinja esse valor o mais rapidamente possível. Portanto, a redução da temperatura dos gases de escape a serem reutilizados não é desejada. Nesse sentido, a solução adotada consiste em utilizar uma válvula que fecha a entrada do líquido de refrigeração do motor no permutador de calor, diminuindo o tempo de aquecimento do motor e, conseqüentemente, do sistema de escape. Com essa redução do tempo de aquecimento, o catalisador iniciará o seu processo de conversão das partículas mais cedo, uma vez que apresenta sua eficiência máxima por volta dos  $300^\circ\text{C}$ , conforme é possível observar na Figura 12 [10] [11] [17].

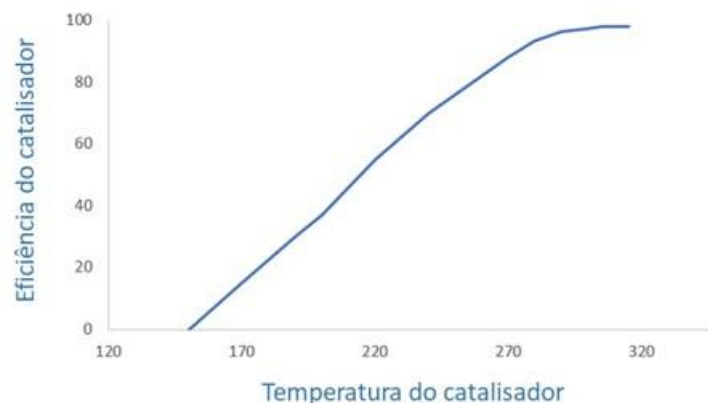


Figura 12- Eficiência do catalisador de oxidação

### 2.3.1. Tipos de Sistemas de EGR

Os sistemas de EGR têm sido alvo de um grande número de estudos ao longo dos anos e, por isso, têm sofrido diversas alterações, destacando-se dois tipos principais: os sistemas de EGR de alta pressão e os sistemas de EGR de baixa pressão.

Os sistemas de alta pressão foram os primeiros a ser desenvolvidos, nos quais os gases de escape são retirados imediatamente após o coletor e reintroduzidos no sistema de admissão após a borboleta, como se pode observar na Figura 13 [11].

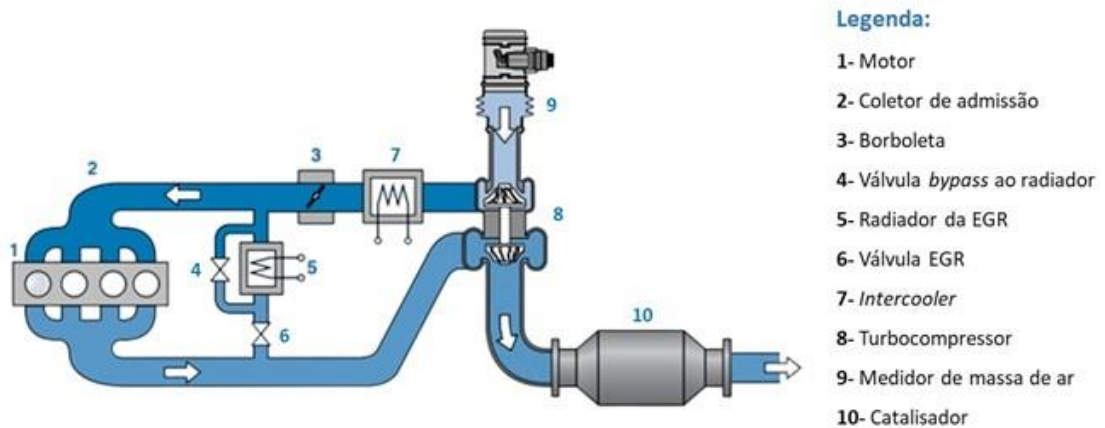


Figura 13- Sistema de EGR de alta pressão, adaptado de [11]

Com o aumento das restrições de emissões ao longo dos anos, foi desenvolvido o sistema de EGR de baixa pressão, com o intuito de complementar o sistema de alta pressão. Este sistema baseia-se na reutilização de gases já tratados nos sistemas de antipoluição, que se encontram a baixa pressão. Esses gases são direcionados para o compressor de sobrealimentação, ajustando-se à pressão de admissão desejada pela unidade de controlo do motor. Isso possibilita uma melhor mistura dos gases de escape com o ar fresco, resultando na redução das emissões. Para dosear a quantidade de gases de escape recirculados, é adicionada uma borboleta no sistema de escape. Quando é necessário aumentar a porção de gases recirculados, esta obstrui a passagem dos mesmos para a atmosfera, obrigando-os a passar novamente pelo ciclo de trabalho do motor. O sistema é apresentado na Figura 14 [11].

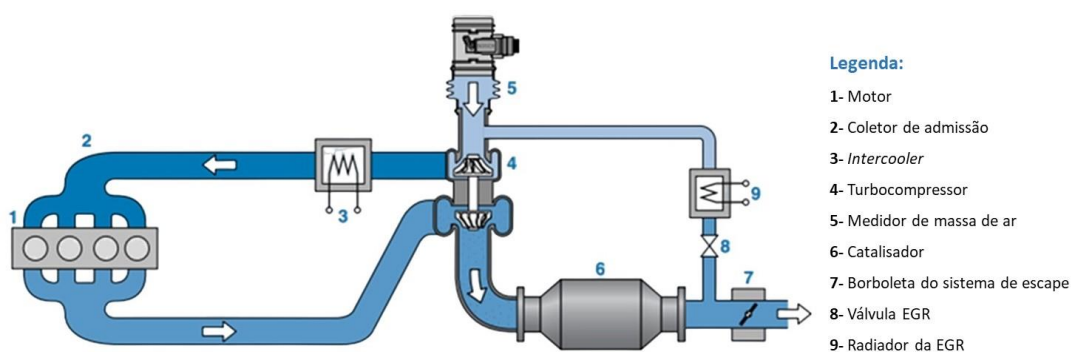


Figura 14- Sistema de EGR de baixa pressão, adaptado de [11]

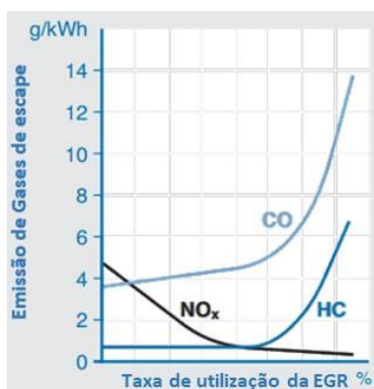
### 2.3.2. Influência da Taxa de EGR no Consumo e nas Emissões

A utilização deste sistema acarreta grandes vantagens e, por isso, os fabricantes de automóveis investem consideravelmente na sua aplicação em diferentes regimes do motor. Contudo, nem sempre a admissão de grandes quantidades de gases de escape é vantajosa, como é possível visualizar na Figura 15. Portanto, é essencial calibrar com precisão o sistema de EGR para obter a melhor relação entre emissões, consumo de combustível e, conseqüentemente, desempenho do motor.

Observando a representação (a) da Figura 15 e como já referido anteriormente, a utilização do sistema de EGR permite reduzir significativamente as emissões de  $NO_x$ . No entanto, para grandes taxas de recirculação de gases de escape, verifica-se um aumento substancial de  $HC$  e  $CO$ . O uso excessivo desse sistema aumenta a produção de fuligem, conforme a representação (b). Ao recircular os gases pelas condutas de admissão, a fuligem deposita-se em vários componentes, criando uma camada de partículas que aumenta ao longo do tempo de utilização, restringindo a passagem de ar para o motor e, conseqüentemente, afetando seu desempenho.

Para além das partículas depositadas no sistema de admissão, os gases não utilizados percorrem o sistema de escape, que se possuírem um sistema de retenção de partículas vai ficar obstruído mais rapidamente, reduzindo a vida útil do sistema.

Para manter um bom desempenho do veículo em estrada ao utilizar grandes quantidades de gases de escape, é necessário aumentar o consumo de combustível, conforme a representação (c), o que resultará, como indicado na representação (a), num aumento das emissões de  $HC$  e  $CO$  [10] [11].



(a)



(b)



(c)

Figura 15- Influência da utilização da EGR nas emissões (a) e (b) e no consumo de combustível (c), adaptado de [11]

## 2.4. Sistema de Filtro de Partículas

Apesar da EGR desempenhar um papel fundamental na redução de emissões para a atmosfera, não é um processo suficientemente eficiente para cumprir com os limites impostos, com o propósito de melhorar a qualidade do ar, proteger a saúde humana e preservar o meio ambiente. Por isso, as marcas de automóveis sentiram a necessidade de criar um sistema capaz de restringir ainda mais a emissão de gases poluentes, desenvolvendo uma tecnologia denominada filtro de partículas. Este sistema começou a ser implementado por algumas marcas a partir da norma Euro 4, mas afirmou-se com o desenvolvimento da legislação Euro 5, que visava o controlo de emissões de partículas finas, eliminando a exaustão de fuligem para a atmosfera. Atualmente algumas marcas já incorporam este dispositivo para motores em ciclo OTTO, designado de GPF.

O filtro é construído num material cerâmico em formato de ninho de abelha, com diversos canais de entrada dos gases de escape, que se encontram tapados nas extremidades do filtro. Este design obriga os gases a atravessarem as paredes do material cerâmico, permitindo a retenção das partículas finas. A Figura 16 apresenta o princípio de funcionamento descrito anteriormente. Importa também salientar que a adoção desta metodologia, permite reter

partículas com dimensões entre 10 nanômetros e 1 micrómetro, contribuindo para a redução da emissão de fuligem para a atmosfera em cerca de 95% [11] [18].

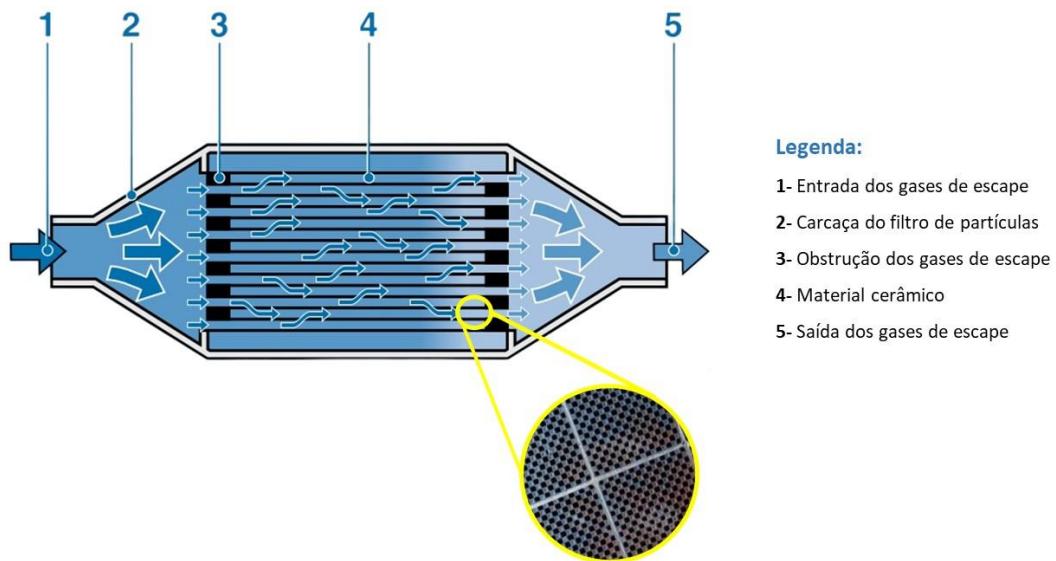


Figura 16- Representação de um filtro de partículas, adaptado de [11]

O acumulado de partículas ao longo do tempo, cria uma obstrução cada vez mais significativa na passagem dos gases de escape, gerando diferenças de pressão consideráveis entre a entrada e a saída dos gases. Essa disparidade de pressão resulta em atrasos na expulsão dos gases para a atmosfera, afetando o desempenho do motor, diminuindo a sua eficiência e o tempo de resposta de aceleração. Essa resposta de aceleração é mais perceptível em carros sobrealimentados, já que a compressão do ar depende do movimento giratório da turbina de gases de escape. Portanto, quando o filtro de partículas está obstruído, a passagem dos gases pelo turbocompressor torna-se significativamente mais lenta, impactando diretamente na pressão de ar solicitada pela unidade de controle do motor. A discrepância entre a pressão desejada e a pressão medida no coletor de admissão é interpretada pela unidade do controle do motor como um problema no veículo. Para preservar os componentes mecânicos, o veículo entra em modo de segurança, resultando na perda de parte da sua potência disponível [11] [18].

Para contornar este problema e aumentar a vida útil do filtro de partículas, tornou-se necessário implementar um método capaz de eliminar esta fuligem. Para isso, é realizado um processo de regeneração, que tem como principal objetivo queimar as partículas armazenadas no filtro e converter o  $C$  em  $CO_2$ , conforme a equação química (5). Para que este processo ocorra, são necessários pelo menos 10 minutos, dependendo das condições de operação do motor. Além disso, é necessário que o sistema de escape alcance uma temperatura em torno dos  $600^\circ C$ , o que, com a presença de  $O_2$  no escape, permitirá a inflamação dessas partículas. A obtenção da temperatura desejada no sistema de escape geralmente é alcançada através de pós-injeções de combustível, uma vez que, dessa forma, uma grande percentagem deste será

queimada no escape. Este processo de regeneração, dependendo do tipo de condução realizada pelo proprietário do veículo, ocorre, em média, a cada 500 quilômetros [18] [19].



Para facilitar o processo de regeneração, diversas marcas implementaram ao sistema a adição de cerina, que desempenha um papel crucial na eficiência e na manutenção do sistema de escape dos veículos. Este aditivo normalmente é composto por elementos cerâmicos ou por compostos de ferro e têm um papel fundamental na redução da temperatura de oxidação da fuligem de  $600^{\circ}C$  para temperaturas entre os  $450/500^{\circ}C$ , promovendo assim uma regeneração mais completa e eficiente, uma vez que em condições normais de circulação a temperatura de exaustão não atinge esse limiar, resultando na acumulação de partículas no filtro. O aditivo, que tem um reservatório próprio para o seu armazenamento, vai ser adicionado ao combustível sempre que se abastecer o veículo, salientando que este produto deixa depositados alguns resíduos no filtro de partículas, que juntamente com alguns sedimentos presentes no combustível e o tipo de óleo de lubrificação do motor, gradualmente vão obstruindo-o, aumentando a contrapressão dos gases de escape, interferindo diretamente na vida útil do mesmo. Para otimizar e contornar este acontecimento, a solução adotada tem passado por aumentar a secção dos furos do filtro, permitindo que este dure em média 120 mil quilômetros [11].

Neste sistema também é essencial ter um sensor de diferencial de pressão, com o intuito de monitorizar e gerir todo o desempenho do filtro de partículas. O funcionamento do sensor é baseado na medição da diferença de pressão antes e após o sistema de retenção, que vai variando, como descrito anteriormente, com o nível de obstrução causado pelo depositar das partículas [20]. Esta diferença de pressão que é medida em cada instante gera um sinal de tensão, que é enviado para a ECU, conforme a Figura 17. Para tornar o controlo mais restrito e rigoroso é implementado também um sensor de medição de fuligem, que mede a concentração das partículas no escape e simultaneamente com as medições obtidas pelo sensor diferencial de pressão, podem ditar o início de uma regeneração [11].

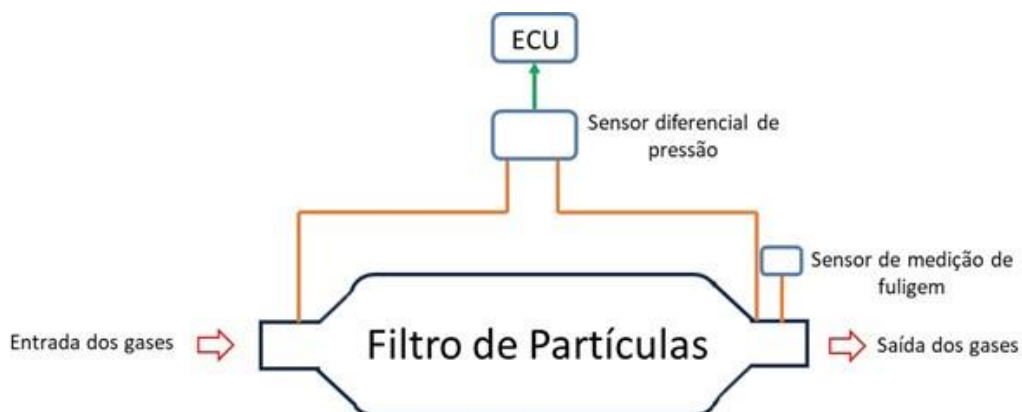


Figura 17- Sistema base de um filtro de partículas

## 2.5. Catalisador de Oxidação

Na mesma estrutura do filtro de partículas, normalmente é adicionado, a montante deste, um catalisador. Este tem como principal objetivo reduzir as emissões de gases de escape, promovendo a oxidação do  $CO$ ,  $HC$  e a redução do  $NO_x$ , em função dos materiais raros utilizados na sua composição, nomeadamente platina, irídio, ródio e paládio. Esta reação permite transformar esses compostos em  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $N_2$ , com eficiência máxima a temperaturas próximas dos  $300^\circ C$ , facilitando o processo das reações químicas pretendidas.

A eficiência do catalisador também é fortemente influenciada pela composição da mistura ar-combustível que percorre o sistema de escape. O ajuste adequado dessa mistura desempenha um papel fundamental na otimização e na eficácia do mesmo. A relação ar-combustível deve apresentar-se próxima da relação estequiométrica para motores a gasolina, uma vez que, em casos em que a mesma é mais rica, potencializa a produção de  $HC$  e  $CO$ , e em situações em que é mais pobre resulta no aparecimento de  $NO_x$ . Desta forma, em casos com excesso de combustível, o catalisador promove uma menor redução dos compostos  $HC$  e  $CO$ , mas, em contrapartida, tem um maior poder de desoxidação do  $NO_x$ . Em casos com excesso de ar, possibilita a redução de  $HC$  e  $CO$ , mas, por outro lado, diminui a oxidação de  $NO_x$ . Para motores a *diesel*, como trabalham com excesso de ar, são utilizados outros sistemas de antipoluição para reduzir a emissão de  $NO_x$  para a atmosfera. Para uma melhor compreensão, é apresentada a Figura 18 [4] [11] [21].

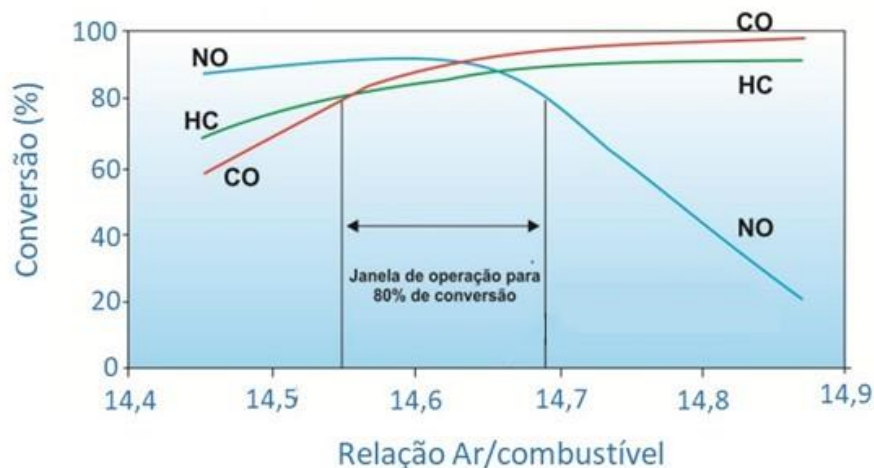


Figura 18- Eficiência do catalisador em função da mistura de combustível utilizada, adaptado de [21]

## 2.6. Sonda Lambda

Para atingir misturas muito próximas da estequiométrica com elevada precisão, é necessário ter componentes capazes de medir em tempo real o tipo de relação ar-combustível utilizada, permitindo aumentar o desempenho do motor e diminuir o seu consumo. Esses componentes denominam-se por sondas lambda ou sondas de oxigénio, presentes no sistema de escape antes e após o catalisador, medindo a quantidade de  $O_2$  nos gases de escape. Esta sonda é constituída por um eléctrodo, em que um lado está em contacto com os gases de escape e o outro com o ar externo, servindo como referência para determinar que tipo de mistura está a ser realizada [4]. A primeira sonda lambda, antes do catalisador, verifica a quantidade de  $O_2$  nos gases de escape, e a segunda verifica a eficiência do catalisador.

As sondas, ao longo das décadas, passaram por uma notável evolução para proporcionar um melhor desempenho do veículo. A seguir, são apresentadas as suas características principais e o seu modo de funcionamento.

As sondas lambda não aquecidas foram as primeiras a ser desenvolvidas, sendo pioneiras no controlo das emissões dos gases de escape. Para o seu correto funcionamento, requerem uma temperatura de trabalho mínima de  $350^\circ C$ , sendo essencial instalá-las muito próximas da saída do motor. O seu tempo de vida útil varia entre 50 e 80 mil quilómetros.

As sondas lambda de três fios surgiram posteriormente e têm a vantagem de poderem ser instaladas mais afastadas do motor, uma vez que apresentam um aquecedor capaz de manter a temperatura para o seu correto funcionamento. Este tipo de sonda permitiu prolongar o seu tempo de vida útil para um intervalo entre 100 e 160 mil quilómetros.

As sondas lambda aquecidas de quatro fios, para além de terem uma resistência para aquecerem a sua estrutura para temperaturas reduzidas, enviam o sinal para a unidade de controlo do motor através desse quarto fio. Desta forma, caso exista a rotura deste, a ECU não recebe a informação proveniente do escape, detetando instantaneamente que existe um problema no sistema. Normalmente o seu período de troca é feito a cada 160 mil quilómetros.

As sondas lambda planares possuem uma série de lâminas cerâmicas com um aquecedor integrado, tendo a grande vantagem de alcançar a sua temperatura de serviço duas vezes mais rápido do que as mencionadas anteriormente, permitindo diminuir consideravelmente as emissões na fase crítica de partida do motor a frio. O seu período de substituição está alinhado com o sistema de quatro fios.

As sondas planares de banda larga são aquelas que foram desenvolvidas mais recentemente e que são utilizadas até ao momento. Apresentam duas células de medição com elevada precisão, permitindo obter resultados mais rápidos e rigorosos. No que diz respeito ao seu tempo de vida útil, não houve grandes evoluções, sendo, por isso, semelhante aos dois tipos de sonda descritos anteriormente [22].

Para compreender o princípio, os componentes básicos e a forma como a sonda transmite os resultados à unidade de comando do motor, é apresentada a Figura 19.

Como mencionado, é crucial que a sonda possua um aquecedor para garantir o seu correto funcionamento, uma vez que os gases presentes no sistema de escape contêm  $H_2O$ , que, ao depositar-se na superfície do sensor, diminui a sua precisão e capacidade de leitura, resultando em medições incorretas que afetarão a gestão adequada do motor. Portanto, no seu interior, ela inclui uma resistência à qual é aplicada uma tensão de 12 volts entre o terminal 1 e 4 para efetuar o aquecimento. A medição do sinal é realizada através da queda de tensão no potenciômetro, dependendo do tipo de mistura utilizada. Esse sinal é enviado para a ECU, onde são efetuadas as correções necessárias na relação ar-combustível. Para gerar esse sinal, é aplicada uma tensão de referência no terminal 2, que é, então, enviado para a unidade de comando do motor através do terminal 3 [23].

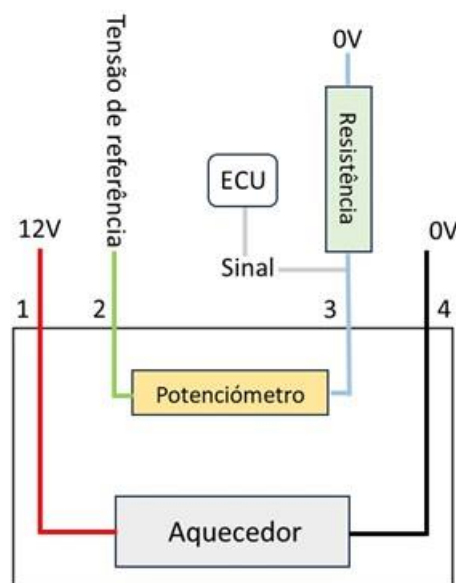


Figura 19- Representação base de uma sonda lambda

## 2.7. Conjunto do Catalisador e Filtro de Partículas

Como mencionado anteriormente, de uma maneira geral, o sistema de catalisador e o filtro de partículas estão instalados na mesma carcaça, proporcionando uma melhor sincronização entre os processos, uma eficiência térmica aprimorada devido à sua proximidade, maior otimização do espaço, simplificação do formato do sistema de escape e, ao mesmo tempo, facilitar o processo de manutenção, uma vez que, os técnicos podem trabalhar nos dois sistemas simultaneamente, precisando de desmontar apenas um componente, o que reduz o tempo e a complexidade do processo. A Figura 20 apresenta um esquema simplificado do conjunto catalisador e filtro de partículas.

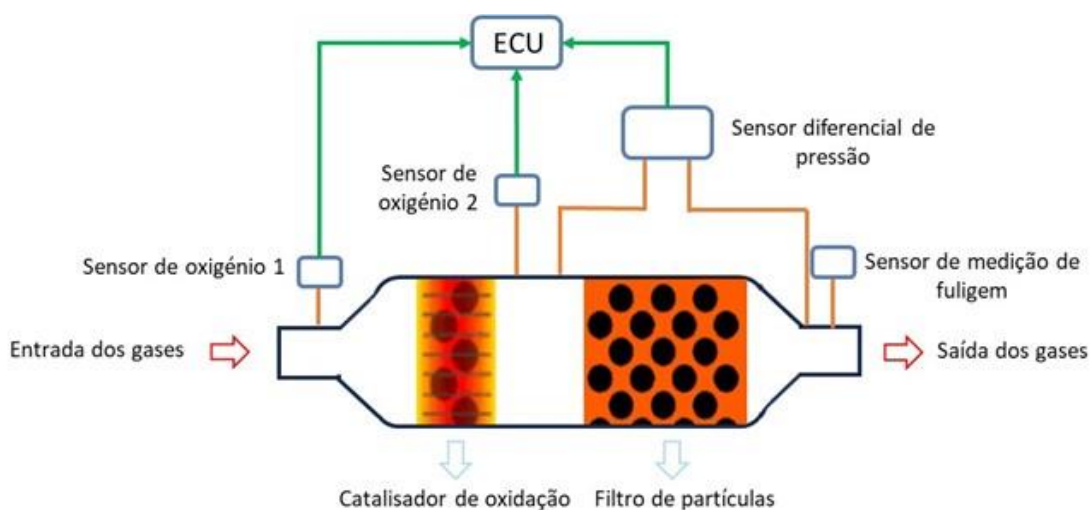


Figura 20- Conjunto de catalisador e filtro de partículas

## 2.8. Sistema de Redução Catalítica Seletiva

Apesar de se conseguir reduzir significativamente as emissões com os sistemas de EGR, catalisadores de oxidação e filtros de partículas, a redução de  $NO_x$  nunca foi alcançada com grande eficiência. Assim, com a implementação da norma Euro 6, imposta pela Comunidade Europeia, que restringiu em grande escala as emissões, especialmente de  $NO_x$ , foi necessário criar um sistema capaz de o fazer e que contribuísse para um meio ambiente mais saudável e sustentável.

O sistema desenvolvido foi um catalisador de redução catalítica seletiva que não interfere diretamente no correto funcionamento do motor e permite reduzir a emissão de  $NO_x$  com a introdução de um agente redutor no sistema de escape, que, ao contrário de outros elementos contidos nos gases de escape, tende preferencialmente a reagir com os  $NO_x$ . Um bom exemplo de um agente redutor eficaz é o amoníaco ( $NH_3$ ); contudo, como teria de ser utilizado em grande quantidade devido ao número de veículos em circulação, surgiriam problemas de segurança devido à toxicidade do composto. A solução encontrada foi a utilização de ureia ( $(NH_2)_2CO$ ), uma vez que é fácil de produzir, obtendo-se através da reação do  $NH_3$  com o  $CO_2$ , sendo biologicamente compatível com as águas subterrâneas e quimicamente estável para o meio ambiente.

Antes de ser utilizada no veículo, é misturada com  $H_2O$ , um processo realizado pela marca AdBlue® (marca registada pela Associação da Indústria Automóvel na Alemanha (VDA)). Inicialmente, a AdBlue® comercializava os seus produtos em reservatórios, e mais tarde, com o aumento do seu consumo, expandiu a sua disponibilidade para os postos de abastecimento de combustível. A sua composição é constituída por 32,5% de ureia e 67,5% de água desionizada, com o objetivo de diminuir o ponto de congelação da mistura para cerca de  $-11^\circ C$ , reduzindo a probabilidade desta congelar em países com temperaturas mínimas mais rigorosas. Para situações em que se excedam esses limites, o sistema incorpora um aquecedor do AdBlue para

garantir que o veículo continue a funcionar corretamente. A Figura 21 apresenta os diferentes pontos de congelação do AdBlue em função da concentração de ureia na mistura [11] [24] [25] [26] [27].

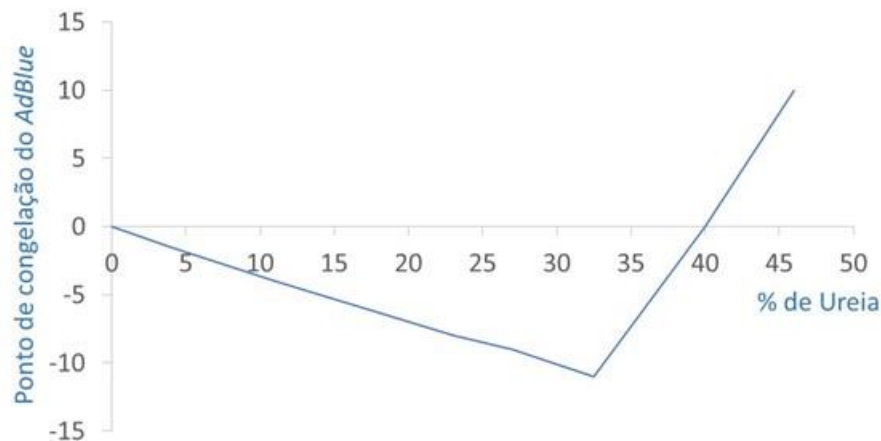


Figura 21- Influência da composição do Adblue no seu ponto de congelação [27]

### 2.8.1. Precauções no Processo de Enchimento do AdBlue

Para além de não ser prejudicial para o meio ambiente, o AdBlue apresenta uma série de características, nomeadamente ser transparente, não ter cheiro e não ser inflamável. Contudo, é extremamente corrosivo, sendo essencial ter uma série de cuidados:

- Em caso de contacto com os olhos, deve-se lavar imediatamente com  $H_2O$  em abundância por um período de 15 minutos, sendo aconselhado contactar um médico;
- Se o AdBlue entrar em contacto com a pele, deve-se igualmente lavar imediatamente com  $H_2O$  durante 15 minutos. Caso ocorra irritação da pele, recomenda-se contactar um médico;
- Em situações de ingestão de AdBlue, aconselha-se enxaguar a boca imediatamente com  $H_2O$  por 15 minutos, procurar ajuda médica imediatamente e não induzir o vómito, a menos que seja prescrito pelo médico;
- Se o AdBlue entrar em contacto com algumas peças do veículo, plásticos ou roupas durante o processo de enchimento, deve-se passar um pano húmido e utilizar muita  $H_2O$  limpa rapidamente;
- Se o AdBlue já estiver cristalizado, aconselha-se removê-lo com o auxílio de uma esponja e  $H_2O$  morna [28].

## 2.8.2. Processo de Transformação do $NO_x$

A redução de  $NO_x$  desempenha um papel crucial na mitigação dos impactos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Ao adotar tecnologias como o sistema de redução catalítica seletiva, que utiliza o AdBlue como reagente, consegue-se transformar o  $NO_x$  em substâncias inofensivas, como  $N$  e vapor de água. Por isso, de seguida, são apresentadas as etapas necessárias e as respetivas equações químicas para a transformação do  $NO_x$  [24] [28] [29] [30].

O primeiro passo consiste em injetar AdBlue no sistema de escape ( Figura 22), decompondo-o em  $NH_3$  e  $CO_2$  a temperaturas superiores a  $170^\circ C$  para uma maior eficiência. Este processo ocorre em duas fases. A primeira fase envolve a obtenção de  $NH_3$  e ácido isocianico ( $HNCO$ ) através de uma decomposição térmica (termólise), conforme a equação química (6).

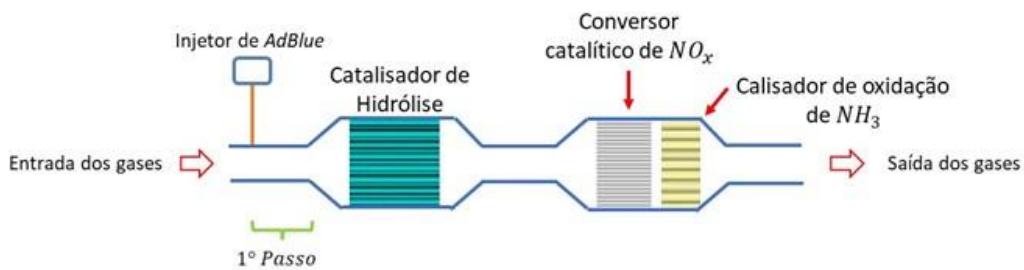


Figura 22- Injeção de AdBlue no sistema de escape



De seguida, o  $HNCO$  é convertido através da reação com  $H_2O$  no catalisador de hidrólise (Figura 23), formando  $NH_3$  e  $CO_2$ , conforme apresentado na equação química (7).

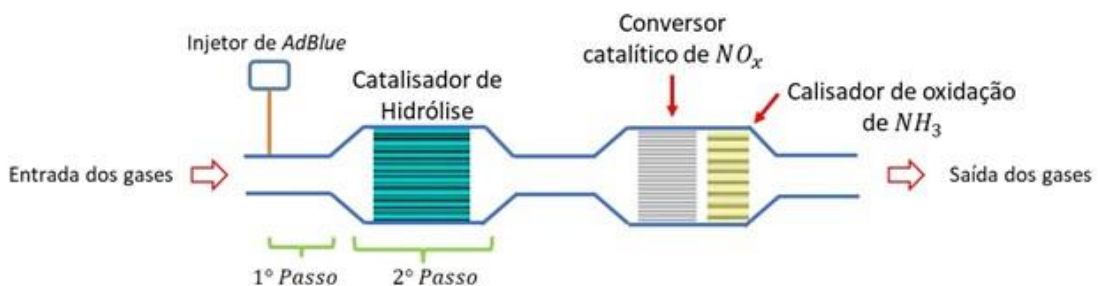
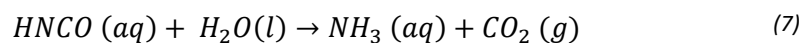


Figura 23- Reações químicas no catalisador de hidrólise



Realçar que, nos primeiros sistemas de redução catalítica, existia um catalisador de hidrólise a montante para que esta reação fosse possível, como apresenta a Figura 23. Com a evolução tecnológica, desenvolveu-se um sistema que integra num só elemento também a função de catalisador de hidrólise, permitindo reduzir o número de componentes, peso e peças sujeitas a desgaste.

A terceira fase do procedimento (Figura 24), consiste em reagir o  $NH_3$  obtida na reação anterior com os óxidos de nitrogénio ( $NO$  e  $NO_2$ ) a temperaturas compreendidas entre 250 e 450°C, para uma maior eficiência, originando os gases inofensivos pretendidos, nomeadamente  $N$  e vapor de água, de acordo com a equação química (8).

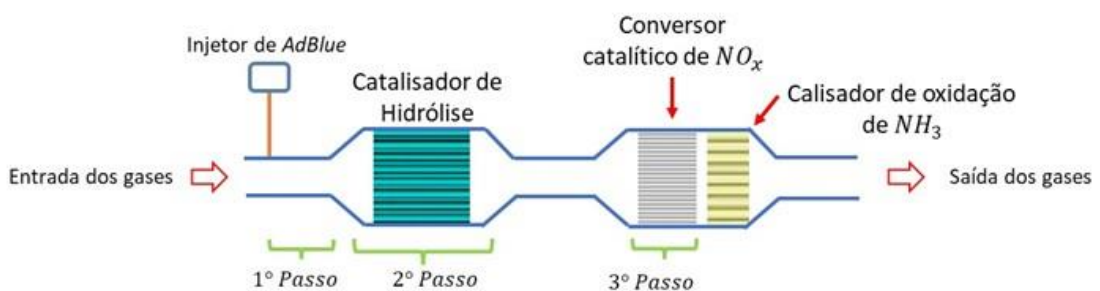
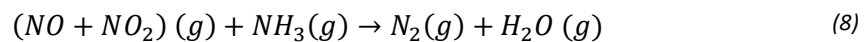


Figura 24- Conversão do  $NO_x$



Por fim, na quarta fase, é necessário eliminar o  $NH_3$  restante, uma vez que, como referido anteriormente, é um composto tóxico. Para isso, é utilizado um catalisador de oxidação do  $NH_3$  a jusante do catalisador de redução catalítica seletiva (Figura 25). Este, ao interagir com o  $O_2$ , permite obter produtos de reação não prejudiciais para o meio ambiente, conforme a equação química (9) [12].

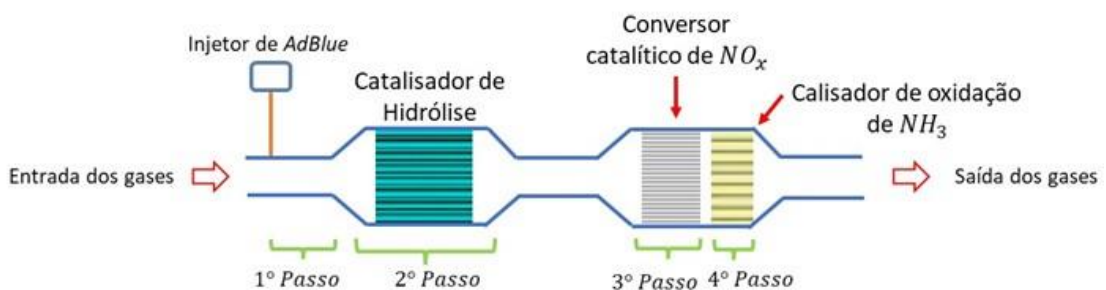
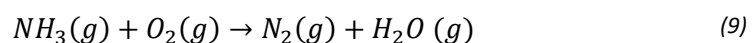


Figura 25- Oxidação da amónia restante



### 2.8.3. Sistema Base de Redução Catalítica Seletiva

O processo das reações de redução de  $NO_x$  com o auxílio do AdBlue é um método extremamente importante na pegada ecológica do planeta. Por isso, é relevante entender, para além das reações químicas realizadas no escape, como é feito o seu controlo em função dos tipos de componentes utilizados.

Para o funcionamento do sistema, é necessário que este apresente um reservatório próprio para abastecer de AdBlue, normalmente com uma capacidade entre 10 a 20 litros [28]. Deve-se garantir que o processo de enchimento é feito de forma adequada, tendo especial atenção para não forçar o seu enchimento quando este já se encontra atestado, pois isso pode provocar um derrame, danificando o reservatório e todos os componentes em que este reagente entrar em contacto. Como referido anteriormente, este congela sensivelmente a  $-11^{\circ}C$  para uma mistura de 32,5% de ureia e 67,5% de água desionizada, pois é a partir dessas concentrações que se obtém o ponto de congelação mais baixo, sendo ideal para países com temperaturas relativamente baixas [30]. Para locais em que as temperaturas possam ultrapassar esse limite, existe um conjunto de resistências no interior do reservatório para que ocorra a fusão do AdBlue, permitindo o correto funcionamento do veículo, uma vez que este sistema é utilizado em toda a faixa de utilização do mesmo. Um aspeto importante a referir é que não se deve deixá-lo acabar na totalidade, pois quando isso acontece, o sistema impede que o veículo continue em circulação, obedecendo à lei que proíbe que o motor seja colocado em funcionamento nessa situação. Para efetuar esse controlo, são utilizados sensores de nível e de temperatura na própria estrutura do reservatório, podendo ser complementados com um sensor de qualidade do reagente.

Após estar armazenado, e para que seja possível utilizá-lo no sistema, é necessária uma bomba capaz de o pressurizar até 3,5 bar. A pressão depende das emissões de  $NO_x$  que ocorrem a cada instante e da quantidade de combustível injetado no motor, sendo normalmente utilizada uma relação de 5% de AdBlue em relação à quantidade total de combustível consumido. Para controlar a pressão e a quantidade de reagente a injetar, este sistema apresenta uma unidade de controlo própria que recebe informações dos sensores de  $NO_x$  e  $NH_3$  e simultaneamente comunica por linhas multiplexadas CAN (*Controller Area Network*) com a ECU, para receber a indicação da quantidade de combustível utilizado. Importante destacar que esta unidade, ao receber a informação de que não existe AdBlue no seu reservatório, interpreta o sinal e envia uma mensagem para a ECU, impedindo que o mesmo seja colocado em marcha.

De seguida, através do injetor presente no escape, o reagente é pulverizado para que ocorram as reações químicas pretendidas. A medição de  $NO_x$  antes e após o sistema permite verificar se este apresenta uma boa eficiência. Essa eficiência é complementada com a utilização do sensor de  $NH_3$ , de modo a controlar a emissão de amoníaco para a atmosfera. O controlo da temperatura do sistema de escape é importante para efetuar algumas correções na quantidade de injeção de AdBlue, salientando que a disposição do sistema de escape pode ser feita com diversas configurações [11] [23].

Na Figura 26, é apresentado o esquema base de funcionamento do sistema de AdBlue, realçando que o mesmo pode ter diversas configurações em função do seu fabricante.

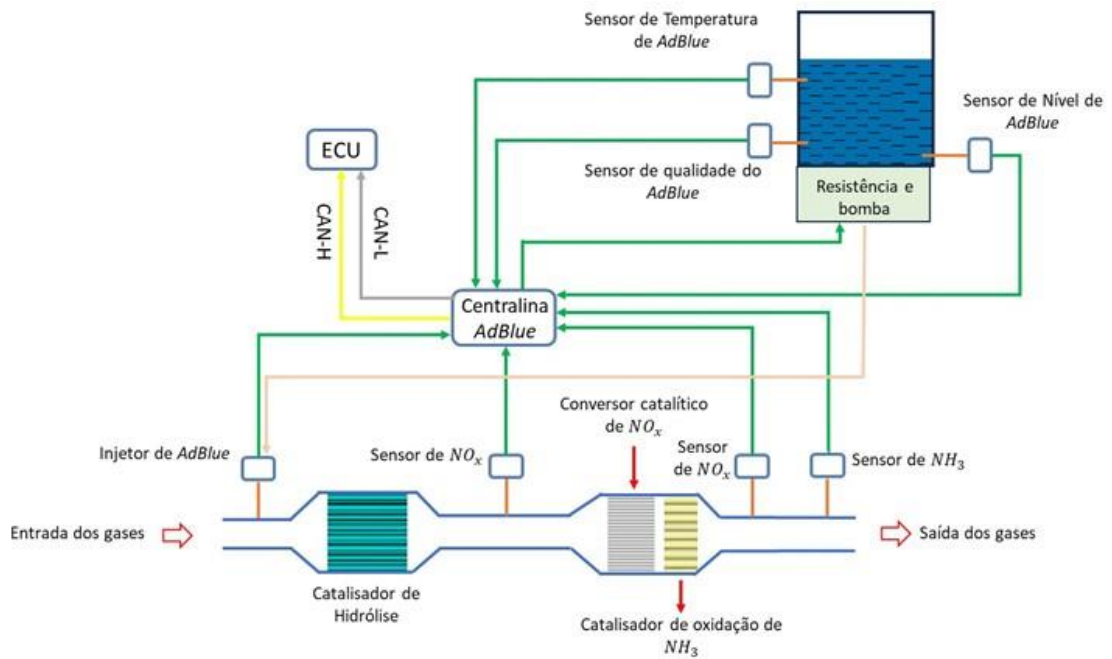


Figura 26- Sistema base de redução catalítica seletiva

### **3. Gestão da EGR Segundo o Fabricante e as Características Principais da ECU**

Neste capítulo, será apresentada a gestão da EGR implementada pelo fabricante no veículo em estudo, bem como os componentes e características principais da ECU. Além disso, serão demonstradas as diferentes formas de aceder à sua calibração.

#### **3.1. Unidade de Controlo do Motor**

Para dar início à aplicação prática do tema em estudo, é fundamental começar por identificar o tipo de unidade utilizada para o controlo do sistema do motor do SEAT® Ibiza 1.4 TDI. Neste veículo, essa unidade encontra-se localizada no compartimento do motor, conforme ilustrado na Figura 27.



*Figura 27 - Localização da Unidade de Controlo do Motor*

Após a remoção da ECU do veículo, é possível verificar que esta contém uma etiqueta com diversas informações, das quais as mais relevantes estão destacadas na Figura 28.

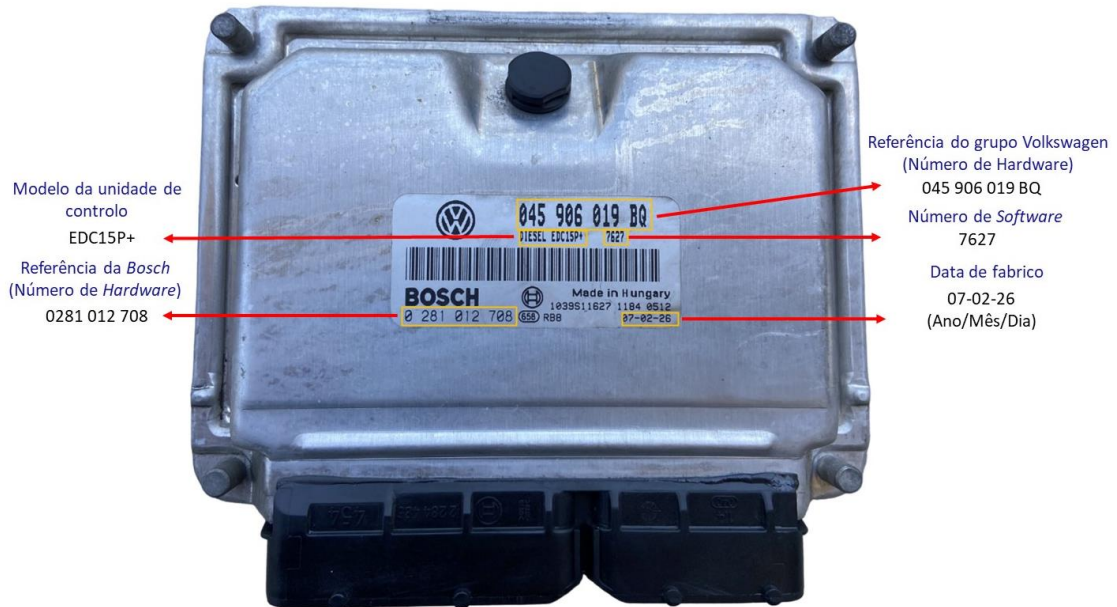


Figura 28 - Características Principais da Unidade de Controlo do Motor

## 3.2. Modos de Leitura e Escrita da Unidade de Controlo do Motor

O passo seguinte consiste em extrair a informação armazenada na ECU, o que pode ser feito de três formas distintas: através da ficha *On-Board Diagnostics* (OBD), *Bench* ou *Boot*. O método OBD realiza a leitura da unidade de controlo por meio da ficha de diagnóstico do veículo, sendo este o mais suscetível a perdas de informação. Por isso, os métodos *Bench* e *Boot* são os mais recomendados e seguros para efetuar a leitura e escrita completa da calibração.

### 3.2.1. Modo *Bench*

Para proceder à leitura da informação armazenada na ECU, é imprescindível utilizar uma fonte de alimentação, conforme ilustrado na Figura 29, que forneça uma tensão constante entre 12,6 e 14,7 volts, simulando a bateria do veículo em condições normais de funcionamento.

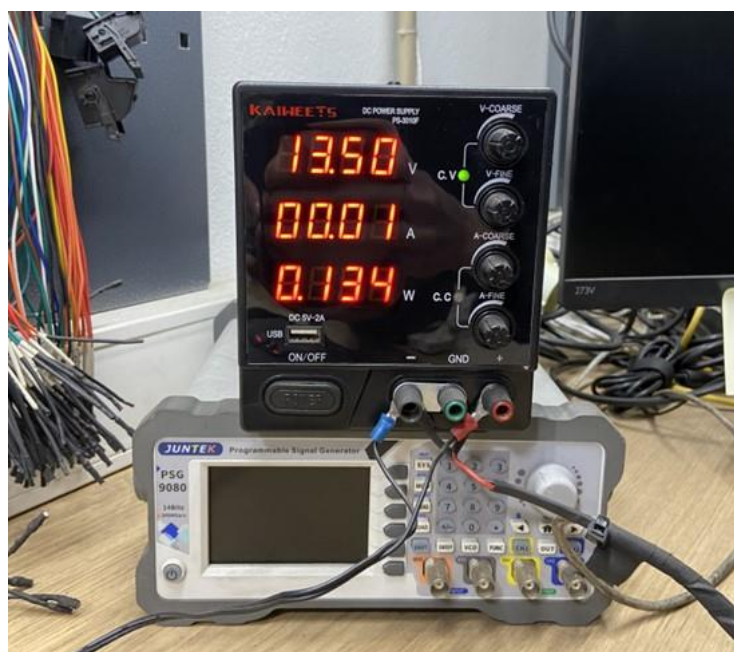
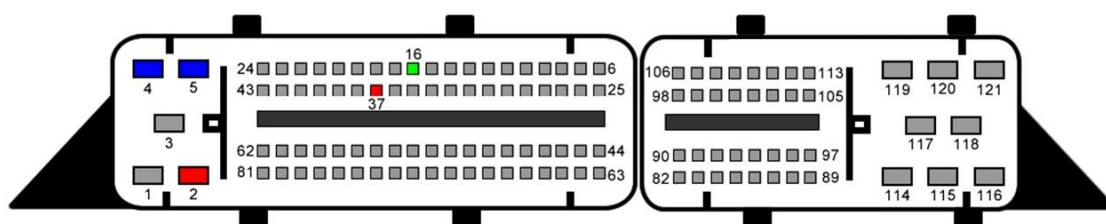


Figura 29 - Fonte de Alimentação

Dessa forma, é fundamental consultar o esquema elétrico fornecido pelo fabricante do veículo para identificar os pinos necessários ao correto funcionamento da ECU. Este procedimento inclui a verificação da alimentação (12V) nos terminais 2 e 37, assim como a ligação à massa (0V) nos terminais 4 e 5. No entanto, para realizar a leitura e escrita na unidade de controlo do motor, é imprescindível estabelecer uma ligação adicional ao terminal 16. Esta ligação, conhecida como *K-line*, permite a comunicação eficaz com a unidade de controlo do motor. O esquema básico de ligações está apresentado na Figura 30.

## VAG BOSCH EDC15P+



Tipo de ligação	Terminal
Positivo +12 V	2,37
Massa 0 V	4,5
Comunicação <i>K-line</i>	16

Figura 30 - Esquema de ligações para leitura e escrita da unidade de controlo do motor

O laboratório da CHECKSUM dispõe de um cabo específico com o conector adequado para este tipo de unidades de controlo, conforme ilustrado na Figura 31. Este cabo já inclui as ligações mencionadas anteriormente, facilitando e tornando o processo mais seguro, ao evitar erros que possam danificar a unidade de controlo. Além disso, esta solução agiliza o procedimento, tornando-o mais eficiente e economicamente vantajoso.



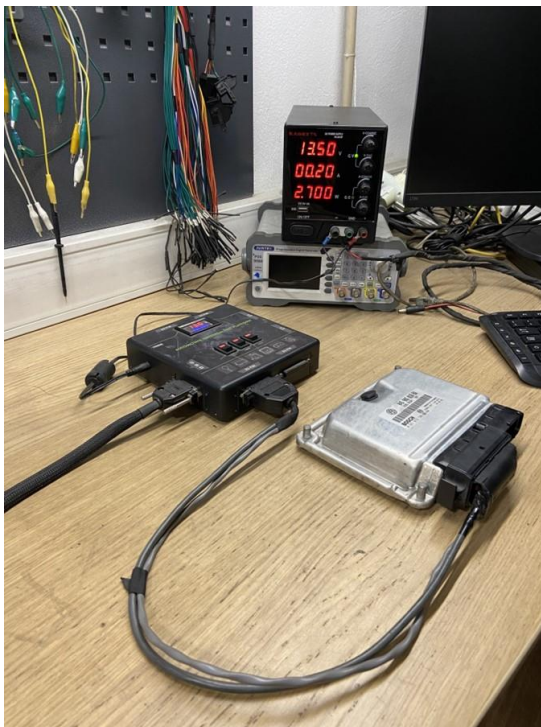
Figura 31 - Cabo específico para unidades de controlo do motor EDC15P+

Em seguida, o cabo apresentado na Figura 31 é conectado a uma plataforma de testes, conforme ilustrado na Figura 32. Esta plataforma possibilita a ativação da ECU, permitindo que várias funções sejam realizadas, incluindo a execução de testes e a leitura e escrita de dados.



Figura 32 - Plataforma de testes

Deste modo, conecta-se a fonte de alimentação representada na Figura 29 e o cabo indicado na Figura 31, juntamente com a unidade de controlo do motor, à plataforma de testes, procedendo-se ao controlo do consumo de corrente para garantir o funcionamento adequado da ECU, conforme ilustrado na Figura 33. No caso em estudo, o consumo de corrente foi de 0,20 Amperes, um valor que se encontra dentro dos parâmetros normais de funcionamento.



*Figura 33 - Ligação da unidade de controlo do motor à plataforma de testes e respetiva verificação do consumo de corrente*

Posteriormente, utiliza-se o equipamento de diagnóstico e programação *Magic Power Pro Service* (MPPS), conforme apresentado na Figura 34. Este equipamento permite a leitura de toda a informação da unidade de controlo do motor e, se necessário, a escrita de uma calibração diferente da originalmente presente na unidade.



Figura 34 - Equipamento de diagnóstico e de reprogramação de unidades de controlo do motor

Seguidamente, o MPPS é conectado ao computador via USB, conforme ilustrado na Figura 35.



Figura 35 - Apresentação do esquema base para a leitura da informação da unidade de controlo do motor

No programa MPPS exibido no computador, selecionam-se a marca, o modelo e o respetivo tipo de unidade de controlo que se pretende ler ou escrever, conforme ilustrado na Figura 36.

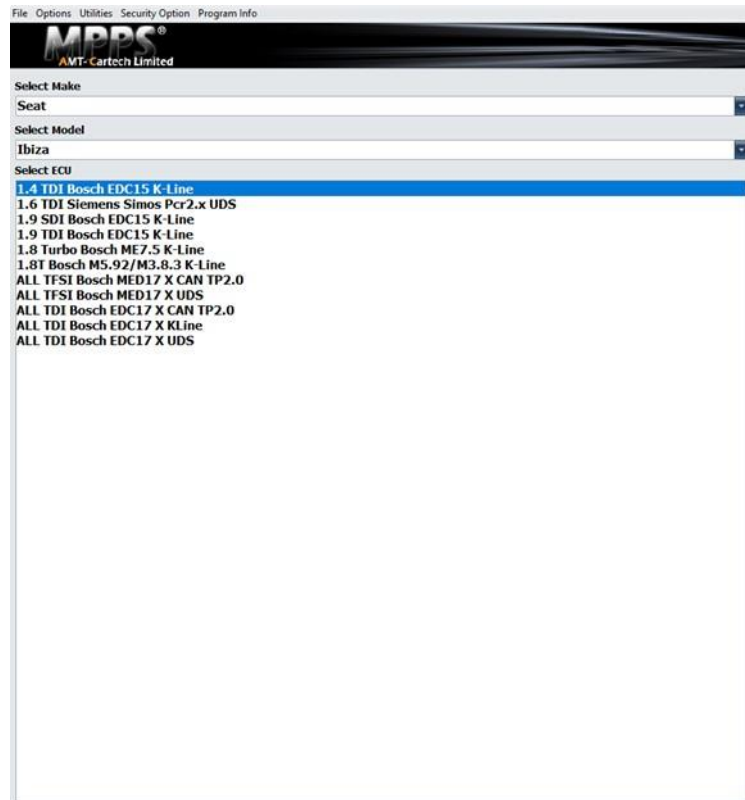


Figura 36 – Procedimento para identificação da unidade de controlo do motor no equipamento do MPPS

Após a identificação da unidade, podem ser verificadas, na Figura 37, as principais características da calibração da ECU, destacando que os números de *hardware* e *software* correspondem aos apresentados na Figura 28, confirmando que todo o processo foi realizado corretamente. É importante salientar que, dentro do número de *software*, existe uma versão de *software* específica, neste caso a 66, resultante das atualizações contínuas realizadas pela marca.



Figura 37 - Características apresentadas no MPPS após a identificação da unidade de controlo do motor

Por fim, procede-se à leitura da informação armazenada na ECU. Deve-se destacar que existem dois tipos de dados a serem extraídos: a informação de calibração do motor, armazenada na FLASH, e os dados do imobilizador, armazenados na EEPROM. Para extrair os dados da EEPROM, o processo é ligeiramente diferente. Em vez de selecionar a marca e o modelo do veículo, deve-se escolher o modo genérico e, em seguida, selecionar a EEPROM, pois é essa a informação desejada, conforme ilustrado na Figura 38.

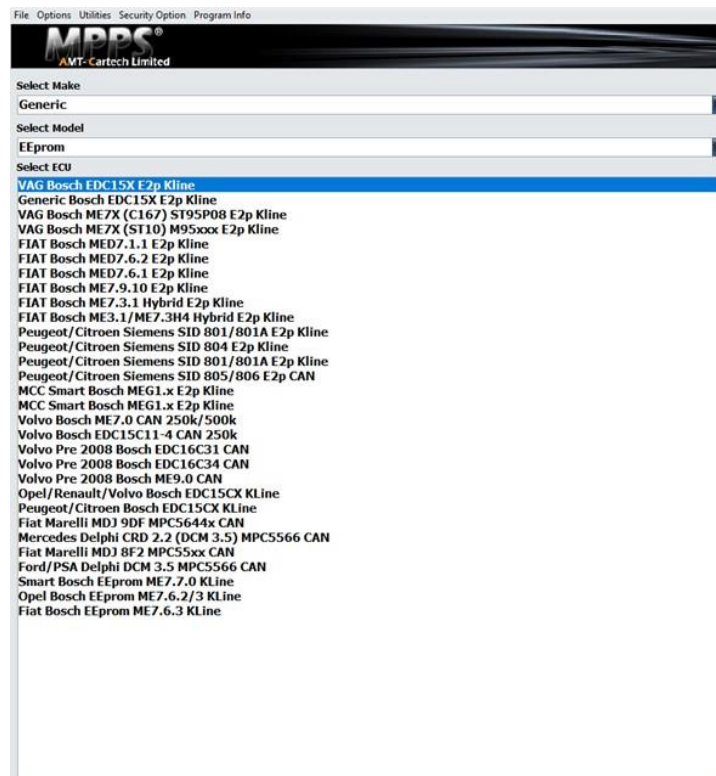


Figura 38 - Leitura dos dados do imobilizador contidos na EEPROM

### 3.2.2. Modo Boot

Outra abordagem relevante para a leitura e escrita das unidades de controlo do motor é o denominado modo *boot*. Neste método, a unidade é colocada num estado especial ao conectar um pino específico, conhecido como "pino de *boot*", no interior da mesma, à massa. Esta ação ativa um modo de inicialização ou programação, que permite o acesso à ECU para diagnóstico ou reprogramação de forma mais segura e eficaz. Este método é particularmente útil em unidades de controlo que não oferecem protocolos de leitura e escrita através dos modos *bench* ou OBD, permitindo contornar as proteções do processador de unidades que as possuem, ou em situações onde a ECU está bloqueada devido a um procedimento de escrita incorreto nos modos OBD ou *bench*. Deve-se também salientar que, em muitos casos, a informação obtida através do OBD pode ser diferente e menos abrangente do que a obtida pelos outros dois métodos. Portanto, é crucial ter especial atenção à informação que se tenta escrever na unidade de controlo, uma vez que um erro pode resultar no bloqueio da mesma. Para realizar

a operação no modo *boot*, é necessário manter as ligações realizadas no modo *bench*, adicionando a conexão do pino de *boot* à massa. Por isso, é importante saber a localização deste pino na parte interior da placa da unidade de controlo do motor, apresentando-se primeiramente na Figura 39 os seus componentes principais.

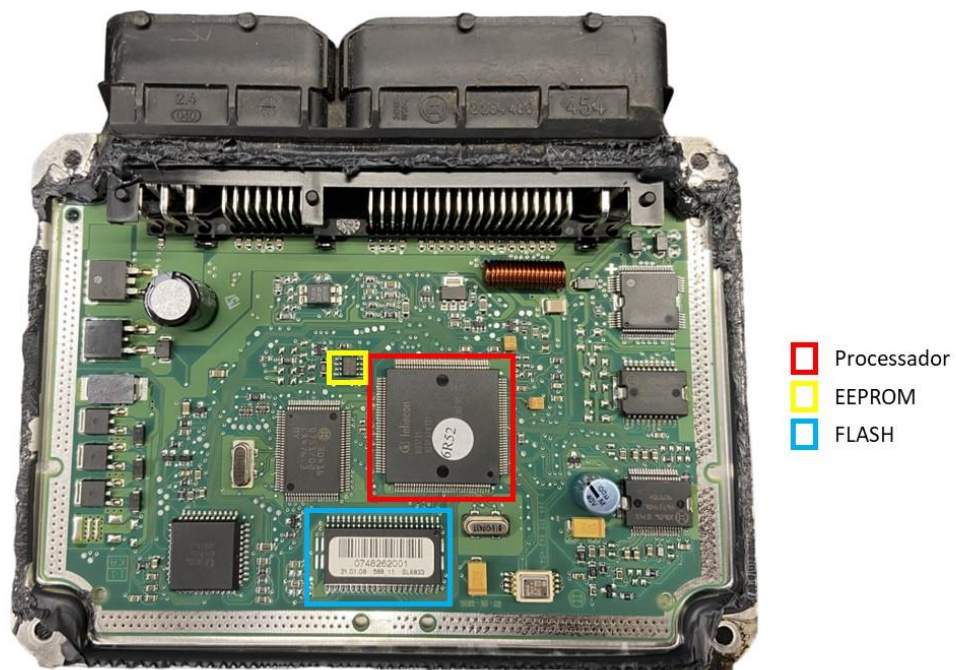


Figura 39 - Componentes principais da unidade de controlo do motor

O processador tem como principal função processar toda a informação contida na calibração e nos dados recolhidos a partir dos sensores, e com base nesta informação, efetuar o controlo do motor. Além de gerir o motor, o processador pode também auxiliar no controlo de outros sistemas do veículo, como a transmissão, a segurança e o controlo das emissões. O ponto de referência para realizar o processo de soldadura na posição correta é o ponto circundado a azul, conforme ilustrado na Figura 40.



Figura 40 - Processador

Na EEPROM 24C04, apresentada na Figura 41, encontra-se uma vasta quantidade de informações cruciais. Este componente desempenha um papel fundamental no armazenamento dos códigos de avaria, que são registados sempre que ocorre algum problema no veículo. Através da máquina de diagnóstico, é possível visualizar esses códigos, facilitando o processo de reparação do automóvel. Quando for necessário remover a EEPROM da placa para proceder à leitura, é essencial garantir que o componente seja reinstalado na sua posição correta, uma vez que, a colocação incorreta pode impedir o funcionamento do veículo. Para assegurar a correta reinstalação, deve observar-se o lado com o declive menos acentuado numa das laterais do componente.

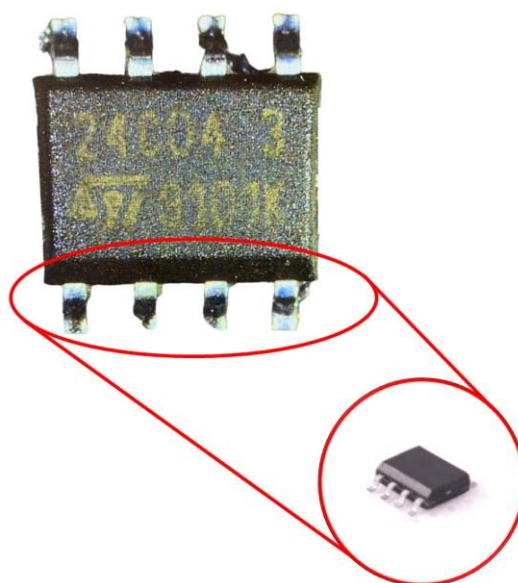
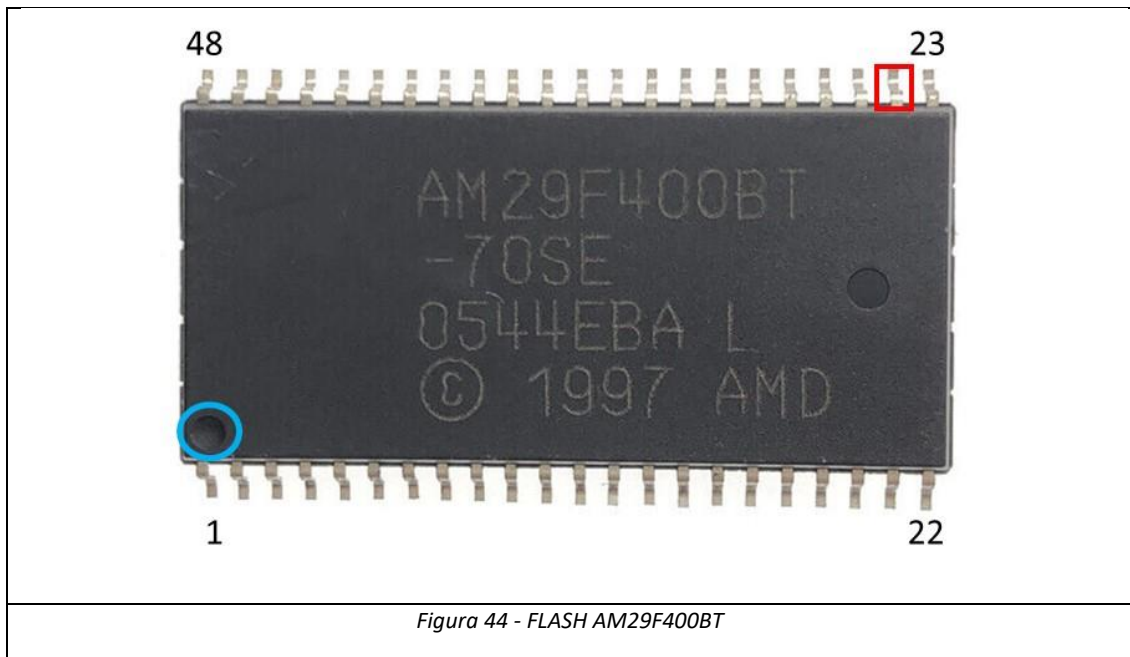


Figura 41 - EEPROM 24C04



Na FLASH AM29F400BT, encontra-se toda a informação relativa à calibração e ao funcionamento do motor, sendo com base nesta que serão realizadas as alterações necessárias para o estudo.

De acordo com o fabricante, o pino de *boot* está localizado no terminal 24 da FLASH, conforme indicado na Figura 44. É importante destacar que o primeiro terminal da FLASH é identificado por uma pequena marca circular de referência, posicionada junto ao pino inicial. Para facilitar a visualização, esta marca é destacada por uma circunferência azul na Figura 44.



De seguida, realiza-se o procedimento para entrar no modo *boot*. É importante notar que a ligação ao terminal de *boot* deve ser efetuada antes de ligar a alimentação da unidade de controlo e removida imediatamente após a alimentação da ECU, pois é desta forma que se consegue aceder a este modo de leitura. Considerando que todo o contorno exterior da unidade de controlo serve como ponto comum de massa, foi a partir deste que se realizou a etapa, conforme ilustrado na Figura 45.

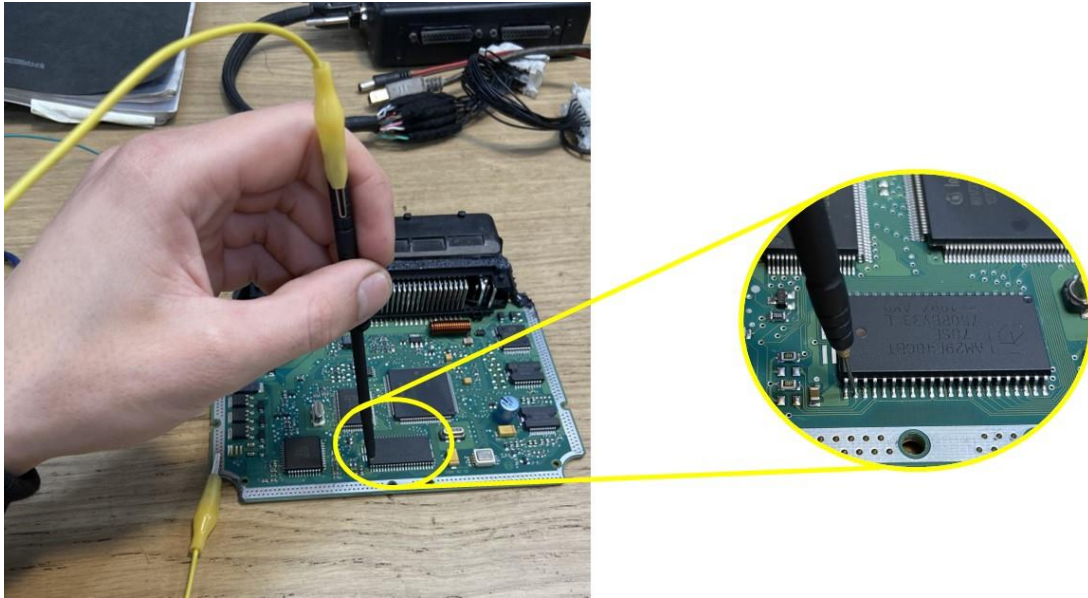


Figura 45 - Pino de boot

A seguir, procede-se à leitura da informação de calibração da unidade de controlo do motor. Neste modo de leitura, não é necessário seleccionar o veículo; em vez disso, entra-se no modo genérico e, posteriormente, selecciona-se o tipo de ECU em estudo, conforme mostrado na Figura 46. Salienta-se também que o programa emite um aviso para realizar o procedimento descrito na Figura 45.

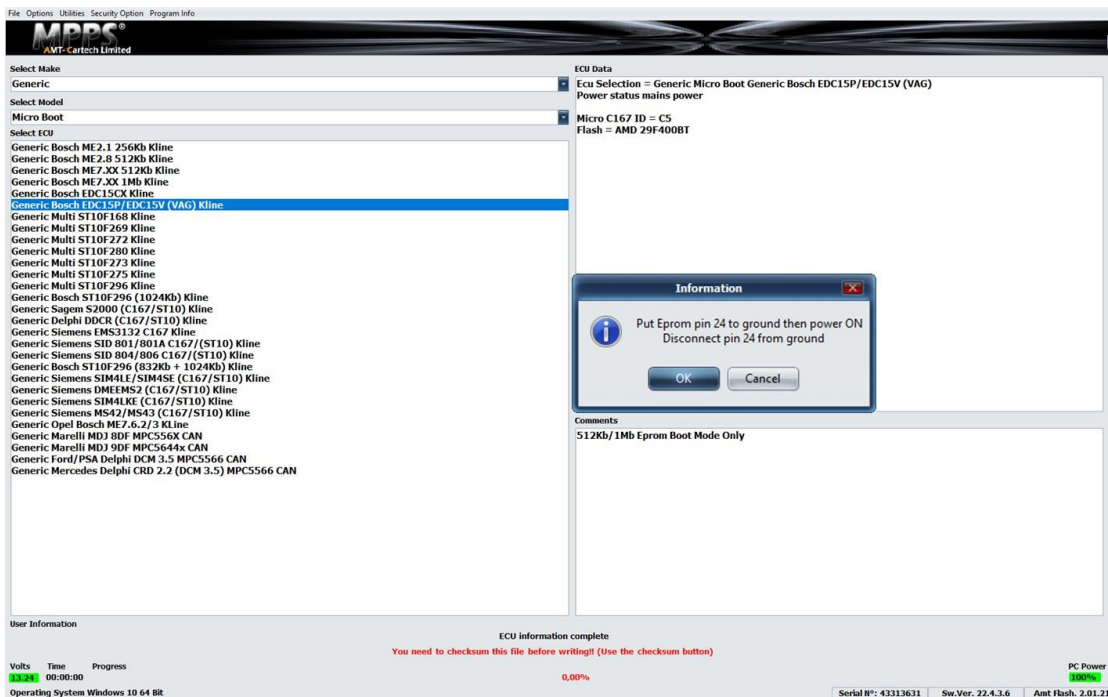


Figura 46 - Leitura de calibração da unidade de controlo em modo boot

### 3.3. Controlo do Sistema da EGR Segundo o Fabricante

O controlo do sistema de EGR, apesar de ter um princípio de funcionamento claro, é mais complexo de gerir e monitorizar. De modo geral, a gestão deste sistema é realizada em cinco etapas distintas: medição do valor real de massa de ar; cálculo do valor de referência da massa de ar; controlo paralelo; regulador; monitorização do sistema com eventual desativação (fecho da válvula de recirculação). A Figura 47 apresenta um resumo de como é efetuado o seu controlo, que será posteriormente abordado e explicado com maior detalhe para se compreender cada etapa do processo. Todos os diagramas incluídos neste subcapítulo foram elaborados/adaptados pelo autor deste trabalho, com base na informação disponibilizada no documento [31], e ajustados para o tipo de ECU em estudo.

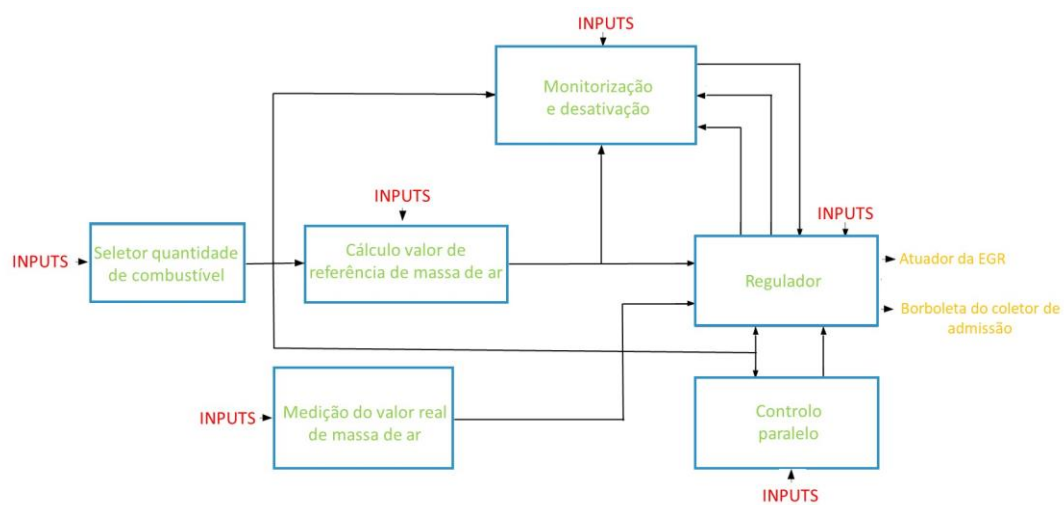


Figura 47 - Esquema base de controlo do sistema de EGR

#### 3.3.1. Seletor de Quantidade de Combustível

O primeiro passo no funcionamento do sistema de EGR consiste em determinar a quantidade de combustível a ser utilizada como referência. Para isso, existem três opções distintas de quantidades de combustível que podem ser selecionadas como ponto de partida:

- quantidade de injeção atual;
- quantidade de injeção desejada ao *ralenti*;
- quantidade de injeção desejada combinada com a quantidade de injeção ao *ralenti*.

O fabricante do veículo define, através de um seletor na calibração, a opção que considera mais adequada para o correto funcionamento do sistema e do veículo. No caso de combustíveis com biodiesel na sua composição, o veículo, ao detetar a sua presença, ajusta o valor da quantidade de combustível definido pelo seletor, conforme ilustrado na Figura 48.

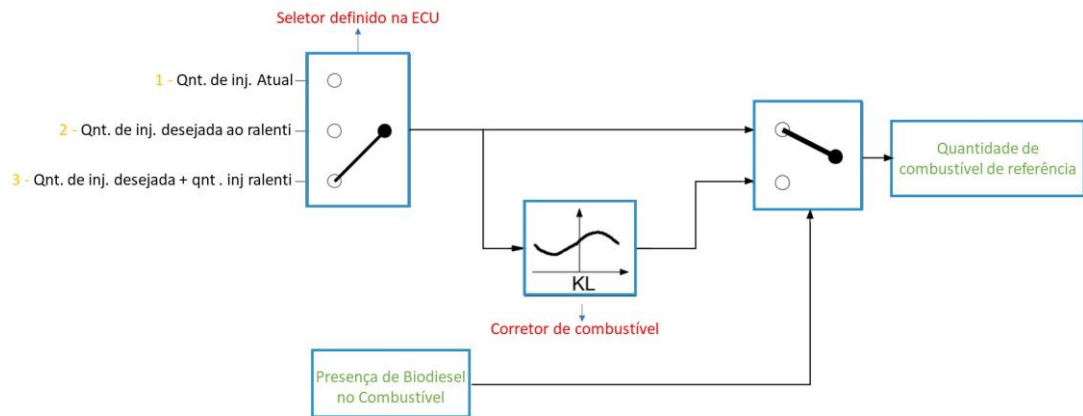


Figura 48 - Seletor de quantidade de combustível de referência

### 3.3.2. Cálculo do Valor de Real de Massa de Ar

Um passo crucial no funcionamento do sistema EGR consiste em determinar a quantidade de massa de ar que está a ser admitida no motor com o sistema em operação. Numa fase inicial, é realizada uma correção ao sinal medido da massa de ar,  $V$ , em função do tempo,  $t$ , desde que o motor é posto em funcionamento. Para isso, utiliza-se o fator  $F_1$  e a constante de tempo  $C$ , de acordo com a equação (10). A partir do momento em que o valor de  $t$  excede o valor de  $C$ , este fator de correção deixa de ser aplicado.

Este ajuste ao valor medido é realizado para minimizar a probabilidade de erros de leitura, uma vez que, neste veículo, o sensor de massa de ar é do tipo filme quente e necessita de ser aquecido. À medida que o motor admite ar, o sensor é arrefecido em função da quantidade de ar que passa por ele. Após este arrefecimento, o valor medido da massa de ar é determinado através da sua linearização.

$$\text{massa\_ar\_corrigido} = V \cdot \left[ F_1 + \left( (1 - F_1) \cdot \frac{t}{C} \right) \right] \quad (10)$$

Assim, conforme ilustrado na Figura 49, é realizada uma linearização do sinal, ou seja, o sinal de tensão medido pelo sensor é interpretado pela unidade de controlo e associado a um valor de massa de ar, que será posteriormente utilizado para calcular a média com o valor anterior. Com base nisso, e de acordo com o número de cilindros do motor e a sua rotação, calcula-se, em miligramas por ciclo, a quantidade de massa de ar a ser introduzida em cada câmara de combustão. Este valor é corrigido de acordo com a pressão atmosférica e a temperatura do ar, uma vez que a concentração de oxigénio varia com a altitude e a temperatura influencia diretamente o desempenho do motor.

Dado que o valor admitido pode ser incorretamente lido devido a uma falha no sensor, realiza-se o cálculo de um valor teórico para verificar a coerência entre ambos. Quando não há uma

discrepância significativa entre estes valores, utiliza-se o valor medido pelo sensor de massa de ar. Contudo, se houver uma grande divergência, é gerado um erro que ativa o seletor 2, recorrendo-se a uma tabela de valores predefinidos pelo fabricante, em função da pressão de admissão e da rotação do motor.

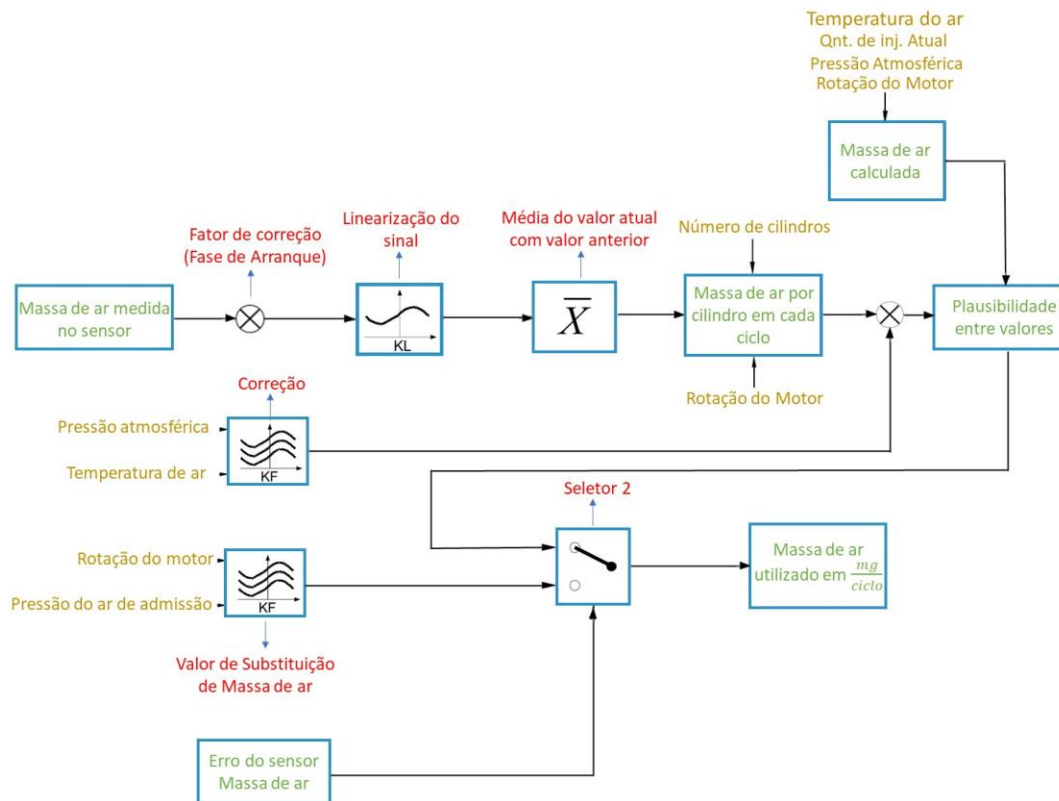


Figura 49 - Cálculo do valor real de massa de ar

Para que a verificação da plausibilidade seja realizada, é necessário ter em consideração vários fatores, nomeadamente:

- O curso do atuador da EGR deve estar dentro dos limites estabelecidos;
- A ignição deverá estar ligada;
- A pressão atmosférica atual deverá ser superior à pressão mínima definida pelo fabricante;
- A quantidade de injeção de combustível atual deverá ser inferior a um valor limite previamente estabelecido;
- As rotações do motor e a pressão de sobrealimentação devem respeitar os limites estipulados pelo fabricante;
- Não deverá existir qualquer falha nos seguintes sensores: pressão de sobrealimentação, pressão atmosférica, temperatura do ar, cambota, massa de ar, corpo da borboleta do coletor de admissão, bem como no controlador da pressão do turbo.

Se todos os parâmetros acima mencionados forem cumpridos, a plausibilidade será confirmada. Caso a relação entre a massa de ar medida e a massa de ar calculada apresente uma discrepância significativa durante um determinado período de tempo, o erro é considerado permanente, e os valores de substituição são implementados. No entanto, se o erro permanente deixar de ocorrer por um período de tempo definido pelo fabricante, as condições de substituição deixam de ser aplicadas. Importa referir que, se algum dos fatores acima não for cumprido, o controlo de plausibilidade deixa de ser realizado. Para uma melhor compreensão, é apresentado na Figura 50 um esquema que ilustra o controlo de plausibilidade.

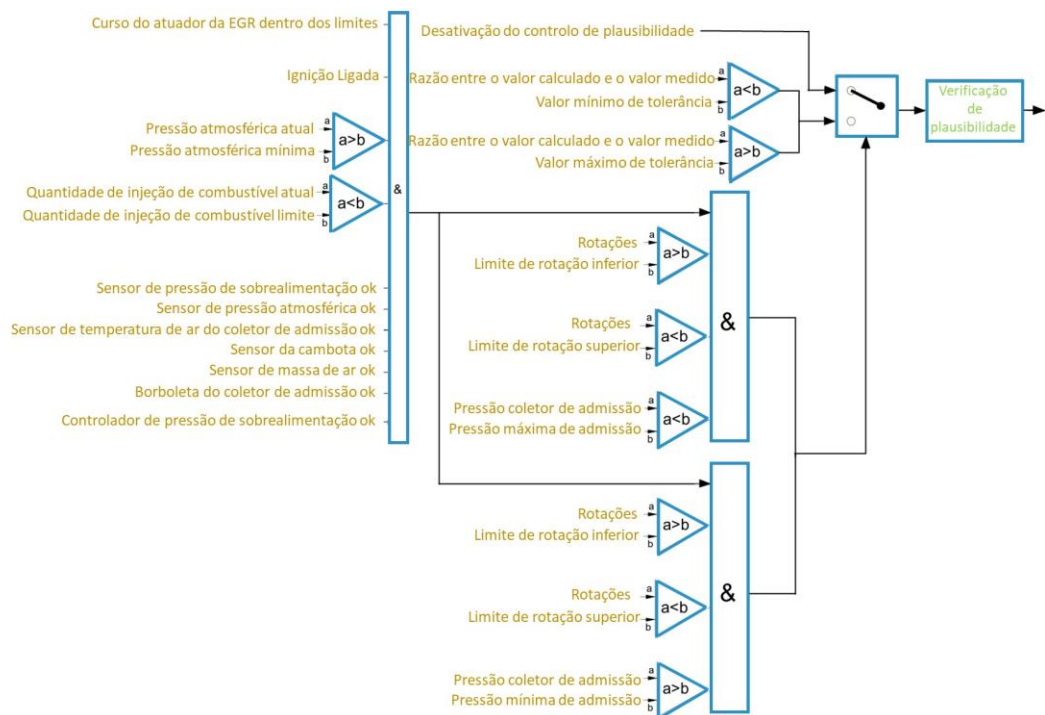


Figura 50 - Controlo de plausibilidade

### 3.3.3. Cálculo do Valor de Referência de Massa de Ar

Para que o sistema de EGR funcione corretamente, é essencial determinar o valor da massa de ar a ser admitida pelo motor. Este cálculo inicia-se a partir de um mapa base, apresentado na Figura 51, que é posteriormente ajustado tendo em conta a rotação do motor, a quantidade de combustível de referência, a pressão atmosférica, a temperatura do combustível e a temperatura do líquido de refrigeração do motor. Além dessas correções, durante o diagnóstico do veículo, pode ser efetuada uma adaptação da válvula EGR que ajusta adicionalmente o valor da massa de ar, assegurando a estabilidade do funcionamento do veículo.

Todos os ajustes realizados ao valor base devem estar dentro dos limites definidos pelo fabricante, de modo a garantir o correto funcionamento do sistema. Caso contrário, serão

aplicados os valores mínimos ou máximos estipulados pela calibração. Por fim, para garantir maior estabilidade e controlo de resposta do sistema, utiliza-se um controlador DT1.

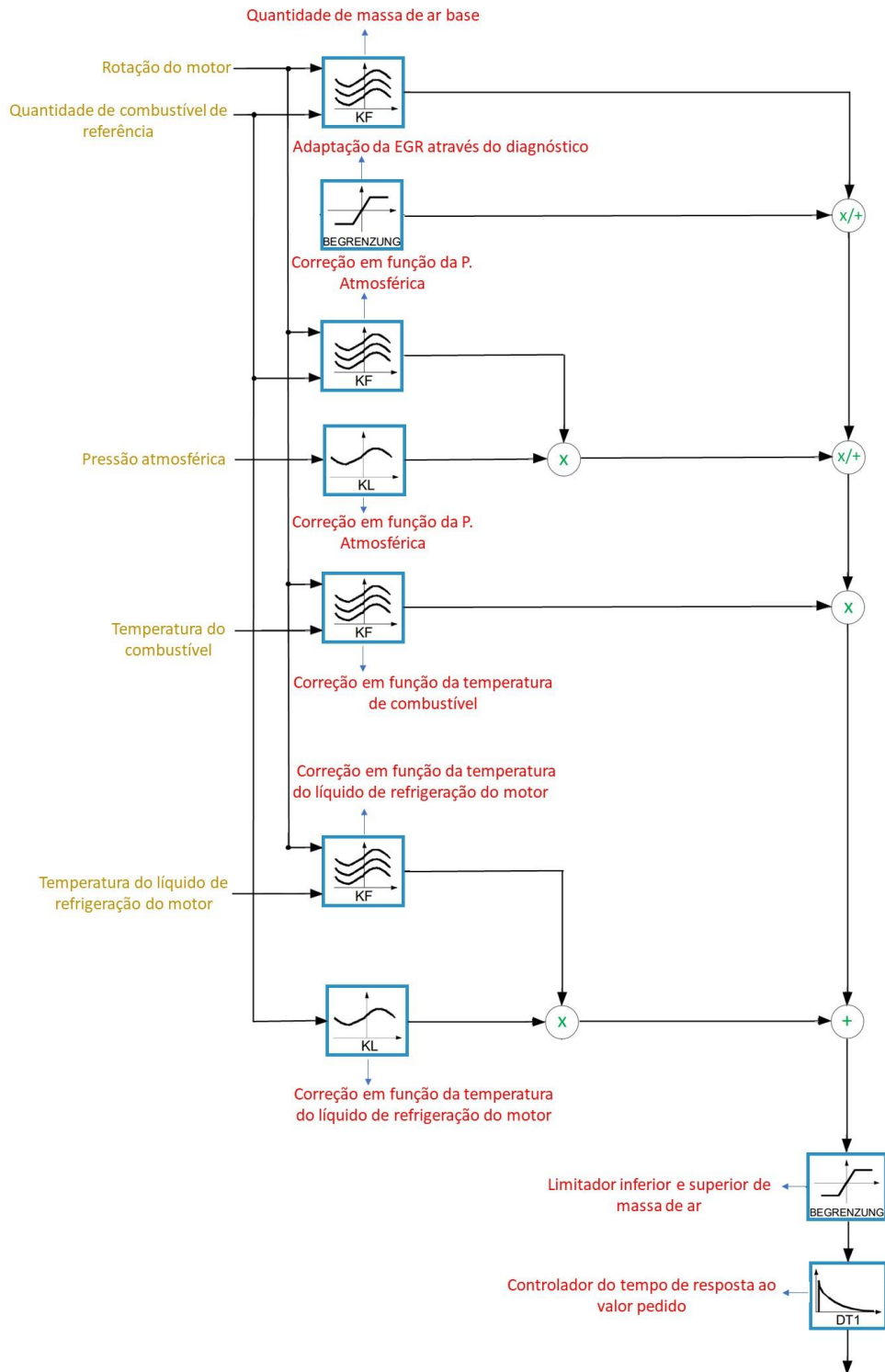


Figura 51 - Cálculo do valor de referência de massa de ar

### 3.3.4. Monitorização e Desativação

Para que o sistema de EGR seja rigorosamente controlado, é fundamental que a unidade de controlo do motor saiba com precisão a posição do respetivo atuador. Por isso, este controlo é realizado com base no valor admitido de massa de ar, uma vez que está diretamente relacionado com a quantidade de gases recirculados. Esta monitorização inicia-se logo que a ignição do veículo é ligada, sendo efetuada uma inicialização ao sistema para verificar se está em condições adequadas. Essa inicialização deve cumprir determinados critérios: ao ligar a ignição, o atuador da válvula deve permanecer na sua posição base por um período definido pelo fabricante, após o qual deve deslocar-se até à sua posição máxima durante o tempo também predefinido. Posteriormente, o atuador deve regressar à posição inicial, considerando-se assim a monitorização bem-sucedida. Se alguma destas etapas não for cumprida conforme especificado, o sistema gera um código de avaria, sinalizando um defeito. Durante a operação do motor, é crucial monitorizar o desvio do atuador da válvula EGR, comparando-o com o desvio máximo permitido, definido nos mapas da ECU. Estes mapas são configurados com base na rotação do motor, no valor de massa de ar de referência e na quantidade de injeção estabelecida de acordo com o seletor especificado na calibração da ECU, abordado no sub-subcapítulo 3.3.1. Se o desvio ultrapassar os limites estabelecidos e persistir por um período superior ao definido pelo fabricante, será ativado um erro específico. Para que a monitorização seja efetuada, o desvio calculado com base nos mapas deve também exceder um valor mínimo pre-definido na calibração. O esquema base do funcionamento deste processo é apresentado na Figura 52.

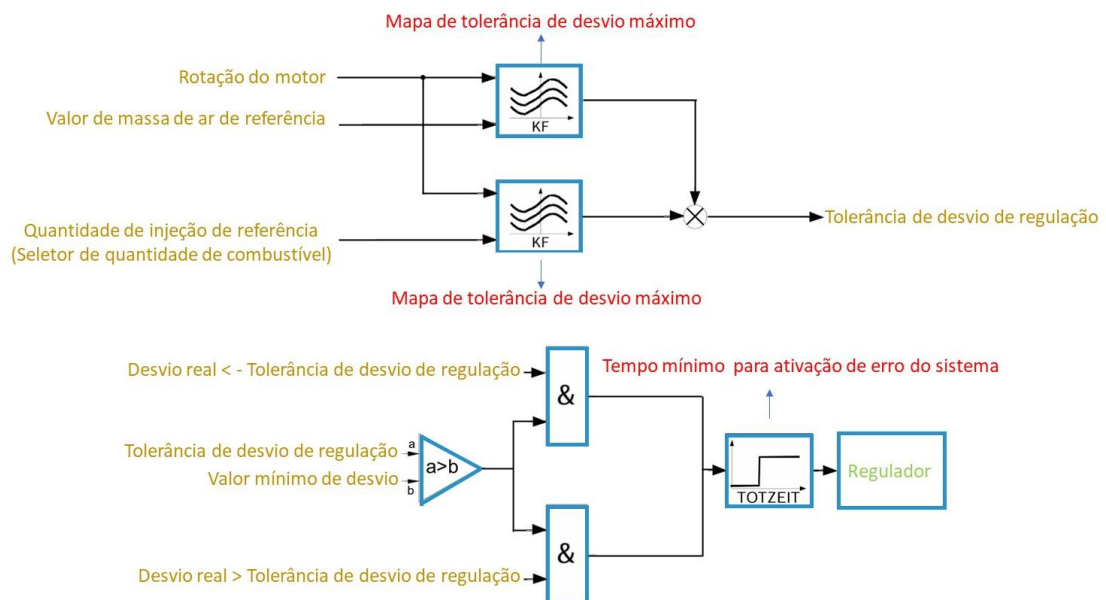


Figura 52 - Monitorização do sistema de EGR

Na fase inicial de funcionamento do motor, existe um mapa que, em função da temperatura do líquido de refrigeração, define o período durante o qual o sistema EGR deve permanecer desativado. Esta desativação ocorre para garantir um melhor arranque a frio, sendo que, para temperaturas muito baixas, o mapa indica um período de inatividade mais prolongado. O controlo deste tempo é feito por um contador, apresentado na Figura 53, que verifica se o tempo decorrido desde a ativação do motor é inferior ao definido no mapa. Assim que esse período é ultrapassado, o sistema começa a funcionar normalmente.

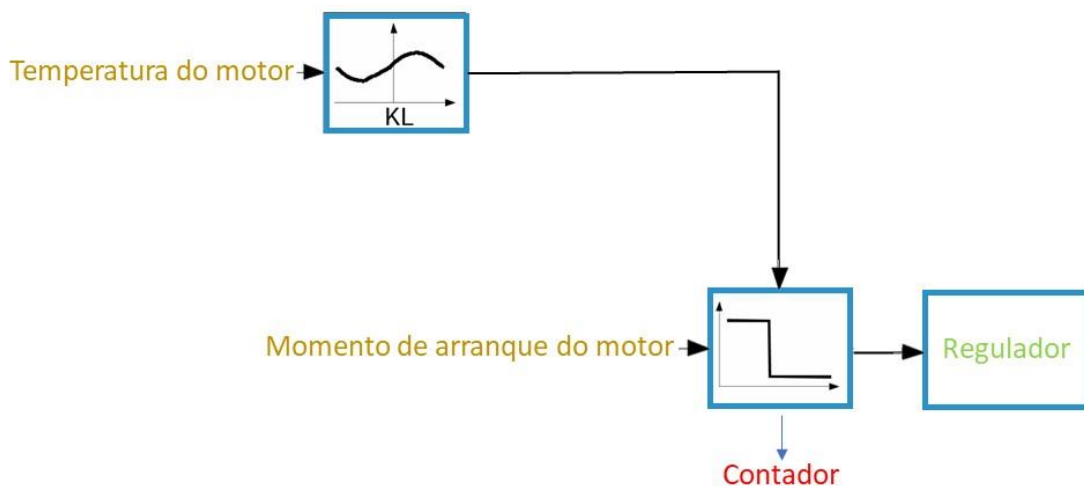


Figura 53 - Desativação do sistema de EGR em função da temperatura do líquido de refrigeração do motor na fase de arranque

O permutador de calor incorporado no sistema EGR desempenha um papel crucial, pois os gases de escape provenientes da combustão atingem temperaturas muito elevadas e, ao serem misturados diretamente com o ar da atmosfera, aquecem-no significativamente, reduzindo a eficiência do motor e aumentando a probabilidade de formação de  $NO_x$ . No entanto, dado que o motor opera com maior eficiência à sua temperatura normal de funcionamento, resultando também numa menor emissão de poluentes, é essencial reduzir o tempo de aquecimento do motor, desativando o arrefecimento dos gases. Esta desativação ocorre igualmente para valores relativamente baixos de massa de ar de referência, uma vez que, em baixas cargas, ajuda a manter a temperatura de combustão adequada, promovendo uma maior eficiência térmica. Quando o valor da massa de ar de referência ultrapassa um determinado limite, o permutador de calor volta a ser utilizado. É importante destacar que se aplica uma histerese tanto ao valor da massa de ar quanto à temperatura do motor, garantindo um controlo mais estável, conforme ilustrado na Figura 54.

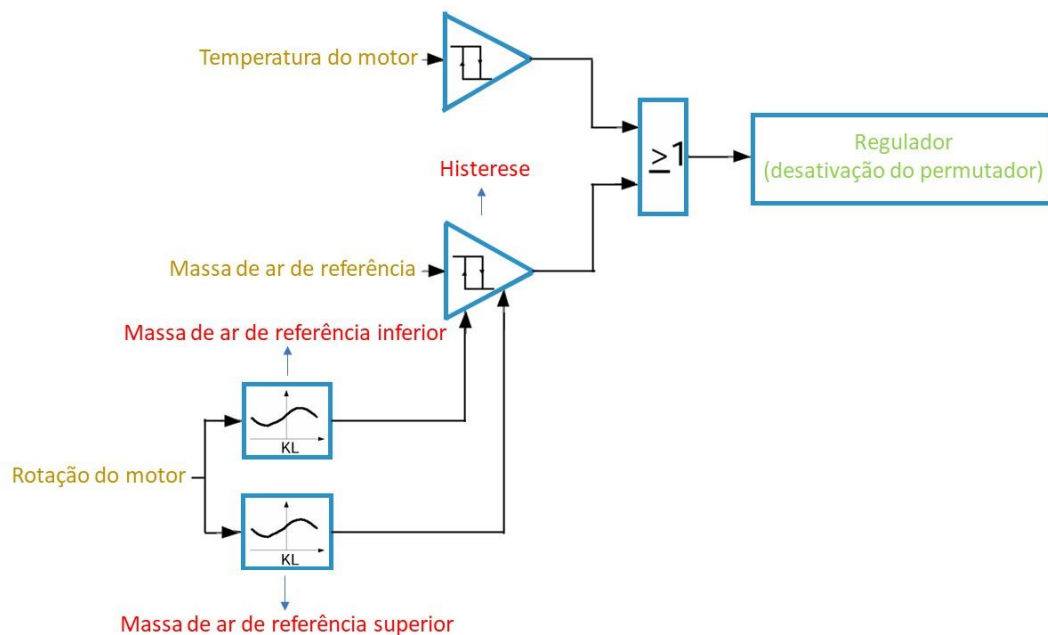


Figura 54 - Desativação do permutador de calor em função da temperatura do motor e da massa de ar de referência

Para situações em que é necessária uma maior potência do motor, é essencial que apenas ar seja admitido, de modo a garantir um grande excesso de ar, e assim, uma resposta mais rápida e eficiente do veículo. Existem, portanto, duas formas de desativação do sistema (fecho da válvula EGR), nomeadamente quando é excedida uma determinada quantidade de injeção de combustível ou quando se verifica um pedido de pressão de turbo superior a um determinado limite. No primeiro método, utiliza-se como referência a quantidade de injeção de combustível definida pelo seletor presente na calibração da ECU, realizando-se uma correção ao valor de injeção de referência em situações em que as sondas lambda detetam a presença de biocombustível na mistura, uma vez que percentagens significativas deste composto resultam numa perda de potência do motor. Posteriormente, essa quantidade de combustível é comparada com valores mínimos e máximos, em função da rotação do motor. Se o valor máximo for atingido, o sistema de EGR é desativado; caso o valor de combustível seja inferior ao mínimo, o sistema é ativado. Este controlo é realizado com o auxílio de uma histerese, garantindo que o sistema opere de forma mais estável, evitando que o funcionamento na zona crítica resulte numa ativação e desativação constante e abrupta. A Figura 55 apresenta o esquema base descrito.

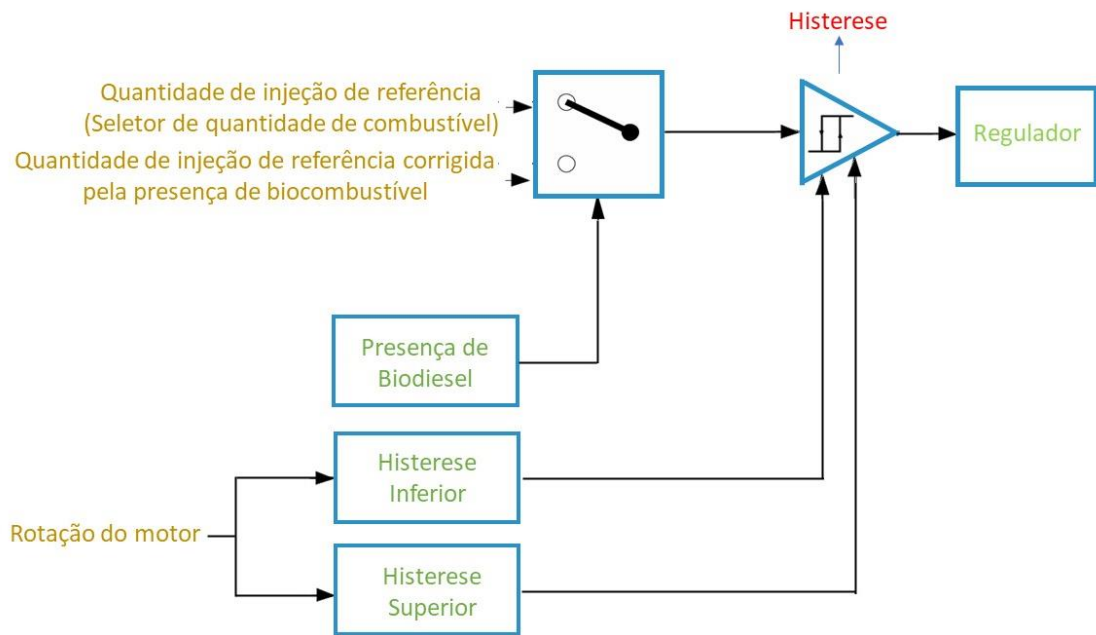


Figura 55 - Desativação do sistema de EGR em função da quantidade de injeção de referência

No segundo método, é necessário que uma série de parâmetros seja cumprida, conforme ilustrado na Figura 56, os quais estão relacionados com a rotação do motor, a quantidade de injeção de combustível, a posição do atuador da EGR e o pedido de pressão de turbo. Em situações em que a pressão de turbo excede um determinado valor e todos os restantes parâmetros são satisfeitos, é acionado um temporizador que define um tempo mínimo para que, posteriormente, o regulador mantenha a válvula completamente fechada, garantindo que não são utilizados gases de escape. Tanto o pedido de pressão de turbo quanto a posição do atuador do sistema de EGR dispõem de componentes que asseguram uma maior rapidez no respetivo controlo, o que resulta numa melhor resposta do veículo nas diferentes condições de condução.

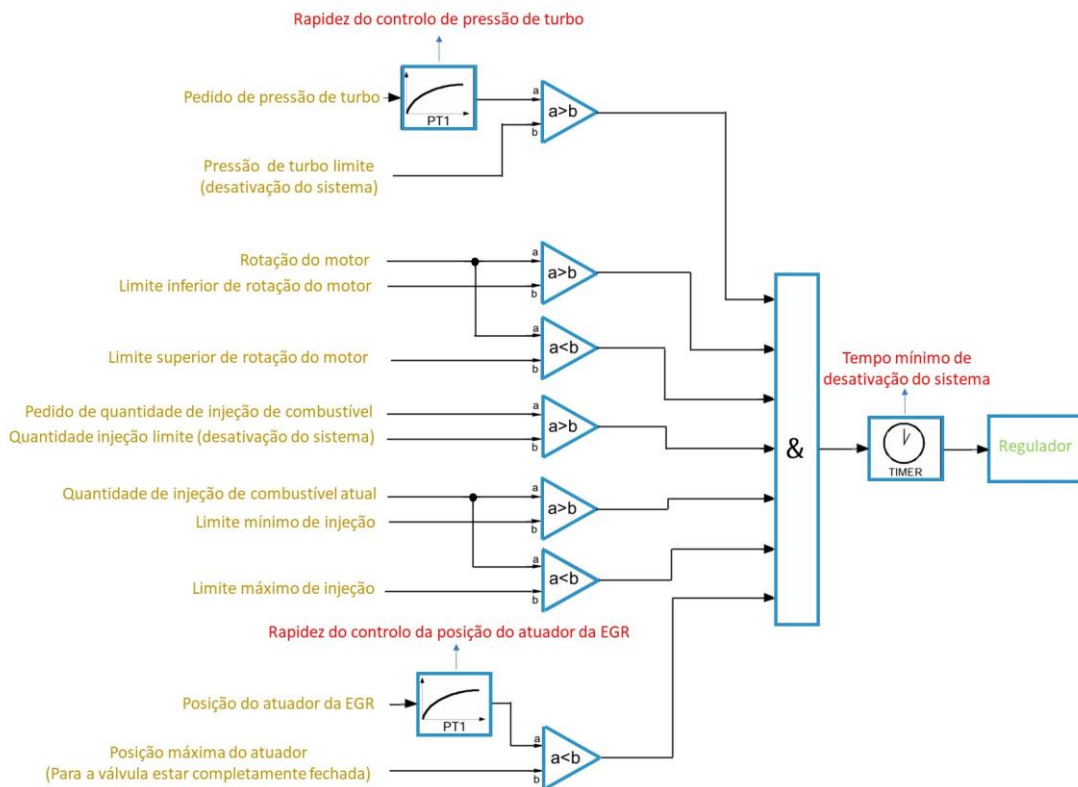


Figura 56 - Desativação do sistema de EGR em função do pedido de pressão de turbo

### 3.3.5. Controle Paralelo

O controle paralelo tem como objetivo realizar correções ao valor desejado da massa de ar, ajustando a posição do atuador de recirculação dos gases de escape em função de variáveis como a pressão atmosférica, a adaptação da válvula EGR via diagnóstico, a temperatura do combustível, a quantidade de injeção de combustível de referência, bem como a rotação e a temperatura do líquido de refrigeração do motor. Este ajuste na calibração foi efetuado diretamente no cálculo teórico do valor de massa de ar, apresentado no sub-subcapítulo 3.3.3, pelo que não é necessária qualquer correção adicional.

### 3.3.6. Regulador

O regulador é a fase em que se concretiza todo o processo descrito nas etapas anteriores, incluindo o cálculo do valor de massa de ar de referência e do valor real medido no coletor de admissão, a monitorização e desativação do sistema, bem como o controle paralelo. Todas essas etapas fornecem informações ao regulador, que determina as condições em que o sistema de EGR deve atuar.



## 4. Verificação Experimental da Calibração BOSCH® e Respetiva Reprogramação da ECU

No presente capítulo, será feita a verificação de alguns dos tópicos de gestão apresentados no subcapítulo 3.3, com o objetivo de comprovar a calibração fornecida pela BOSCH®. Importa referir que não serão analisados todos os aspetos mencionados anteriormente, pois tal abordagem tornaria o desenvolvimento desta dissertação excessivamente extenso. Assim, o estudo focar-se-á no cálculo do valor teórico da massa de ar, apresentado no sub-subcapítulo 3.3.3, e na monitorização do sistema de EGR, tratada no sub-subcapítulo 3.3.4. Além disso, serão realizadas alterações específicas na calibração para avaliar o comportamento do sistema de EGR e, consequentemente, o desempenho global do veículo.

Para interpretar e editar a calibração recolhida da ECU no subcapítulo 3.2, é utilizado o programa WinOLS®, que permite identificar os diversos mapas gerados pela BOSCH®, posteriormente ajustados pelo fabricante do veículo. Na Figura 57 é apresentado o programa com a respetiva calibração, salientando-se que, neste tipo de unidade de controlo, existem dois setores de calibração. Contudo, na prática, apenas um deles é utilizado, uma vez que o outro se destina a variantes dos mesmos veículos, ou seja, para modelos que apresentam praticamente a mesma calibração, mas que possuem, por exemplo, um tipo de caixa de velocidades ou tração diferentes.

A calibração apresentada na Figura 57 encontra-se no formato 2D, sendo o método mais simples de visualizar os diferentes mapas, contudo pode também ser utilizado o formato em numeração hexadecimal ou formato de gráfico 3D.

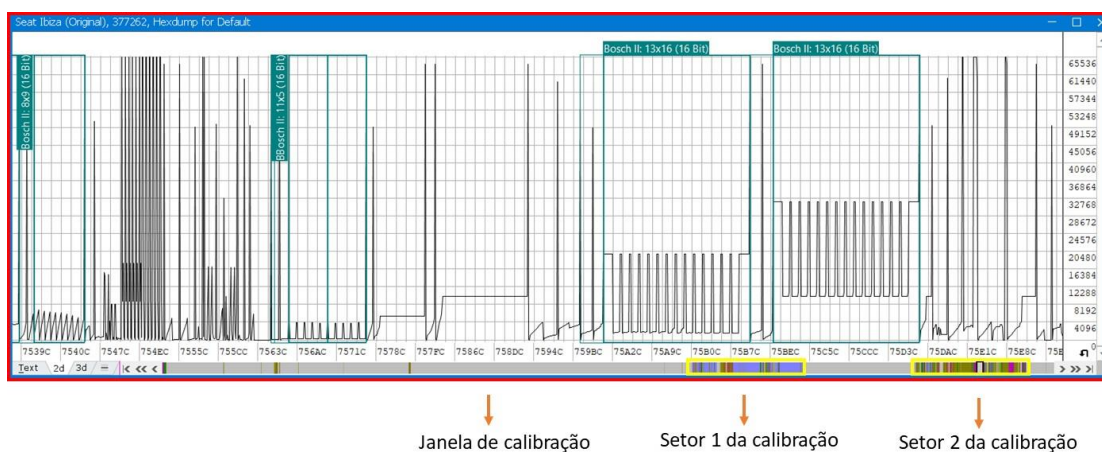


Figura 57 - Software WinOLS® com a apresentação dos setores e respetiva calibração

Como esta unidade de controlo apresenta, na sua calibração, um total de 5194 mapas distintos, e, apesar de o software WinOLS® os identificar, não fornece uma descrição exata do seu conteúdo, sendo também impossível identificá-los visualmente. Por esse motivo, utiliza-se um ficheiro *Damos*, um conjunto de dados sobreposto à calibração da ECU. Este ficheiro permite identificar com precisão cada mapa, destacando-os com coloração amarela, incluindo os respetivos eixos e unidades de medida, possibilitando uma compreensão rigorosa de todo o mapeamento efetuado pelo fabricante. Na Figura 58 é apresentado um excerto do *Damos*, onde se pode observar o número total de mapas, as suas localizações na calibração, a identificação e descrição de cada um, bem como o respetivo tamanho.

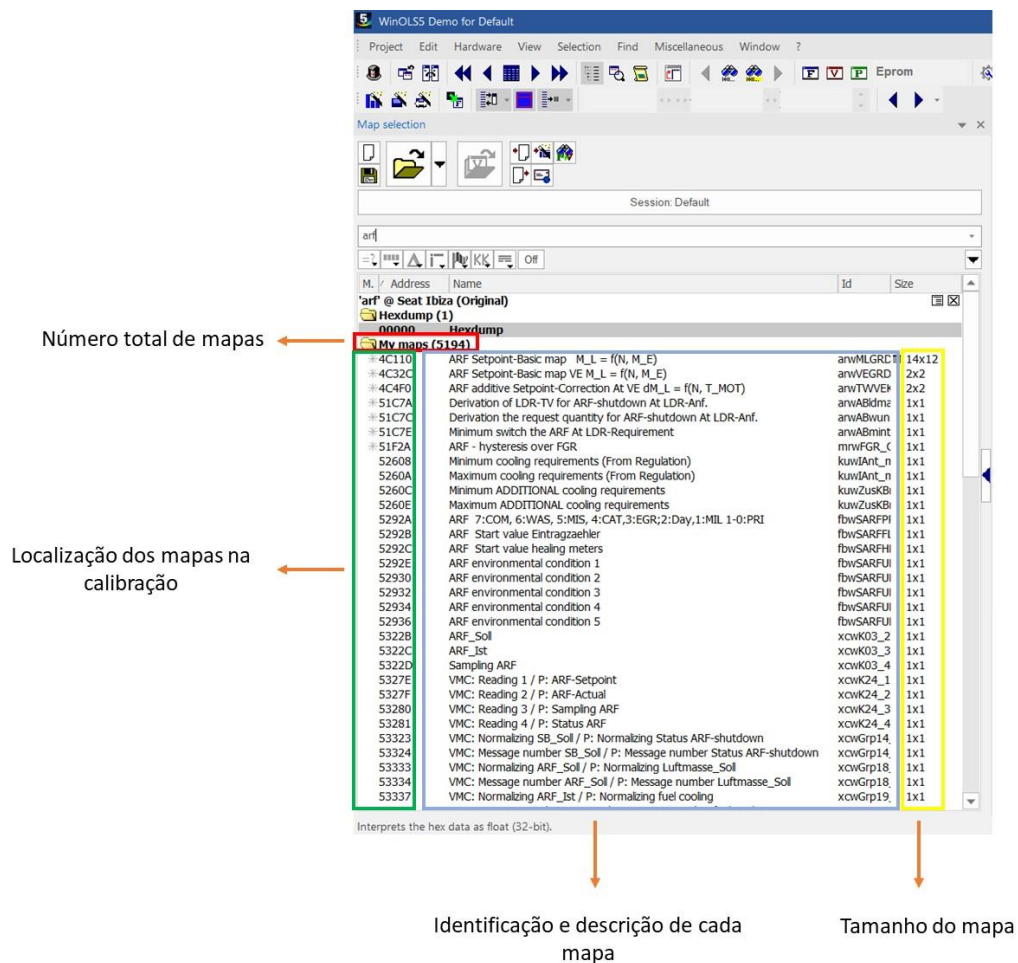


Figura 58 - Descrição detalhada da aplicação do Damos na calibração

Com o objetivo de comprovar que a gestão do sistema de EGR apresentada no subcapítulo 3.3 está incorporada na calibração da ECU, utiliza-se o WinOLS®. Na Figura 59, é mostrado, como exemplo, o mapa base de massa de ar de referência (arwMLGRDKF) utilizado no cálculo do valor teórico em função da rotação do motor e da quantidade de combustível de referência, tal como descrito no sub-subcapítulo 3.3.3. É importante destacar que, no início de todos os mapas presentes na calibração da ECU, é exibido um cabeçalho contendo os dados e as características dos eixos x e y.

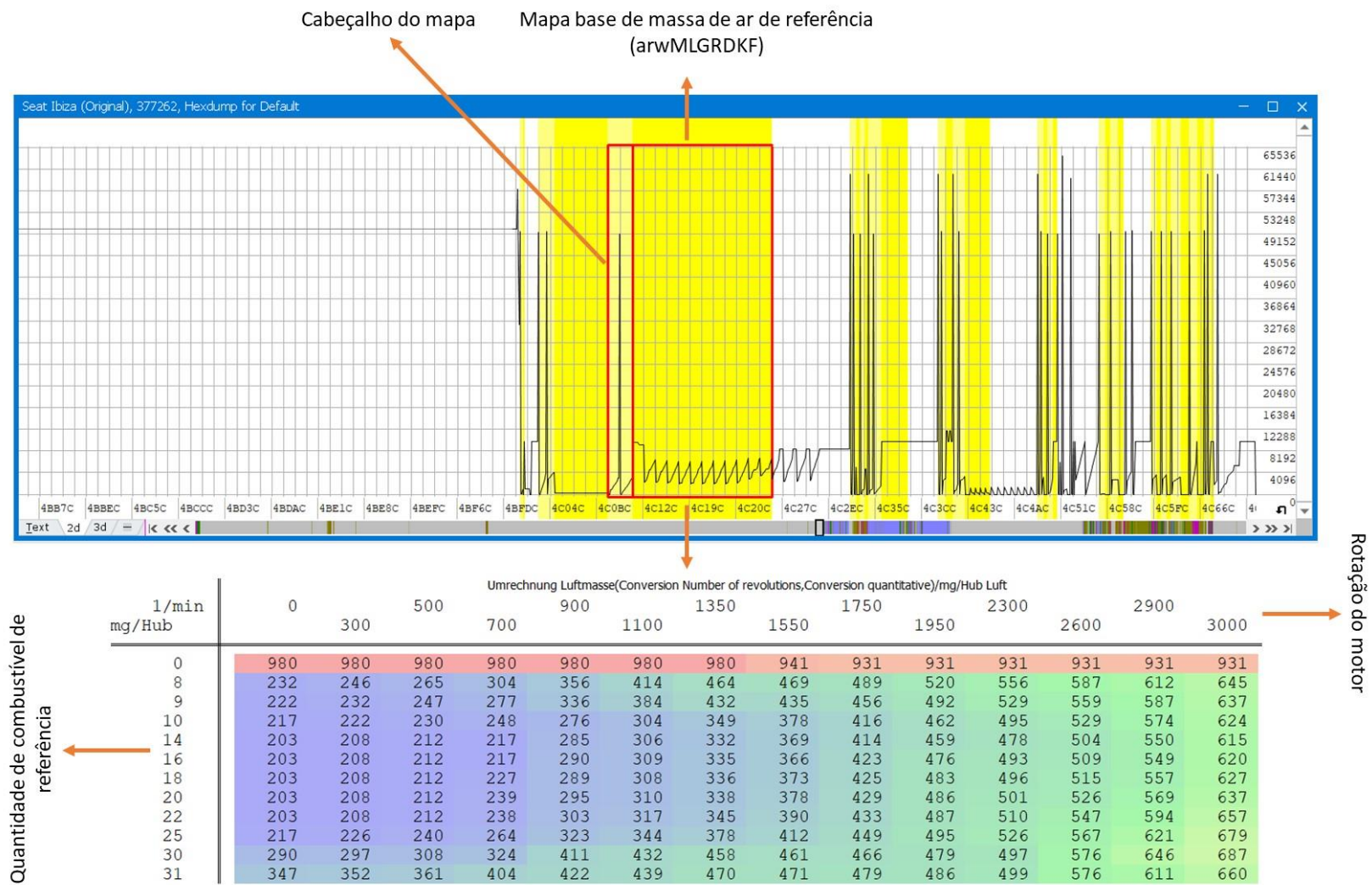


Figura 59 - Exemplo da comprovação da gestão do sistema da EGR segundo o fabricante na calibração da ECU

Ao abrir as propriedades do mapa, verifica-se que a sua identificação corresponde ao nome descrito na documentação da BOSCH®, conforme apresentado na Figura 60.

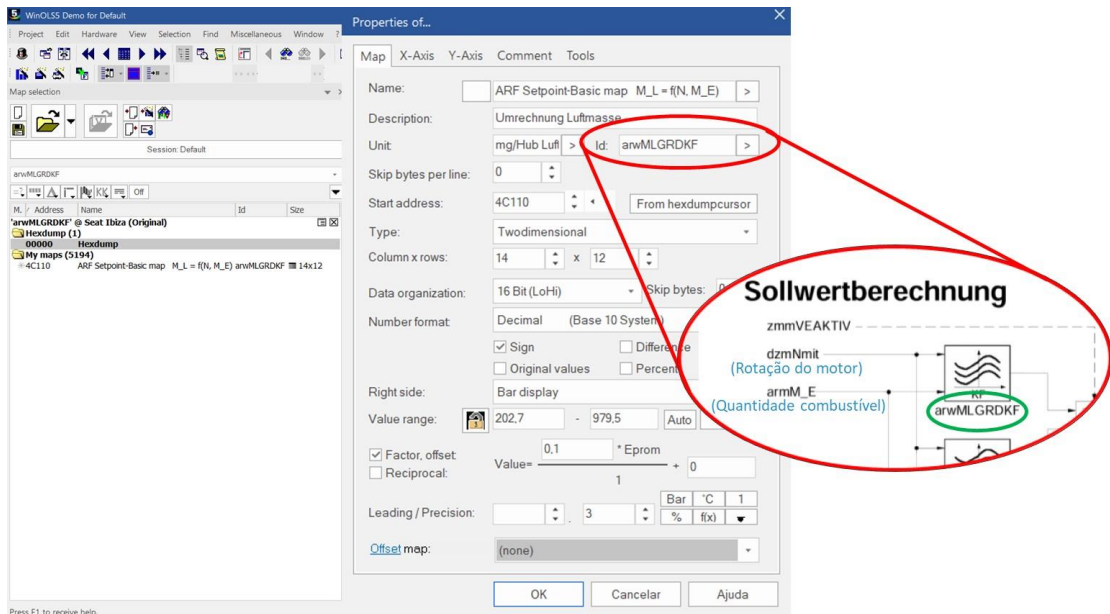


Figura 60 - Apresentação das propriedades do mapa arwMLGRDKF e comprovação da gestão do sistema da EGR segundo o fabricante

#### 4.1. Preparação da ECU para Reprogramação em Tempo Real

O próximo passo consiste em preparar a ECU para a realização dos testes, que permitirão verificar alguns dos parâmetros utilizados pelo fabricante no controlo do sistema de EGR, bem como analisar o comportamento do veículo face às alterações efetuadas. Para tornar o processo mais eficiente, será utilizado um emulador da FLASH, denominado de OLS 300, que possibilita a alteração de parâmetros na calibração em tempo real através do WinOLS®, evitando a necessidade de realizar os processos de leitura/escrita descritos no subcapítulo 3.2. Assim, o primeiro passo é remover a FLASH, utilizando uma pistola de ar quente com uma temperatura aproximada de 380°C, de forma a ultrapassar o ponto de fusão do estanho, conforme ilustrado na Figura 61. É importante destacar que a temperatura da pistola não deve exceder o valor mencionado, pois há o risco de danificar o componente.



Figura 61 - Remoção da FLASH da ECU

Após a remoção da memória FLASH, é necessário retirar o excesso de estanho presente nos pontos de solda que ligam a FLASH à placa da unidade de controlo, conforme ilustrado na Figura 62. Para esse fim, utiliza-se uma malha de cobre em conjunto com um ferro de soldar a estanho.



Figura 62 - Remoção do excesso de solda com recurso a malha de cobre e a um ferro de soldar a estanho

Em seguida, procede-se à soldadura do suporte na ECU, que permitirá a ligação do adaptador do OLS 300, conforme ilustrado na Figura 63.

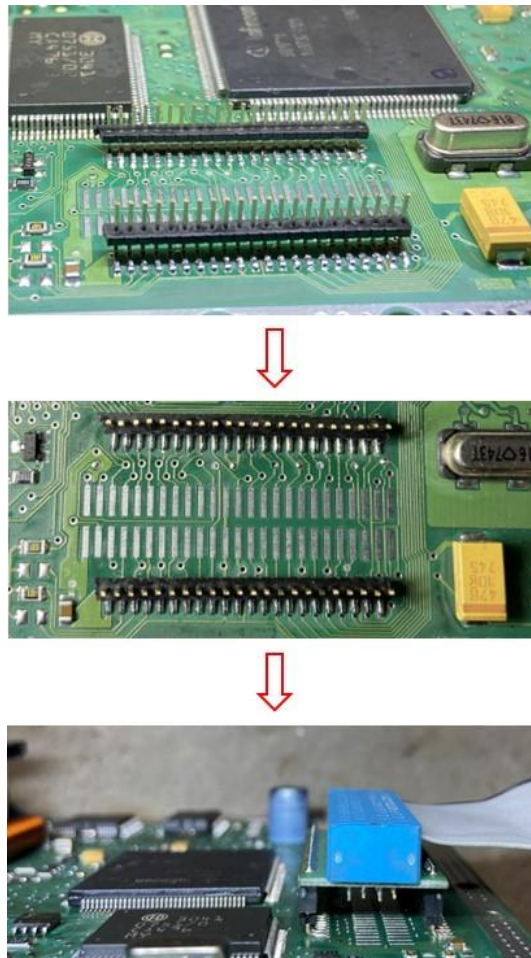


Figura 63 - Processo de montagem do adaptador do OLS 300

Para verificar se o processo de soldadura foi corretamente realizado, o OLS 300 é ligado simultaneamente à unidade de controlo e ao WinOLS®. Em seguida, a calibração original da ECU é carregada para o OLS 300. Se os mapas de calibração no WinOLS® apresentarem setores em cor azul, significa que a unidade de controlo está a receber a calibração e a comunicar corretamente, conforme ilustrado na Figura 64.

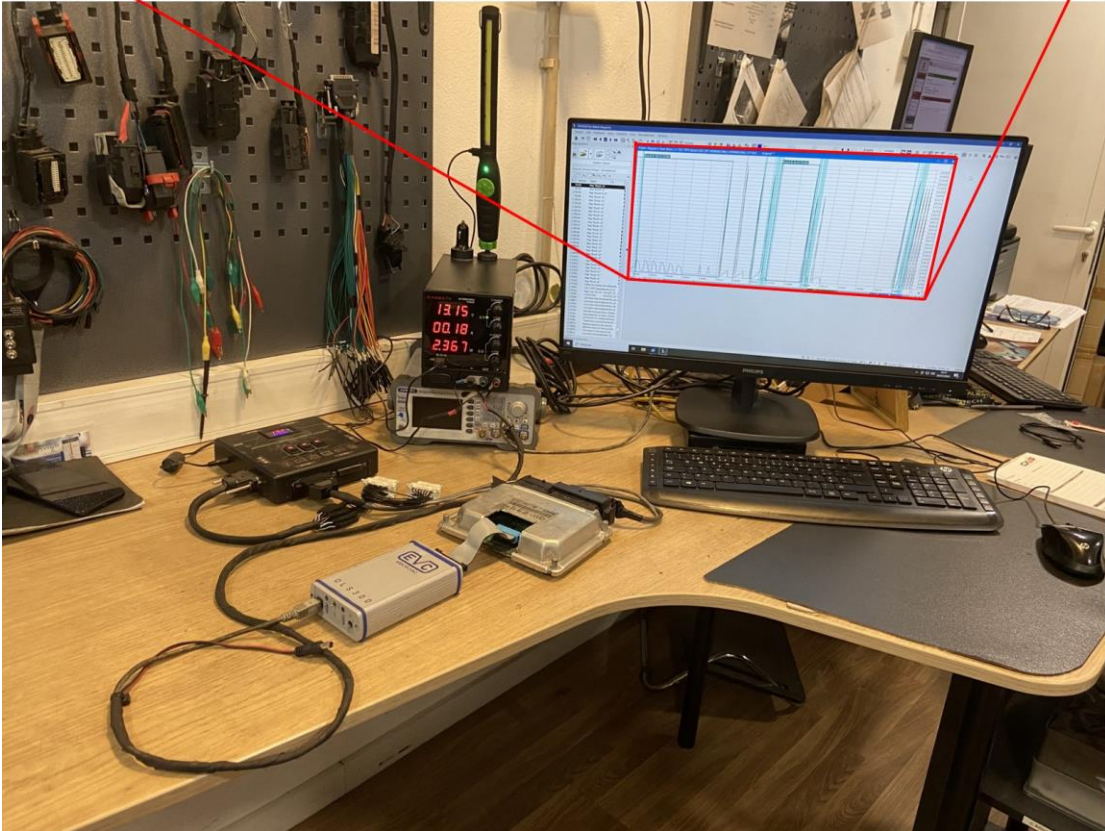
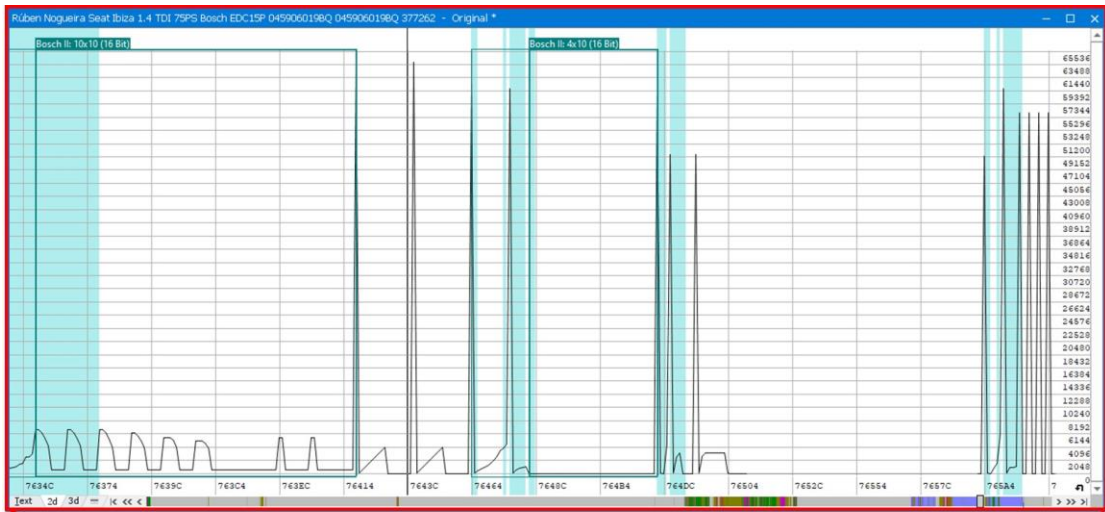


Figura 64 - Comunicação da unidade de comando com o OLS 300 e o WinOLS®

## 4.2. Instalação da ECU Reprogramável em Tempo Real e Preparação do Veículo

Após a preparação da ECU, inicia-se o processo de fixação do veículo no banco de ensaio (Rotronics® A4F5), conforme ilustrado na Figura 65. Nesta etapa, é importante posicionar o veículo de forma centrada nos rolos. Sendo este um banco de medição às quatro rodas, é fundamental ajustar corretamente a distância entre os rolos de acordo com a distância entre eixos do veículo, assegurando assim a realização dos testes de forma segura. As cintas de amarração devem ser dispostas em cruz para garantir uma fixação mais eficiente.

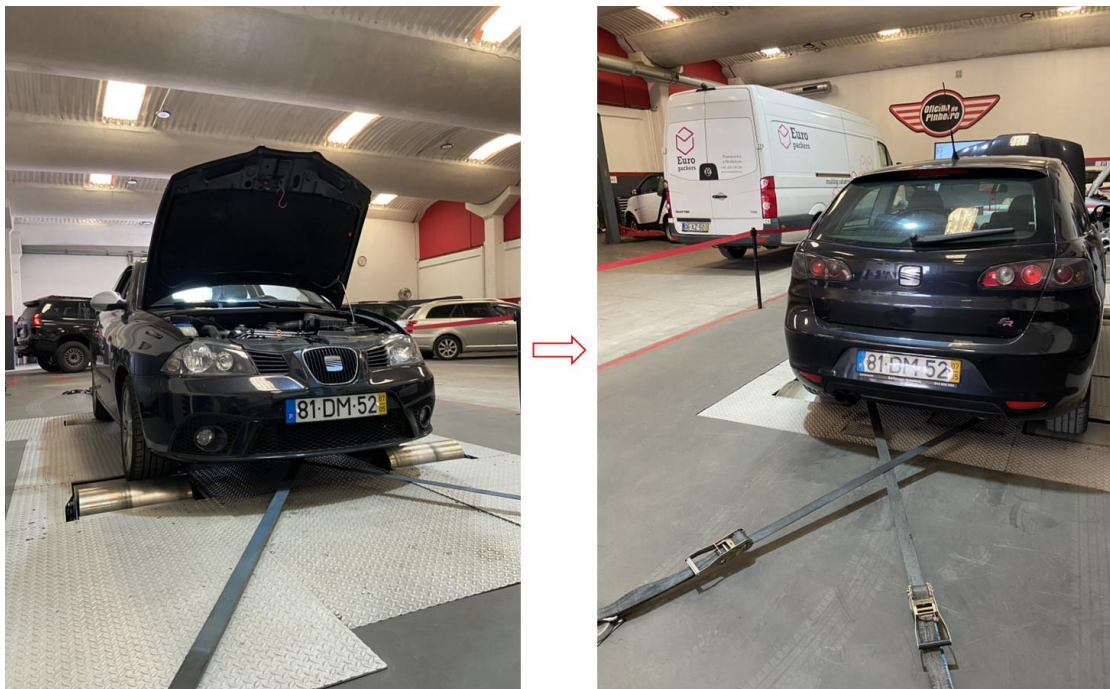


Figura 65 - Fixação do veículo ao banco do ensaio

Após o veículo estar colocado no banco de ensaio, retira-se a ECU original do veículo e coloca-se a ECU de testes, juntamente com o emulador OLS 300, conforme a Figura 66.



Figura 66 - Substituir a ECU original do veículo pela ECU de testes incorporada com o emulador OLS 300

### 4.3. Reprogramação e Verificação Experimental da Calibração Apresentada no Sub-subcapítulo 3.3.3

Para iniciar os ensaios relativos ao cálculo do valor teórico de massa de ar, pretende-se verificar se os valores pedidos na calibração correspondem efetivamente aos que são admitidos pelo motor durante a sua fase de funcionamento. Para tal, é necessária a utilização de uma máquina de diagnóstico (LAUNCH® X-431 PROS V 1.0) para verificar se o pedido de massa de ar e o valor admitido pelo motor coincidem. Recorre-se também à utilização de um osciloscópio (PicoScope® 4425A) para analisar o comportamento do atuador de comando da válvula EGR e da borboleta principal do coletor de admissão, em função do ciclo de trabalho (*duty cycle*) aplicado a cada uma delas. Para tal, é necessário consultar o esquema elétrico de gestão da ECU, de modo a identificar os fios aos quais as pontas de prova do osciloscópio devem ser conectadas, apresentando-se na Figura 67 um excerto da parte relevante para o ensaio. A borboleta do coletor de admissão possui uma ligação de quatro fios: uma alimentação de 12 volts no terminal 2, uma ligação à massa no terminal 1 para conectar ao potenciômetro da borboleta, uma ligação à ECU a partir do terminal 4 para transmitir a informação da posição da borboleta e uma ligação para receber um sinal de massa pulsada no terminal 3 a partir da ECU para fazer movimentar a borboleta, o qual origina o *duty-cycle* a ser analisado. Uma vez que existem duas ligações provenientes da ECU à borboleta, a análise do esquema elétrico por si só

não permite identificar com precisão a função de cada uma no funcionamento do veículo. Por esse motivo, foi utilizado o osciloscópio para garantir uma identificação correta. O atuador de controlo de vácuo da válvula EGR possui apenas duas ligações, sendo uma alimentação de 12 volts e um sinal de massa pulsada proveniente da ECU.

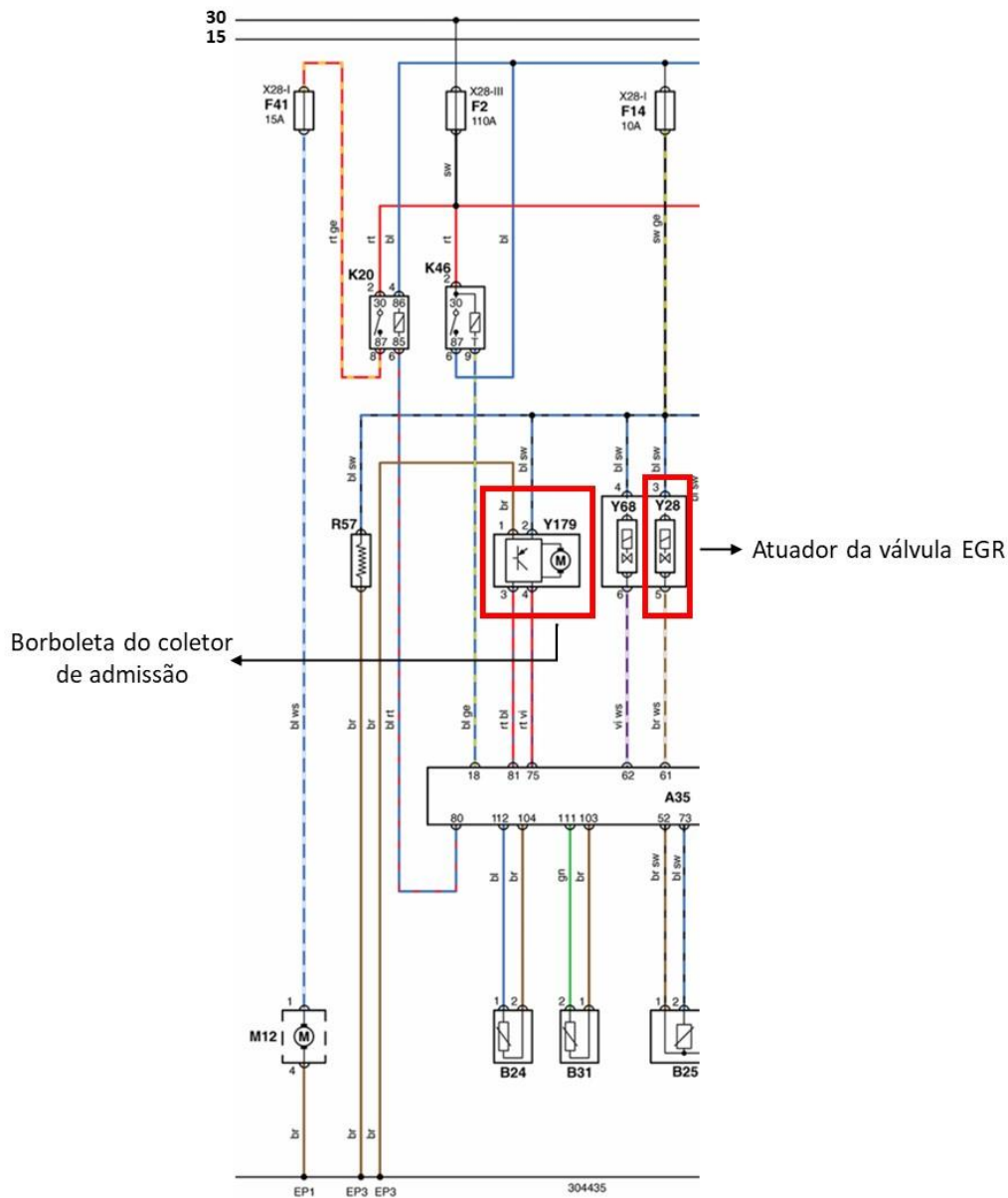


Figura 67 - Excerto da parte relevante do esquema elétrico da ECU para realizar o ensaio

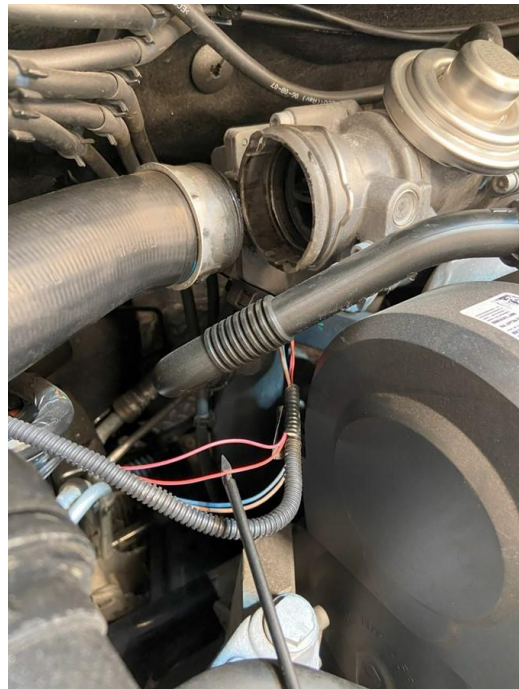
Na Figura 68, são apresentadas as duas ligações realizadas a partir do osciloscópio à borboleta do coletor de admissão e ao atuador da válvula EGR. A representação (a) mostra uma vista geral do procedimento, enquanto a representação (b) detalha a ligação ao atuador da válvula EGR e a representação (c) ilustra a ligação à borboleta do coletor de admissão.



(a)



(b)



(c)

Figura 68 - Ligação do osciloscópio ao atuador válvula EGR e à borboleta do coletor de admissão para verificação do duty-cycle

O passo seguinte consiste em colocar o veículo em funcionamento ao ralenti e verificar as condições básicas de operação. Pode verificar-se na Figura 69 que tanto o atuador da borboleta do coletor de admissão quanto o atuador da válvula EGR apresentavam um valor de *duty-cycle* baixo. Isto indica que a borboleta do coletor de admissão está parcialmente fechada e a válvula EGR significativamente aberta para facilitar a entrada dos gases de escape, uma vez que o veículo nestas condições não necessita de uma grande produção de potência.

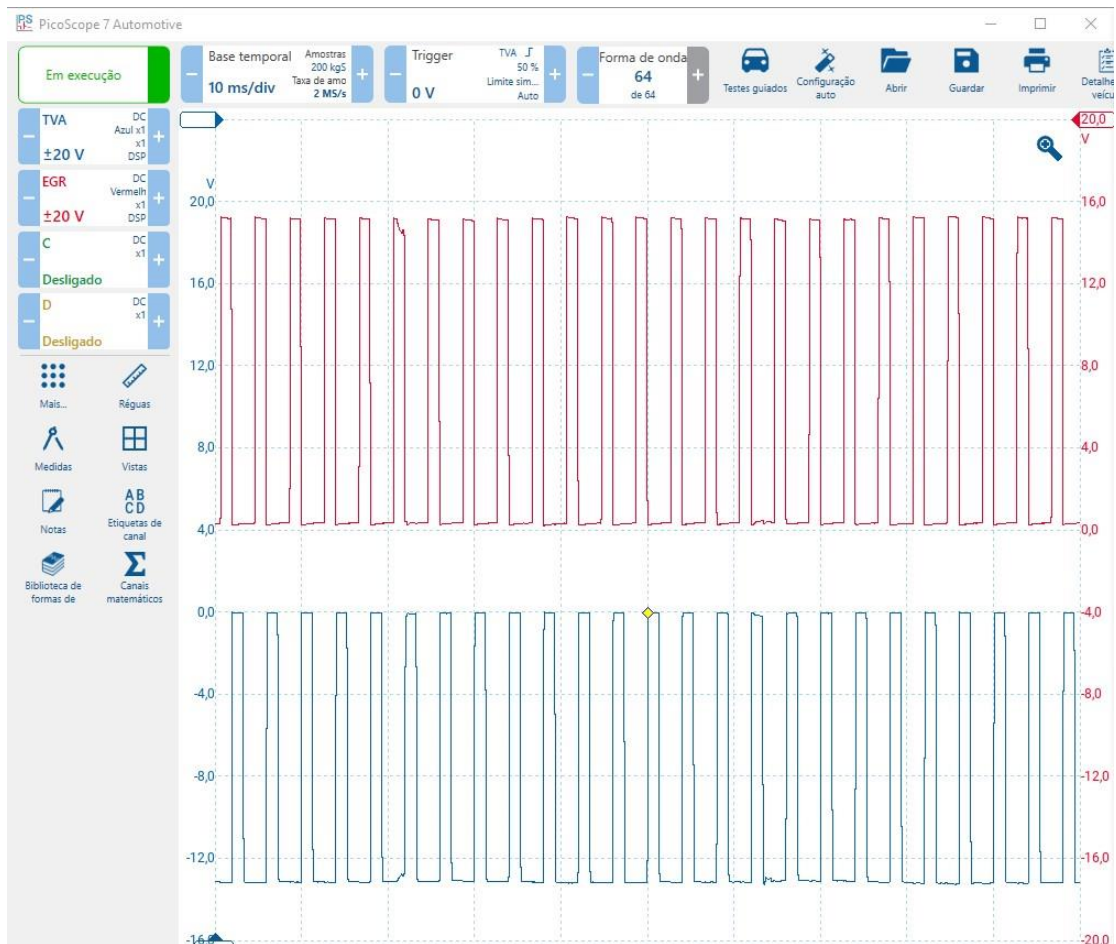


Figura 69 - Ciclo de trabalho do atuador da válvula EGR e da borboleta do coletor de admissão ao ralenti

O ensaio seguinte consistiu em modificar o mapa base de massa de ar de referência a ser introduzida no motor, ajustando-o para o valor máximo do mapa de 980 miligramas por ciclo, conforme a Figura 70. Esta alteração visa simular condições onde é necessário o máximo de ar no cilindro para que o veículo possa gerar a potência máxima e desta forma manter a válvula EGR completamente fechada.

		Umrechnung Luftmasse(Conversion Number of revolutions,Conversion quantitative)/mg/Hub Luft													
l/min mg/Hub		0	300	500	700	900	1100	1350	1550	1750	1950	2300	2600	2900	3000
0		980	980	980	980	980	980	980	941	931	931	931	931	931	931
8		232	246	265	304	356	414	464	469	489	520	556	587	612	645
9		222	232	247	277	336	384	432	435	456	492	529	559	587	637
10		217	222	230	248	276	304	349	378	416	462	495	529	574	624
14		203	208	212	217	285	306	332	369	414	459	478	504	550	615
16		203	208	212	217	290	309	335	366	423	476	493	509	549	620
18		203	208	212	227	289	308	336	373	425	483	496	515	557	627
20		203	208	212	239	295	310	338	378	429	486	501	526	569	637
22		203	208	212	238	303	317	345	390	433	487	510	547	594	657
25		217	226	240	264	323	344	378	412	449	495	526	567	621	679
30		290	297	308	324	411	432	458	461	466	479	497	576	646	687
31		347	352	361	404	422	439	470	471	479	486	499	576	611	660

↓

		Umrechnung Luftmasse(Conversion Number of revolutions,Conversion quantitative)/mg/Hub Luft													
l/min mg/Hub		0	300	500	700	900	1100	1350	1550	1750	1950	2300	2600	2900	3000
0		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
8		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
9		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
10		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
14		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
16		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
18		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
20		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
22		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
25		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
30		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
31		980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980

Figura 70 - Alteração do valor de massa de ar de referência para o valor máximo do mapa

Analisando a resposta do veículo às alterações realizadas ao ralenti, verifica-se que o valor do *duty-cycle* aumentou consideravelmente, tanto no atuador da EGR Luft como no atuador da borboleta do coletor de admissão, conforme ilustrado na Figura 71. Ou seja, a borboleta do coletor de admissão abre mais para facilitar a entrada de ar, garantindo um maior volume de ar no cilindro e, conseqüentemente, a válvula EGR fecha o máximo possível. Observa-se também que, mesmo solicitando o valor máximo de massa de ar, o *duty-cycle* da válvula EGR não atinge os 100%, concluindo-se que, esta continua a ter um ciclo de trabalho e a tentar admitir gases de escape, por mais que seja em quantidades significativamente reduzidas.

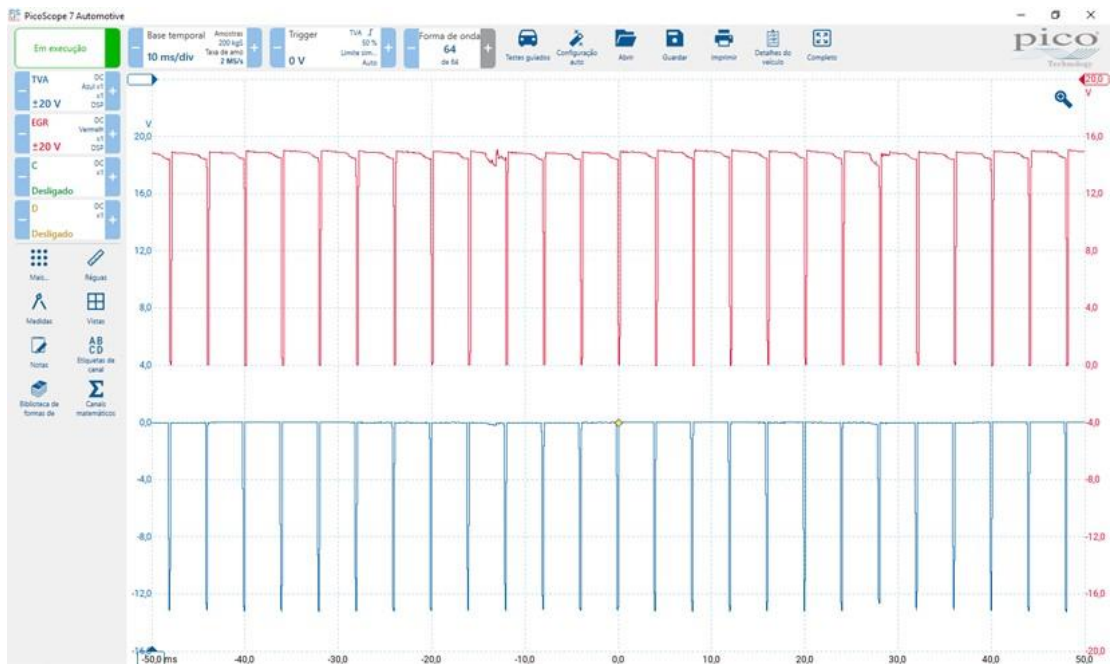


Figura 71 - Ciclo de trabalho da válvula EGR e da borboleta do coletor de admissão ao ralenti em função do valor máximo de massa de ar de referência do mapa

Para avaliar a influência da utilização da válvula EGR nos compostos provenientes do escape, foi instalado um analisador de gases (Sun® MGA 1500) e, de modo a garantir a precisão das leituras do equipamento, foi igualmente instalada uma sonda lambda no escape, como ilustrado na Figura 72.



Figura 72 – Instalação do analisador de gases e da sonda lambda no escape

A Figura 73 apresenta os valores obtidos na análise dos gases de escape em função das alterações realizadas ao mapa base de massa de ar de referência. As representações (a) e (b) mostram os valores obtidos com o veículo ao ralenti, sem qualquer alteração na calibração. As representações (c) e (d) mostram os valores obtidos com o veículo ao ralenti, mas com o mapa base de massa de ar de referência alterado para o valor máximo. Importa realçar que os valores de  $\lambda$  2 apresentados em (b) e (d) não têm qualquer significado, uma vez que esse canal de medição não está a ser utilizado. Iniciando a análise pelas representações (a) e (b), verifica-se que existe coerência entre os valores medidos de  $\lambda$ , constatando-se que os valores obtidos são realistas. Como o valor de  $\lambda$  adquirido no ensaio é significativamente superior a 1, apresentando-se em torno de 2,8, pode-se afirmar que a mistura é significativamente pobre, característica válida para veículos com motor de combustão interna a diesel, que funcionam com misturas com excesso de ar. Ao analisar a representação (d), verifica-se que o valor de  $\lambda$  aumentou consideravelmente, uma vez que a reutilização de gases de escape foi impedida, permitindo assim uma maior entrada de ar proveniente da atmosfera para o cilindro, aumentando a concentração de  $O_2$  no escape de 13,74 para 18,35%, reduzindo consequentemente a concentração de  $CO_2$ . A representação (c) não apresenta qualquer valor de  $\lambda$  devido a ter sido ultrapassado o limite superior de leitura da máquina deste parâmetro. A concentração de  $HC$  e  $CO$  verifica-se também mais elevada com a EGR em funcionamento, devido à necessidade de misturas um pouco mais ricas para que o carro mantenha um funcionamento estável e evitar uma queda de rotação que provoque o desligar do motor, conforme apresentado na literatura na Figura 15. Importa realçar que o estudo da concentração de  $HC$  e  $CO$  é mais relevante em veículos com motor de combustão a gasolina, uma vez que estes trabalham com misturas muito próximas da estequiométrica e a emissão destes compostos é mais evidente nessas condições, de acordo com a literatura apresentada na Figura 2. No estudo do sistema EGR, sendo a sua principal função a redução de  $NO_x$ , seria pertinente realizar uma análise das emissões deste composto em resposta às alterações efetuadas. No entanto, não foi possível realizar essa análise, uma vez que o equipamento utilizado não dispõe dessa funcionalidade.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 73 - Influência da utilização da EGR nas emissões ao ralenti com a calibração original (a) e (b) e com o mapa base de massa de ar de referência modificado (c) e (d)

O próximo ensaio, consiste em comprovar que o diagrama apresentado na Figura 51, é colocado em prática para calcular o valor pedido de massa de ar. Para isso, apresenta-se a Figura 74 com todas as correções e limitadores descritos.

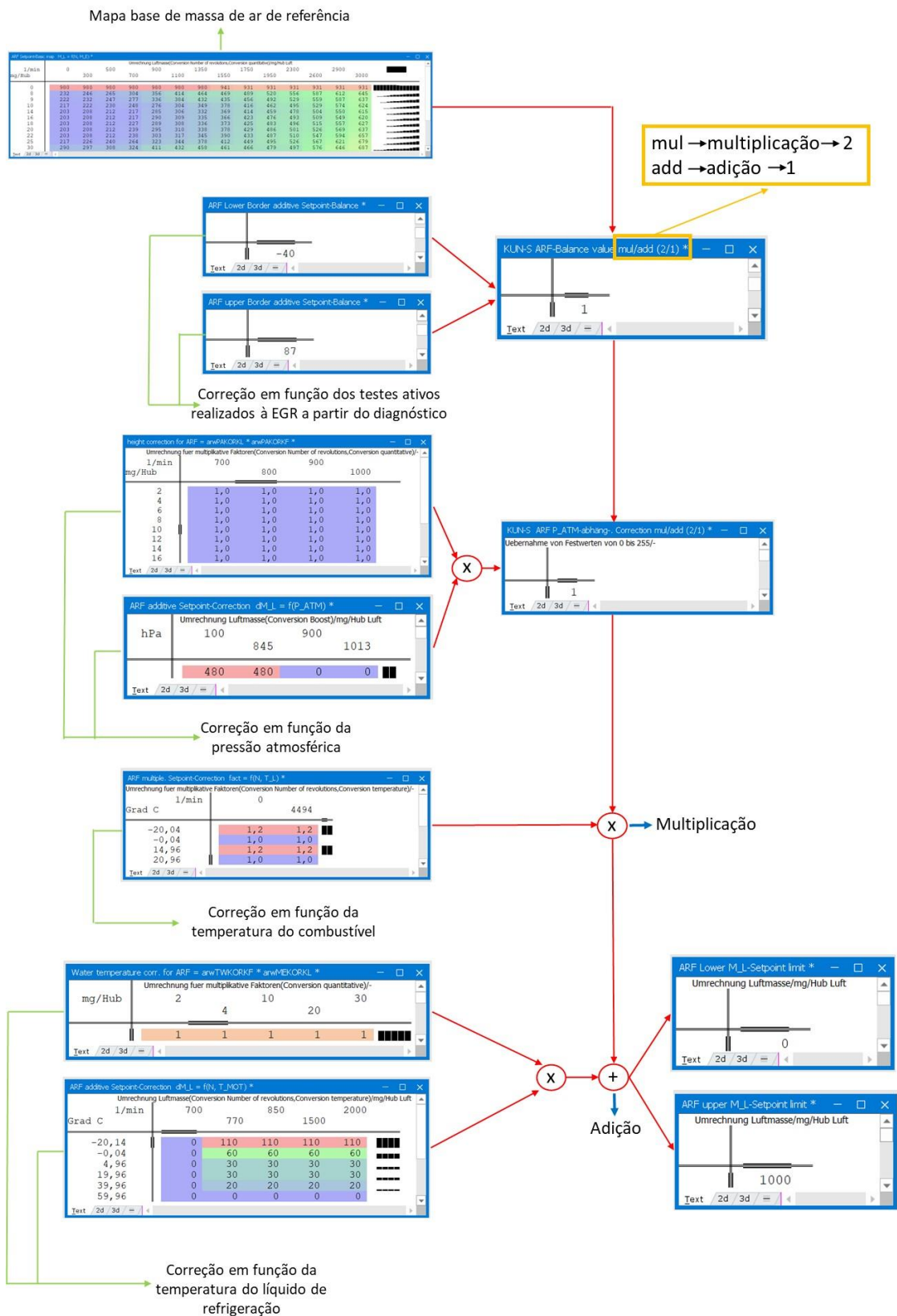


Figura 74 - Comprovação e apresentação do esquema da Figura 51 na calibração

O passo seguinte consiste em colocar o veículo em funcionamento ao ralenti e ajustar o mapa base de massa de ar para um valor de 350 miligramas por ciclo, conforme ilustrado na Figura 75. Este procedimento evita a interpolação de valores distintos, permitindo o cálculo simplificado do valor requerido de massa de ar.

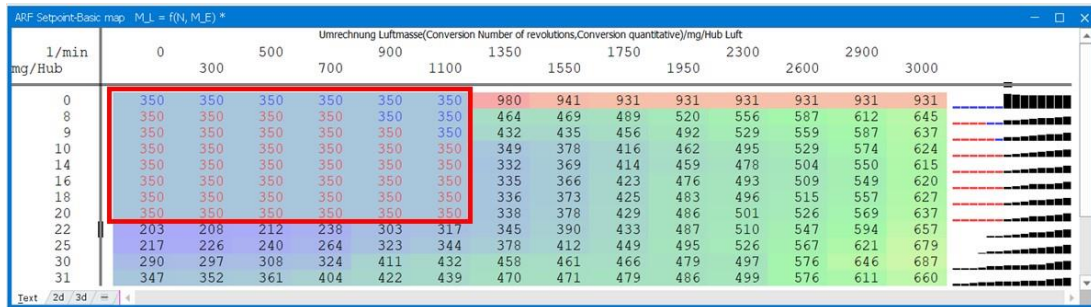


Figura 75 - Alteração do valor de massa de ar de referência para comprovação da gestão da calibração realizada pela BOSCH®

Como não está a ser realizado nenhum teste ativo a partir do diagnóstico à válvula EGR, a temperatura do líquido de refrigeração mantém-se nos valores normais de funcionamento, aproximadamente 90°C, e o combustível encontra-se a uma temperatura superior a 20°C devido ao facto dos testes serem realizados num dia típico de verão, com uma pressão atmosférica de cerca de 101,3kPa não é realizada nenhuma correção ao valor base de massa de ar. Por isso, para comprovar que as variáveis de cálculo mencionadas anteriormente estão corretas, foram realizadas duas alterações: no mapa de pressão atmosférica, foi solicitado um decréscimo de 100 miligramas de ar por ciclo, e no mapa de correção em função da temperatura do líquido de refrigeração do motor, foi solicitado um acréscimo de 50 miligramas de massa de ar por ciclo, conforme ilustrado na Figura 76. De notar que as alterações realizadas consistiram em valores arbitrados, definidos exclusivamente para comprovação do diagrama da Figura 51.

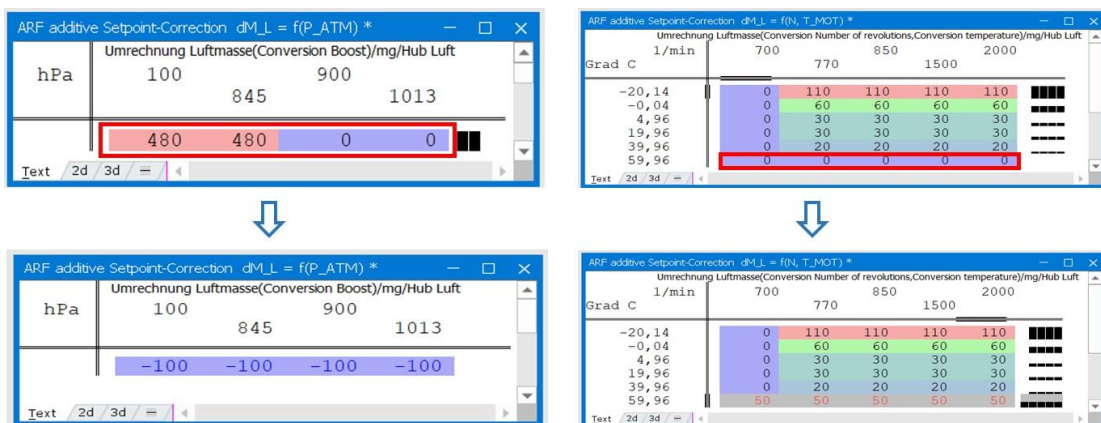


Figura 76 - Correções realizadas ao valor base de massa de ar em função da pressão atmosférica e da temperatura do líquido de refrigeração do motor

Ao calcular o valor da massa de ar de referência, determina-se, de acordo com a equação (11), o valor teórico da massa de ar que se pretende admitir no motor.

$$massa\_ar\_pedido = (350 + (-100 \times 1)) \times 1 + 50 \times 1 \quad (11)$$

$$massa\_ar\_pedido = 300 \text{ miligramas por ciclo}$$

Posteriormente, com o veículo em funcionamento ao ralenti, verifica-se, através dos parâmetros em tempo real da máquina de diagnóstico apresentados na Figura 77, que o valor solicitado de massa de ar é de 300 miligramas por ciclo. O valor medido, embora apresente variações constantes, está sempre a tentar ajustar-se ao valor solicitado, verificando assim que o diagrama da Figura 51, elaborado pela BOSCH®, está implementado com precisão na calibração da ECU do motor. Deve-se salientar que as unidades de medida, em miligramas por hora, apresentadas na máquina de diagnóstico estão incorretas.

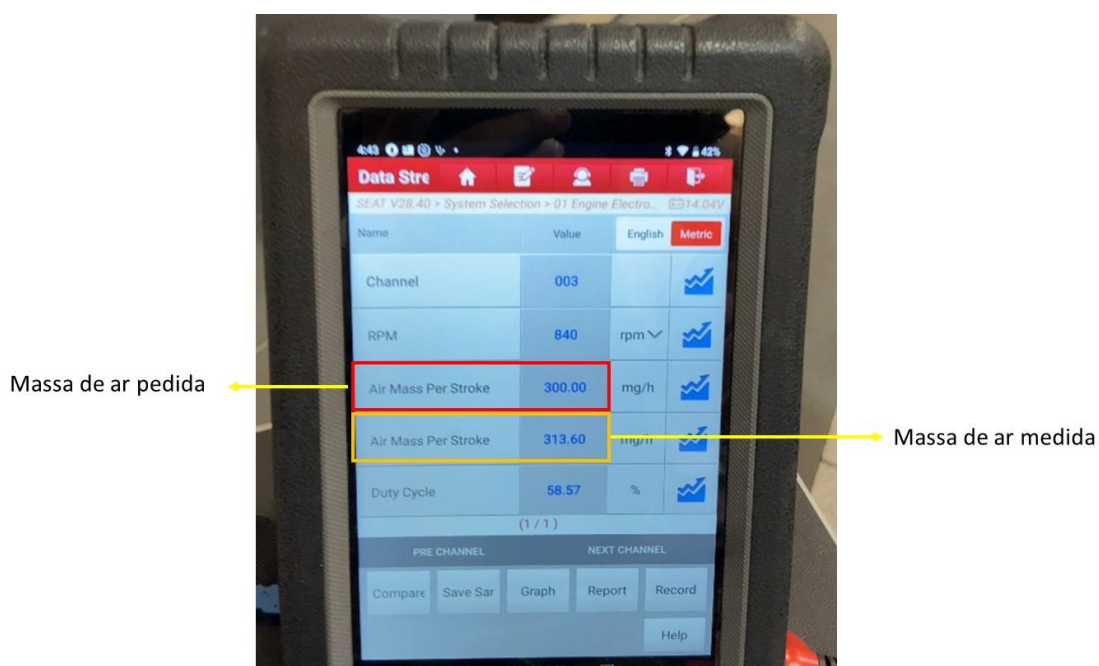


Figura 77 - Apresentação dos valores de massa de ar pedido e o respetivo valor de massa de ar medido visualizados na máquina de diagnóstico

#### 4.4. Reprogramação e Verificação Experimental da Calibração Apresentada no Sub-subcapítulo 3.3.4

O último estudo visa analisar a calibração correspondente aos dados apresentados na Figura 52. Para tal, foi induzido um erro ao desligar o tubo de vácuo que liga ao atuador da EGR e ao alterar o tempo mínimo de reconhecimento de anomalias pelo veículo. Assim, foram realizados dois testes: no primeiro, estabeleceu-se um tempo mínimo de 0 segundos; no segundo, definiu-se um tempo de 10 segundos, conforme ilustrado na Figura 78. A título de curiosidade, o fabricante estipula que, se um erro persistir por mais de 7 segundos, deve ser gerado um código de avaria e acionada a luz de aviso do motor.

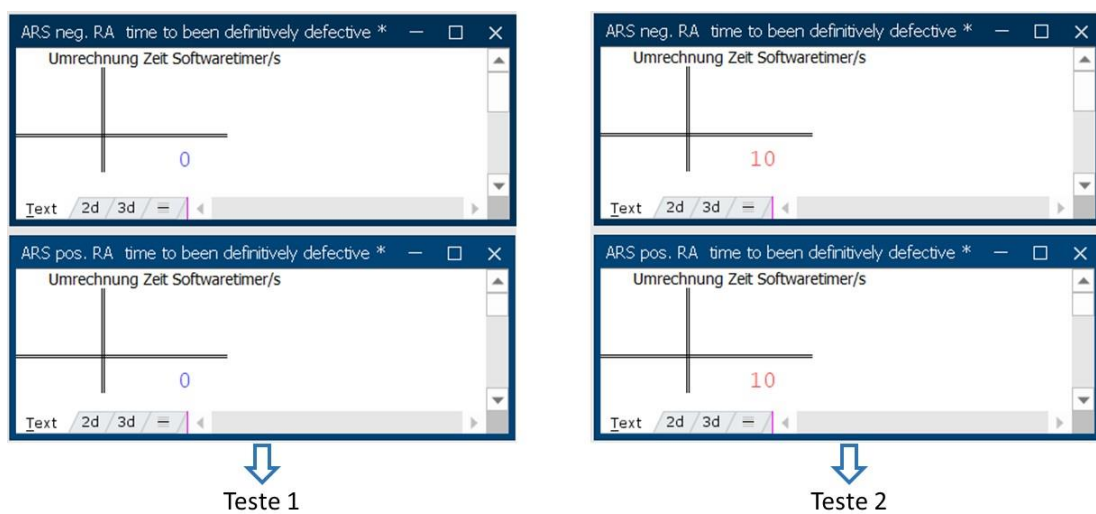


Figura 78 - Alteração do tempo mínimo para que o veículo reconheça que existe uma anomalia no sistema da EGR

Após a realização dos testes, verifica-se que o código de avaria 19586-*Exhaust gas recirculation (EGR) system Control limit exceeded surge* na máquina de diagnóstico exatamente após o tempo mínimo ter sido ultrapassado. Assim, pode concluir-se que, se for atribuído um valor de tempo tendente ao infinito, o sistema de EGR, mesmo que apresente algum tipo de erro, nunca o registará na máquina de diagnóstico e consequentemente nunca fará ligar a luz do motor. Dado que o estudo realizado se centra numa base temporal, não é possível apresentar os testes realizados neste documento; no entanto, estes serão demonstrados durante a apresentação da Dissertação.

## 5. Conclusão

O presente capítulo destina-se a apresentar as principais conclusões do trabalho de Dissertação realizada, consolidando o conhecimento obtido e destacando as contribuições teóricas e práticas do estudo. Além disso, serão analisadas as limitações do trabalho e apresentadas sugestões para investigações futuras.

### 5.1. Conclusões finais

A unidade de controlo EDC15P+ utilizada no desenvolvimento prático desta Dissertação dispõe de três modos de leitura e escrita, sendo o método *bench* o mais recomendado, por ser mais seguro e por permitir a leitura completa da informação de todas as memórias.

Para adquirir a informação, dados e mapas da ECU é necessária a utilização de equipamentos e *software* adequados, sendo que neste trabalho foi utilizado o *software* MPPS.

Para realizar a leitura da ECU, é essencial identificar o tipo de unidade de controlo utilizada, o que pode ser feito através da análise das informações presentes na sua carcaça. As informações mais relevantes incluem o número de referência da BOSCH®, que permite identificar o modelo da ECU e verificar a compatibilidade com outras unidades que, apesar de terem uma referência BOSCH® diferente, mantêm o mesmo *hardware*. Essa compatibilidade possibilita, por exemplo, a realização de processos de clonagem sem comprometer o correto funcionamento do veículo. O número de *software* completado com a versão do *software* apresentada na calibração são igualmente importantes, facilitando a verificação da originalidade da calibração.

A ECU possui três componentes principais: o processador, a memória FLASH e a EEPROM. Nesta Dissertação, dá-se ênfase à memória FLASH, que contém o mapeamento realizado pelo fabricante para o funcionamento do motor, e à EEPROM, onde são registados os códigos de avaria e programado o número de chassis, o qual deve, obrigatoriamente, coincidir com o número de chassis do veículo para que seja autorizado o arranque do motor.

O controlo do sistema EGR, conforme programado na memória FLASH, é realizado segundo o fabricante em cinco etapas distintas: medição do valor real de massa de ar; cálculo do valor de referência da massa de ar; controlo paralelo; regulador; monitorização do sistema com eventual desativação (fecho da válvula de recirculação). O funcionamento do sistema EGR baseia-se num valor de massa de ar de referência que se pretende admitir no motor, que é alcançado com a regulação da borboleta principal do coletor de admissão e da recirculação dos gases de escape. O medidor de massa de ar realiza a leitura do valor real a ser admitido para o motor e de seguida o sistema é monitorizado para garantir que o mesmo está a funcionar corretamente. Embora o

fabricante BOSCH® tenha implementado a etapa de controlo paralelo para corrigir o valor de referência da massa de ar, o fabricante do veículo optou por realizar essas correções diretamente na etapa de cálculo do valor de referência, tornando a etapa de controlo paralelo desnecessária.

Importa destacar que um dos indicadores mais importantes para o controlo da válvula EGR, no tipo de ECU em estudo, é o valor de massa de ar de referência, salientando-se que durante este trabalho foram analisadas diferentes unidades de controlo e que o controlo do sistema não é realizado exatamente da mesma forma.

A desativação do sistema EGR pode ser realizada por três motivos distintos: durante a fase de arranque a frio do motor, em função da quantidade de combustível de referência, e devido ao pedido de pressão do turbo.

O permutador da EGR equipado no veículo em estudo é também desativado para promover um aquecimento mais rápido do motor, permitindo que atinja rapidamente a sua temperatura normal de funcionamento, onde apresenta um rendimento mais elevado. Adicionalmente, a desativação é benéfica para valores baixos de massa de ar, pois, em baixas cargas, ajuda a manter a temperatura de combustão adequada, promovendo uma maior eficiência térmica.

Todo o processo de visualização e alteração de mapas e parâmetros de uma ECU só é possível com um *software* apropriado. Para este trabalho, foi utilizado o WinOLS®, que permitiu identificar todos os mapas, com especial atenção os que são relevantes para este estudo. Este *software* possui funcionalidades essenciais para esta tarefa, permitindo a visualização da calibração em formato de numeração hexadecimal, em formato de mapa 2D e em formato de gráfico 3D. A opção mais adequada para o mapeamento pode ser escolhida conforme a necessidade, sendo que o formato 2D se destaca por ser o mais intuitivo e fácil de interpretar.

Para verificar a calibração e reprogramar a ECU, é essencial utilizar um ficheiro *Damos* sobreposto à calibração no WinOLS®, que fornece a identificação detalhada de todos os mapas. A unidade em estudo contém um total de 5194 mapas, o que torna a tarefa de análise e ajustes extremamente complexa sem uma base de dados adequada. O ficheiro *Damos* é, portanto, crucial para a correta realização do estudo do sistema de EGR.

Como a análise ao sistema da EGR foi realizado em banco de ensaio, para facilitar o processo de reprogramação da ECU através do *software* WinOLS®, utilizou-se o emulador da FLASH OLS 300 que permitiu converter a ECU numa unidade de controlo reprogramável, tornando o processo mais eficiente.

Para avaliar a influência da utilização da EGR, o mapa base de referência de ar deve ser ajustado (alterado) para o seu valor máximo, de modo a manter a EGR fechada. No entanto, ao utilizar o osciloscópio, verificou-se que o atuador da válvula EGR continua a apresentar um ciclo de trabalho, embora relativamente baixo, mas tentando manter o sistema em funcionamento.

Nestas condições, válvula EGR fechada e motor ao *ralenti*, pode verificar-se que a concentração de  $O_2$  aumenta substancialmente nos gases de escape, e conseqüentemente há uma diminuição da concentração de  $CO_2$ . A concentração de  $CO$  e de  $HC$  também diminui, uma vez que, com a redução da presença de gases de escape na admissão, não é necessário injetar um

pouco mais de combustível para garantir um funcionamento estável do veículo e evitar uma queda de rotação que provoque o desligar do motor.

Verificou-se também que todas as correções apresentadas no diagrama de referência de massa de ar são efetivamente aplicadas. Isto é evidenciado pelo facto de todas essas correções estarem refletidas na calibração apresentada e visualizadas através *software* WinOLS®. De seguida, foi realizado um exemplo prático em que o cálculo analítico do valor de massa de ar a admitir no motor correspondeu exatamente ao valor solicitado na máquina de diagnóstico, verificando-se também que o valor de massa de ar medido manteve-se consistentemente próximo do valor pedido.

Reiterando o que foi anteriormente anunciado, pode afirmar-se que a gestão da EGR utilizada pelo fabricante BOSCH® na unidade de controlo EDC15P+ foi analisada e operada com sucesso, uma vez que o veículo comportou-se como o esperado face às alterações realizadas.

## 5.2. Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros, seria interessante analisar o funcionamento do sistema de EGR em motores a gasolina, com o objetivo de verificar as diferenças em relação aos sistemas utilizados em motores a diesel.

O desenvolvimento deste trabalho foi centrado nas unidades de controlo da marca BOSCH® e de como esta marca gere o funcionamento da válvula EGR. Seria muito interessante verificar e estudar o modo de funcionamento da válvula EGR por outros fabricantes de centralinas, nomeadamente SIEMENS®, MAGNETI MARELLI®, DENSO®, DELPHI®, HITACHI®, KEIHIN®, e comparar as diferentes estratégias de controle.

Dado que os sistemas de controlo de emissões estão em constante evolução, seria igualmente pertinente realizar, em estudos futuros, uma análise à gestão dos sistemas de filtro de partículas e de redução catalítica seletiva, tendo em consideração as especificidades do fabricante. Estes sistemas são cada vez mais complexos e rigorosos, e a sua análise proporcionaria um conhecimento adicional significativa.

## 5.3. Limitações e Apreciação Global

Este subcapítulo foi realizado com o auxílio de uma análise SWOT. A análise SWOT abrange quatro elementos fundamentais: *Strengths* (Forças): referem-se aos pontos fortes ou vantagens internas, neste caso, relacionados com a execução da Dissertação, que podem ser explorados para alcançar os objetivos propostos; *Weaknesses* (Fraquezas): correspondem aos pontos fracos internos que podem dificultar o sucesso na concretização da Dissertação; *Opportunities* (Oportunidades): dizem respeito a fatores externos que podem ser aproveitados para potenciar o crescimento ou a melhoria do trabalho desenvolvido; por fim, *Threats* (Ameaças): representam fatores externos que podem colocar a realização da Dissertação em risco.

Começando pelos pontos fortes: integração de conceitos adquiridos ao longo do percurso académico num sistema de controlo de emissões poluentes, que está em constante evolução

devido às crescentes preocupações ambientais; análise detalhada do sistema em estudo, com a possibilidade de verificar, tanto na teoria como na prática, a gestão implementada pelo fabricante, uma vez que se trata de informação exclusiva; apresentar as principais características de uma unidade de controlo do motor, demonstrando as diferentes formas de aceder à informação nela contida; e ainda, a oportunidade de trabalhar com diferentes sistemas e equipamentos.

Pontos fracos: falta de literacia; dificuldade de leitura dos manuais relativos à calibração utilizada pelo fabricante, não apenas por estarem em alemão, mas também por incluírem caracterizações técnicas específicas da marca que, em alguns casos, não se encontram devidamente explicadas nos documentos; limitação de tempo acrescida para a realização da Dissertação devido à condição de trabalhador-estudante; dificuldade em comparar resultados com trabalhos semelhantes, uma vez que se trata de um tema pouco explorado.

Oportunidades: Aquisição de novos conhecimentos; estabelecer contacto com profissionais da área em estudo; e a possibilidade de utilizar um analisador de gases para medir as emissões de  $NO_x$ , dado que este é um fator crucial na avaliação do sistema EGR.

Ameaças: Dificuldade de monitorização em ambiente controlado, dado que a complexidade de replicar as condições reais de condução pode dificultar a verificação exata da gestão da EGR, uma vez que o comportamento do sistema pode variar substancialmente em função de vários fatores, como por exemplo as condições ambientais.

## 6. Referências

- [1] L. Briant, "Rudolf Diesel and His Rational Engine," SCIENTIFIC AMERICAN, INC, 1969, p. 10.
- [2] Encyclopedia Britannica, p.725, Londres: Encyclopedia Britannica, INC., 1980.
- [3] V. K. Megavath, V. B. Alur, C. R. Reddy, A. Pandian, B. Mohit, M. Z. Hossam e K. Salah, "Investigation of the combustion of exhaust gas recirculation in diesel engines with a particulate filter and selective catalytic reactor technologies for environmental gas reduction," p. 13, 17 Novembro 2022.
- [4] J. Martins, Motores de Combustão Interna, Publindústria, 2006.
- [5] "Euro Standards," ACEA-Driving Mobility for Europe, 13 Janeiro 2014. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/fact/euro-standards/>.
- [6] "REGULAMENTO (UE) N.o 459/2012 da Comissão de 29 de Maio de 2012 que altera o Regulamento (CE) n.o 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho e o Regulamento (CE) n.o 692/2008 da Comissão no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros," *Jornal Oficial da União Europeia*, p. 9, 2012.
- [7] "Proposta de regulamento do Parlamento Europeu e do conselho relativo à homologação de veículos a motor e motores e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a esses veículos, no que respeita às suas emissões e à durabilidade da bateria," em *Parlamento Europeu e do Conselho*, Bruxelas, 2022.
- [8] "WLTP FACTS," ACEA-European Automobile Manufacturers Association, 25 Abril 2017. [Online]. Available: <https://www.wltpfacts.eu/>. [Acedido em 18 11 2023].
- [9] "REGULAMENTO (UE) 2017/1151," *Jornal Oficial da União Europeia*, p. 643, 2017.
- [10] A.-A. Carlos, B. . Guilherme e B. R. Carlos, Diesel Fuel-Injection Systems Unit injector System and Unit Pump System, Estugarda, Alemanha: Robert Bosch GmbH, 2006.
- [11] R. Thorsten, Michael, Durst e O. S. Jens, Emissions-Control Technology for Diesel Engines, Alemanha: Robert Bosch GmbH, 2005.
- [12] *Emission Control Systems- Technician's Handbook*, Japão: Toyota, 1986.
- [13] A.-H. Kakaee, B. Partovi, A. Paykani e A. Nasiri-Toosi, "Effects of piston bowl geometry on combustion and emissions characteristics of a natural gas/diesel rcci engine," p. 35, 30 Março 2016.
- [14] R. Sener, M. R. Ozdemir e M. U. Yangaz, "Influence of piston bowl geometry on combustion and emission characteristics," p. 12, 10 Maio 2019.
- [15] *1.9-ltr. TDI Engine with Pump Injection System Design and Fuction*, Wolfsburg: Audi Self-Study Programme 209, 1998.
- [16] B. Liu, F. Zhang, C. Zhao, X. An e H. Pei, "A novel lambda-based EGR (exhaust gas recirculation) modulation method for a turbocharged diesel engine under transient operation," p. 10, 19 Dezembro 2015.
- [17] B. E. Milton, "Control Technologies in Spark-Ignition Engines," Sydney, Austrália, Academic Press, 1998, p. 70.
- [18] PEUGEOT-Media, *Tudo o que deve saber sobre escape e filtro de partículas*, Consultado em 11/12/2023: Disponível em: <https://media.peugeot.pt/file/28/3/guia-peugeot-escape.331283.pdf>, 2016.

- [19] S. M. Farhan e P. Wang, “Post-injection strategies for performance improvement and emissions reduction in DI diesel engines—A review,” p. 22, 25 Dezembro 2021.
- [20] R. Yong, H. Tiexiong, Z. Mingchao, J. Si e Z. Yuanxian, “DPF Soot Loading Estimation Strategy Based on Pressure Difference,” p. 3, 8 Novembro 2018.
- [21] M. H. Ronald e J. F. Robert, *Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology*, John Wiley & Sons, 2002.
- [22] “Sondas Lambda,” *Bosch*, p. 109, 2020.
- [23] *Lambda sensors Quick and easy testing and replacement*, Karlsruhe, Alemanha: Robert Bosch GmbH, 2018.
- [24] S. Anna, B. Matthias, V. R. Ilia, N. Kaushal, S. Amsini, D. Andreas, H. Jeanette e W. Steven, *Experimental Investigation of AdBlue Film Formation in a Generic SCR Test Bench and Numerical Analysis Using LES*, Basel, Suíça: applied sciences, 2021, p. 19.
- [25] “AdBlue,” em *Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)*, Berlim, Alemanha, DANGEROUS. Berlim, 2013, p. 13.
- [26] “All about AdBlue,” em *TotalEnergies Marketing Services*, Nanterre, França, 2022.
- [27] “AdBlue-Technical Leaflet,” BASF-The Chemical Company, 2006. [Online]. Available: <https://www.bisbeykimya.com.tr/wp-content/uploads/2018/07/AdBlue.pdf>.
- [28] “Manual de instruções Passat, Passat Variant,” em *Volkswagen AG*, Alemanha, 2015.
- [29] Z. Na, S. Wenpo, L. Zhihua, Z. Yan, L. Kuo e H. Hong, *A superior Fe-V-Ti catalyst with high activity and SO<sub>2</sub> resistance for the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub>*, *Journal of Hazardous Materials*, 2019.
- [30] K. Lulu, L. Diming, Z. Yunhua, F. Liang e L. Chagen, “Research on cross sensitivity of NO<sub>x</sub> sensor and Adblue injection volume in accordance with the actual situation based on cubature Kalman filter,” p. 21, 5 Agosto 2023.
- [31] R. B. GmbH, *Funktionsbeschreibung EDC15+*, Alemanha, 2000.

## **Declaração de Integridade**

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade.

Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Por isso, o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 2 de outubro de 2024