



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

ANÁLISE DO IMPACTO DE ESTRATÉGIAS DE VVT NO TORQUE DE UM MOTOR 1.0 TURBO PARA DESEMPENHO EM CONDIÇÕES DE INCLINAÇÃO E ALTA TEMPERATURA

FELIPE ALBERTO GONÇALVES CRUZ

Trabalho de graduação apresentado na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira para conclusão do curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Elóy Esteves Gasparin

Coorientador: Gabriel Coelho Rodrigues Alvares

FELIPE ALBERTO GONÇALVES CRUZ

**ANÁLISE DO IMPACTO DE ESTRATÉGIAS DE VVT NO
TORQUE DE UM MOTOR 1.0 TURBO PARA
DESEMPENHO EM CONDIÇÕES DE INCLINAÇÃO E
ALTA TEMPERATURA**

(Versão Corrigida)

Trabalho de graduação apresentado na Faculdade
de Engenharia de Ilha Solteira para conclusão do
curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Elóy Esteves Gasparin

Gabriel Coelho Rodrigues Alvares

Ilha Solteira

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C957a Cruz, Felipe Alberto Gonçalves.
Análise do impacto de estratégias de VVT no torque de um motor 1.0 turbo para desempenho em condições de inclinação e alta temperatura / Felipe Alberto Gonçalves Cruz. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
39 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Elóy Esteves Gasparin

Coorientador: Gabriel Coelho Rodrigues Alvares

Inclui bibliografia

1. Engine downsizing. 2. VVT. 3. Cruzamento de válvulas.

Dedico este trabalho ao meu primo Gustavo, a quem desejo toda a felicidade e amor do mundo.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui, meus agradecimentos aos meus orientadores, Elóy Gasparin e Gabriel Coelho pela atenção e por terem me orientado no caminho que fez este trabalho se tornar realidade. Agradeço à empresa que propiciou este estudo, por ter me dado a oportunidade de trabalhar com temas tão interessantes e desafiadores. Agradeço ao meu mentor Halysson Weck, pela paciência e por acreditar em mim, assim, me mostrar o caminho para ser um engenheiro melhor e mais comprometido. Agradeço aos meus pais Lilian Mary Gonçalves e Emerson Flamarion da Cruz pela constante fonte de amor imensurável, suporte e inspiração, sendo exemplos vivos de que, em meio aos desafios da vida, acreditar em si mesmo e seguir adiante é a chave para fazer o impossível. O Caminho que eles trilham ilumina a minha jornada. Agradeço à minha avó, minha querida revisora e uma das pessoas mais incríveis que eu conheço, cujo as provocações, semdúvida, fazem e fizeram vicejar muito a busca pelo saber. Agradeço à Nadia Fonseca, pelo carinho, amor e suporte, sem os quais a jornada da graduação teria sido mais árdua. Um agradecimento à equipe Fênix Racing, sem a qual eu não teria me desenvolvido e aprendido tanto no universo da engenharia. E, enfim, um agradecimento à República CMJ, que foi e sempre será a minha casa e o ambiente onde posso retornar ao lado de irmãos que levo em mim para o resto da vida.

“I dream. Sometimes I think that’s the only right thing to do.”
(Haruki Murakami)

RESUMO

Com o crescente rigor das legislações de emissões, o *Engine Downsizing* surge como uma solução tecnológica inovadora, mas traz consigo a pergunta "como reduzir o tamanho de um motor e ainda sim garantir que seu desempenho se mantenha?". Esse desafio torna-se ainda mais crítico em condições de operações adversas, como altas temperaturas e aclives acentuados. Entre as soluções possíveis, destaca-se o uso da variação do tempo de abertura e fechamento por meio de um VVT. Este estudo investigou a aplicação das técnicas Abertura Antecipada da Válvula de Admissão (AAVA) e Fechamento Tardio da Válvula de Escape (FTVE) em um motor downsized 1.0 turbo, operando em baixa rotação sob temperaturas no coletor de admissão acima de 60°C e inclinações superiores a 20%. Desenvolveu-se uma funcionalidade no software embarcado do veículo, que identifica situações críticas de decolagem e aplica automaticamente uma configuração específica de VVT, retornando à configuração nominal após a superação das condições adversas. Foram realizados um ensaio de princípio e um ensaio de validação, que mostraram a viabilidade de soluções baseadas em VVT para aprimorar motores compactos em situações extremas.

Palavras-chave: *Engine Downsizing*, Condições Adversas, Software Embarcado, VVT, Cruzamento de Válvulas.

ABSTRACT

With the increasing stringency of emissions legislation, *Engine Downsizing* has emerged as an innovative technological solution, but it brings with it the question “how do you reduce the size of an engine and still ensure that its performance is maintained?”. This challenge becomes even more critical in adverse operating conditions, such as high temperatures and steep slopes. Among the possible solutions is the use of opening and closing time variation by means of a VVT. This study investigated the application of Early Intake Valve Opening (EIVO) and Late Exhaust Valve Close (LEVC) techniques to a downsized 1.0 turbo engine, operating at low rpm under intake manifold temperatures above 60°C and inclines of more than 20%. A feature was developed in the vehicle’s on-board software which identifies critical take-off situations and automatically applies a specific VVT setting, returning to the nominal setting once the adverse conditions have been overcome. A principle test and a validation test were carried out, which showed the feasibility of VVT-based solutions to improve compact engines in extreme situations.

Keywords: Engine Downsizing, Adverse Conditions, Embedded Software, VVT, Valve overlap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Levante, Tempo e Duração de Válvula	13
Figura 2 – Exemplo de esquemas de sistemas acionados por came	13
Figura 3 – Funcionamento do VVT	15
Figura 4 – Efeito da Aplicação da Sobreposição de Válvulas em um motor de combustão interna.	16
Figura 5 – Fluxo de trabalho	19
Figura 6 – Função Global da aplicação do software	20
Figura 7 – Perfil das Válvulas do Motor Estudado	21
Figura 8 – Curvas de torque normalizados para diferentes configurações de VVT	22
Figura 9 – Aplicação de AAVA e FTVE	23
Figura 10 – ES592	24
Figura 11 – Esquema de Instrumentação	24
Figura 12 – INCA V 7.2	24
Figura 13 – Measured Data Analyser V8.6	25
Figura 14 – Fluxograma do Ensaio de Princípio	26
Figura 15 – Fluxograma do Ensaio de Validação	27
Figura 16 – Ensaio de Princípio - VVT das Válvulas de Admissão	32
Figura 17 – Ensaio de Princípio - VVT das válvulas de Escape	32
Figura 18 – Comparativo de Pressão no Coletor de Admissão para diferentes condições de ensaio	36
Figura 19 – Comparativo de Torque Normalizado para diferentes condições de ensaio.	37
Figura 20 – Comparativo de Velocidade desenvolvida para diferentes condições de ensaio.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações das VVTs referentes às válvulas de admissão e escape	21
Tabela 2 – Valores de torque normalizados para diferentes configurações de VVT.	22
Tabela 3 – Variáveis adquiridas no Ensaio de Princípio	26
Tabela 4 – Variáveis adquiridas no Ensaio de Validação	28
Tabela 5 – Parâmetros iniciais do Ensaio de Princípio	31
Tabela 6 – Parâmetros Gerais Médios de Operação	33
Tabela 7 – Tempo de Atuação da Estratégia para Diferentes Condições de Rotação e MAT	33
Tabela 8 – Organização dos dados de Lambda, MAP, Velocidade e Porcentagem de Torque	34
Tabela 9 – Tabela de p-valores para diferentes variáveis e condições de ensaio	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	12
2	OBJETIVOS	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	Apresentação do Problema	19
3.2	Implementação da Nova Estratégia de VVT	20
3.2.1	Modificação do Software	20
3.2.2	Definição da Configuração de VVT	20
3.2.3	Aplicação da Configuração Específica	23
3.3	Ensaio de Princípio	25
3.4	Ensaio de Validação	27
3.5	Análise dos Resultados	28
3.5.1	Consolidação dos Dados	28
3.5.2	Análise Estatística	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Ensaio de Princípio	31
4.2	Ensaio de Validação	33
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Com o aumento das preocupações globais em relação às emissões de poluentes e ao aquecimento global, as regulamentações de emissões têm se tornado cada vez mais rigorosas, na América do Sul isso não é uma exceção (JOHNSON, 2016; CE, 2014; IBAMA, 2022; NAMAR et al., 2021). Essa movimentação tem colocado uma grande pressão sobre as empresas do setor automotivo para que desenvolvam veículos capazes de atender a esses novos regulamentos. Em outras palavras, é necessário desenvolver veículos energeticamente eficientes que estejam em conformidade com as leis de emissões vigentes. Nesse contexto, para atingir esse objetivo, são consideradas como técnicas eficientes o aprimoramento da tecnologia embarcada dos veículos, o desenvolvimento de combustíveis mais limpos e a redução do tamanho do motor. A última técnica é conhecida como *Engine Downsizing* (NAMAR et al., 2021; DHINGRA; DAS, 2014; JOSHI, 2019).

Engine Downsizing tem atraído grande interesse recentemente, especialmente após um documento liberado pela International Energy Agency (IEA) em 2011, que estabeleceu como alvo uma redução de 50% na média global de emissões até 2030 (NAMAR et al., 2021; IBAMA, 2022; CE, 2014; JOHNSON, 2016). Em termos gerais, *Engine Downsizing* envolve diminuir o tamanho do motor (o volume deslocado, a cilindrada) enquanto se mantêm as mesmas características de desempenho, como torque e potência, motivo pelo qual os motores de três cilindros vêm se tornando cada vez mais populares (NAMAR et al., 2021; JOSHI, 2019). Dessa ideia, contudo, surge a pergunta: "Como reduzir o tamanho de um motor e, ainda sim, garantir que seu desempenho se mantenha o mesmo?" (FRASER et al., 2009; NAMAR et al., 2021).

Essa questão abre portas para diversas áreas de pesquisa. Os estudos de Namar et al. (2021) e Police et al. (2006) propõem que as áreas que podemos destacar como as mais populares são: a implementação de sistemas turbocompressores; o estudo e aplicação de diferentes combustíveis, seja etanol, gasolina, glp e aditivos na busca por desempenho; estratégias de injeção de combustível fazendo uma avaliação cerca as injeções do tipo direta (DI) ou na porta (PFI); o estudo de outros tipos de ciclo-motor como o ciclo Miller e Atkinson; e, avaliações de desempenho no emprego da recirculação de gases de escape (EGR). Ainda, segundo Namar et al. (2021), outros estudos são desenvolvidos, tal como o emprego de sistemas de comando de válvulas, para controle de emissionamento e desempenho.

A principal função dos sistemas de comando de válvulas consiste em controlar as trocas gasosas que ocorrem dentro da câmara de combustão ao longo de um ciclo via válvulas de admissão e escape (BOSCH, 2011). Uma vez que o funcionamento de um motor de combustão interna se fundamenta nos processos termodinâmicos pelos quais a mistura ar-combustível passa, o modo com o qual as válvulas se comportam ganha importante papel em como o motor se comportará (BLAIR, 1999; HEYWOOD, 1988). Logo, em sistemas de atuação de válvulas, três conceitos são definidos: levante de válvula, tempo de válvula e duração de válvula, conforme segue Figura 1. Levante de válvula refere-se à amplitude do perfil de abertura da válvula, isto é, o quanto

a válvula se desloca a partir de seu ponto de repouso. Tempo, ou fase, de válvula é definido pelos ângulos de virabrequim em que ocorrem a abertura e fechamento da válvula. Duração de válvula é definido como o período angular em que a válvula permanecerá aberta (LOU; ZHU, 2020; BOSCH, 2011).

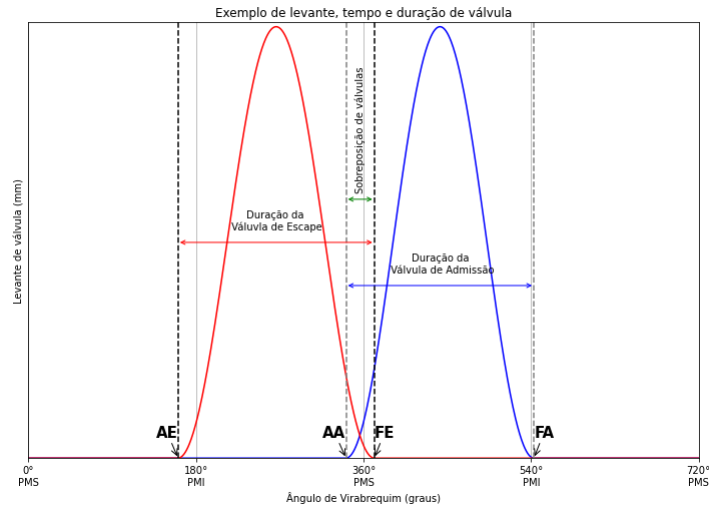


Figura 1 – Exemplo de Levante, Tempo e Duração de Válvula

Fonte: Adaptado de: (LOU; ZHU, 2020)

Os sistemas de atuação de válvula são classificados em dois grandes grupos: sistemas acionados por came, conforme a Figura 2 exemplifica, que utilizam um eixo de comando para atuar sob o levante das válvulas. E, sistemas sem came, que vão utilizar sistemas hidrodinâmicos, pneumáticos ou eletromagnéticos para atuar sobre o levante da válvula (BOSCH, 2011; LOU; ZHU, 2020). Os sistemas acionados por came são amplamente utilizados na produção de motores modernos. Entre os principais tipos de sistemas se encontram: VVT (*Variable Valve timing*), VVD (*Variable Valve Duration*), VVL (*Variable Valve Lift*) e VVA (*Variable Valve Actuation*) (LOU; ZHU, 2020).

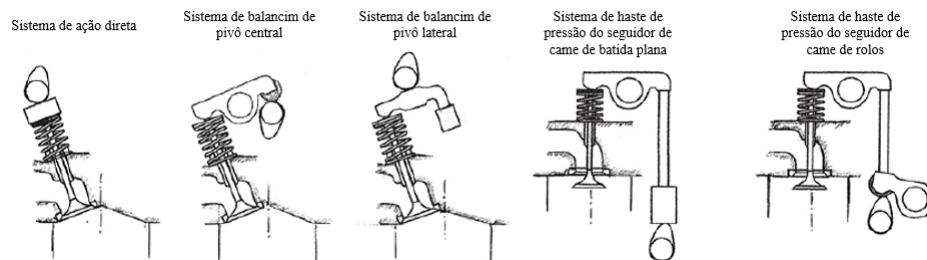


Figura 2 – Exemplo de esquemas de sistemas acionados por came

Fonte: Adaptado de: (HEYWOOD, 1988)

O VVT consiste em um sistema de atuação de válvulas na qual o tempo de válvula é controlado independentemente do levante e da duração, que permanecem os mesmos, a Figura 3 ilustra seu funcionamento (BOSCH, 2011; HEYWOOD, 1988; LOU; ZHU, 2020). O VVT tem sido empregado em campos como: redução de perdas por bombeamento, otimização do

consumo de combustível, otimização da eficiência volumétrica e da mistura ar-combustível dentro do cilindro e aumento de desempenho (LOU; ZHU, 2020; BONATESTA et al., 2016; OSORIO; RIVERA-ALVAREZ, 2018; BELLIS, 2016). Para cada um desses campos pode-se explorar diferentes abordagens de atraso e antecipação da abertura e fechamento das válvulas de escape e admissão, sendo elas: Abertura Antecipada da Válvula de Admissão (AAVA), Fechamento Antecipado da Válvula de Admissão (FAVA), Abertura Tardia da Válvula de Admissão (ATVA), Fechamento Tardio da Válvula de Admissão (FTVA) Abertura Antecipada da Válvula de Escape (AAVE), Fechamento Antecipado da Válvula de Escape (FAVE), Abertura Tardia da Válvula de Escape (ATVE), Fechamento Tardio da Válvula de Escape (FTVE) (PARVATE-PATIL; HONG; GORDON, 2003). O uso dessas técnicas pode ser concomitante, aspirando a diferentes resultados (HONG; PARVATE-PATIL; GORDON, 2004).

O uso da AAVA busca abrir a válvula logo antes do fim do evento de exaustão, quando comparada com a abertura nominal, o que aumenta o período de sobreposição de válvulas, uma vez que nesse ponto a válvula de escape ainda estará aberta (PARVATE-PATIL; HONG; GORDON, 2003). Nesse caso em cargas parciais haverá um fluxo contrário dos gases de escape para dentro do cilindro, resultando em uma ocupação do volume do cilindro por gases inertes, que terá como efeito a redução das perdas por bombeamento e diminuirá a temperatura dentro do cilindro e assim a formação de poluentes como o NOx. Ainda, o eventual fechamento adiantado, em baixas rotações, ira reduzir o refluxo de massa de ar fresca do cilindro para o coletor de admissão o que aumenta a eficiência de retenção de massa fresca no motor.(HONG; PARVATE-PATIL; GORDON, 2004; BLAIR, 1999; OSORIO; RIVERA-ALVAREZ, 2018; BONATESTA et al., 2016). Contudo, em plena carga a sobreposição de válvulas propicia um aumento da eficiência volumétrica, uma vez que o gradiente de pressão, durante o período entre o fim da exaustão e início da admissão, tem sentido admissão/escape; dessa forma, a massa de ar fresca efetua uma "limpeza" conhecida como *scavenging*, empurrando os gases residuais para fora do cilindro e aumentando a disponibilidade de massa fresca para a próxima combustão e, portanto, aumenta o desempenho do motor (BLAIR, 1999; OSORIO; RIVERA-ALVAREZ, 2018). O uso do FTVE tem efeito isoladamente semelhante ao AAVA; Em baixas rotações é possível que os gases não tenham energia cinética o suficiente para desempenhar o scavenging, contudo, ao abrir tardiamente a válvula de escape o evento da descompressão rápida ocorre tardiamente, resultando em um melhor aproveitamento da energia dos gases na fase de expansão, resultando em um aumento da pressão interna do cilindro que, por sua vez colabora com o aumento de torque.Em se tratando de altas cargas, usar o FTVE promove a sobreposição de válvulas o que resulta em um maior fluxo de gases no circuito de exaustão, em sistemas turboalimentados isso auxilia a diminuir o tempo de enchimento da turbina. Logo, quando utilizados simultaneamente aumentam consideravelmente o período de sobreposição de válvulas e assim potencializam tanto os efeitos esperados para cargas parciais quanto os efeitos em plena carga (HONG; PARVATE-PATIL; GORDON, 2004; PARVATE-PATIL; HONG; GORDON, 2003).

Todavia, caso o período de sobreposição das válvulas seja demasiadamente prolongado, parte da mistura fresca pode escapar para o escapamento sem ter queimado, o que promove uma combustão mais rica e, portanto, aumentando o consumo específico e as emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono; esse processo é conhecido como *short-circuiting* (BLAIR,

1999; ZHANG; ZHAO, 2012; WIESE et al., 2017). As perdas por *short-circuiting* tendem a aumentar conforme o período de sobreposição de válvulas aumenta, e seu efeito diminui a eficiência do *scavenging* logo, se faz necessário um controle fino sobre como ocorrerá a sobreposição das válvulas, de forma que, no balanço geral, as perdas por short-circuiting não eliminem o ganho de desempenho proposto pelo *scavenging*. Sistemas de VVT podem providenciar este tipo de controle. (HEYWOOD, 1988; PARVATE-PATIL; HONG; GORDON, 2003; OSORIO; RIVERA-ALVAREZ, 2018)

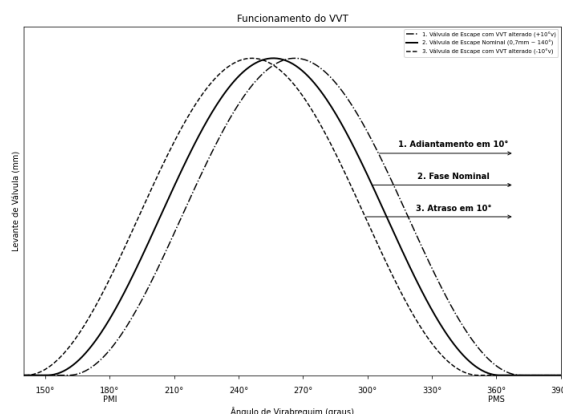


Figura 3 – Funcionamento do VVT

Fonte: Adaptado de: (BOSCH, 2011)

Em um estudo desenvolvido por Baeta (2011), é possível verificar, na Figura 4, o efeito do emprego da sobreposição de válvulas em um motor de combustão interna com turbocompressor. Nota-se que, com a aplicação da sobreposição das válvulas, houve um aumento no fluxo de ar pelo motor (4a), proporcionando assim um aumento na rotação do sistema turbocompressor (4b), reduzindo o *turbo lag* e aumentando a pressão no coletor de admissão (4c). Logo, maiores valores de torque foram auferidos indicando o aumento no desempenho do motor em relação ao caso em que não houve a aplicação da sobreposição das válvulas (4d).

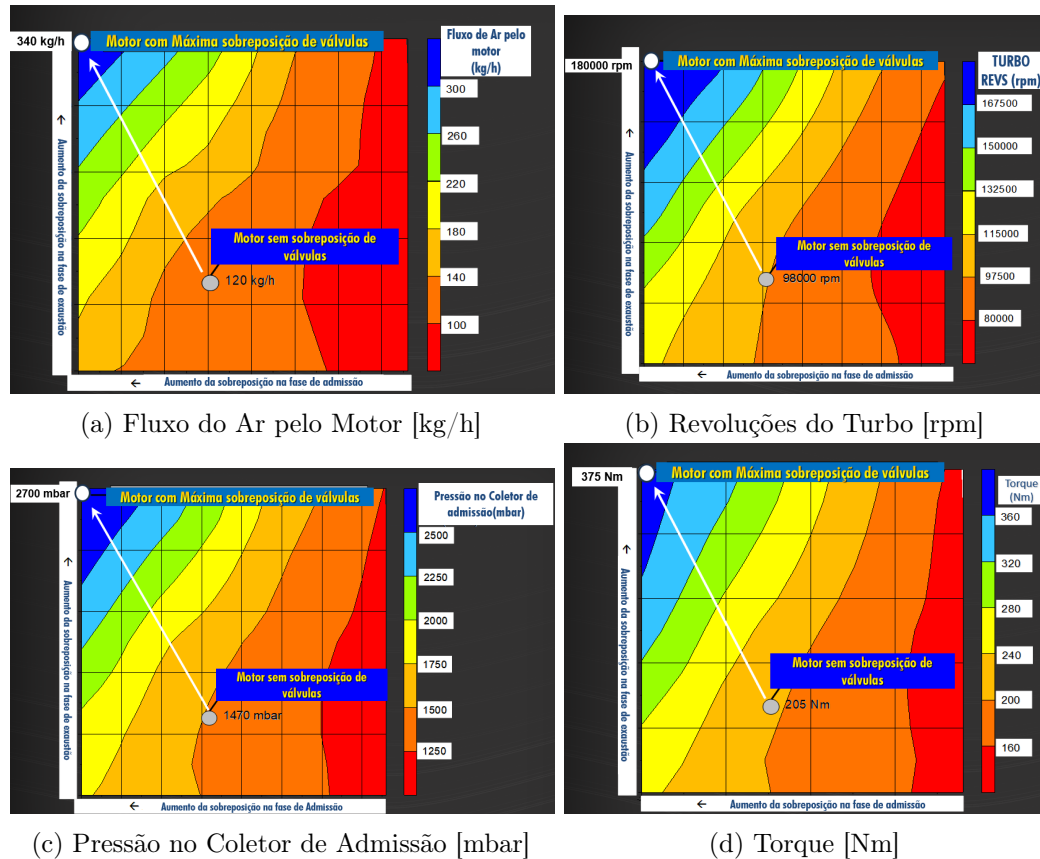


Figura 4 – Efeito da Aplicação da Sobreposição de Válvulas em um motor de combustão interna.

Fonte: Adaptado de:(BAETA, 2011)

Ainda, em aplicações voltadas para os países andinos, o desenvolvimento e o desempenho de motores *downsized* enfrentam desafios ainda mais significativos. A utilização de combustíveis de baixa octanagem, como o RON 89, limita a eficiência operacional desses motores, especialmente em altitudes elevadas, onde a menor densidade do ar já prejudica a combustão (CEBALLOS; MELGAR; TINAUT, 2021; MILPIED et al., 2009). Nessas condições, o risco de detonação (*knock*) aumenta, exigindo a adoção de estratégias de mitigação, como a redução do avanço da ignição ou a limitação da taxa de compressão efetiva, o que compromete tanto o desempenho quanto a eficiência térmica (HEYWOOD, 1988; NAMAR et al., 2021; LOU; ZHU, 2020).

Além disso, a topografia diversificada da região, com altitudes que variam de 1.000 a mais de 4.000 metros acima do nível do mar, e a presença de rampas íngremes impõem demandas adicionais aos veículos, exigindo maior força e resistência dos motores em condições de ar rarefeito (CEBALLOS; MELGAR; TINAUT, 2021; GARREAUD, 2009). A isso se soma a amplitude térmica significativa, com temperaturas médias anuais variando de 10°C a 35°C, dependendo da localização (GARREAUD, 2009). Essas condições operacionais adversas desafiam ainda mais o desempenho dos veículos. Logo, essas condições devem ser parametrizadas para que, ao projetar um motor, esse possa apresentar a robustez adequada para garantir o funcionamento confiável e eficiente em cenários tão extremos (CEBALLOS; MELGAR; TINAUT, 2021).

Nesse contexto em uma empresa do ramo automotivo, durante o desenvolvimento de um motor três cilindros 1.0 turbo, foram observadas dificuldades para iniciar e decolar o veículo

em altas temperaturas do ar no coletor de admissão e em atividades acentuadas. O presente estudo visa investigar e aplicar uma estratégia de variação de tempo de válvulas por meio de um VVT para garantir o desempenho de um motor *downsized* em condições adversas. (HONG; PARVATE-PATIL; GORDON, 2004; LOU; ZHU, 2020)

2 OBJETIVOS

Em uma empresa do ramo automotivo, em etapa de um projeto de um motor a combustão interna de três cilindros 1.0 turbo, foi observado que, quando o veículo se encontrava em condições de atividades superiores à 20% de inclinação e temperatura de ar no coletor de admissão acima de 60°C, ele apresentou dificuldades para decolar, não sendo capaz de vencer a inércia. Procurou-se investigar se a aplicação de estratégias no sistema de atuação de válvulas poderia colaborar para o aumento de performance do veículo nessa situação.

O objetivo do presente estudo foi aplicar as técnicas de variação de tempo de válvula - AAVA e FTVE - em baixa rotação e condições de temperaturas no coletor de admissão superiores a 60°C e atividades superiores a 20% de inclinação.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os métodos e ferramentas a serem utilizados no desenvolvimento desse projeto de pesquisa. As etapas metodológicas planejadas são mostradas na Figura 5. O detalhamento das ações relacionadas a cada etapa do fluxo de trabalho proposto é apresentado no corpo das seções que constituem este capítulo. Algumas informações como torque, levante de válvula e a estrutura do software que comanda a ECU não serão claramente demonstrados em razão de proteção ao patrimônio intelectual da empresa que proporcionou esse estudo.

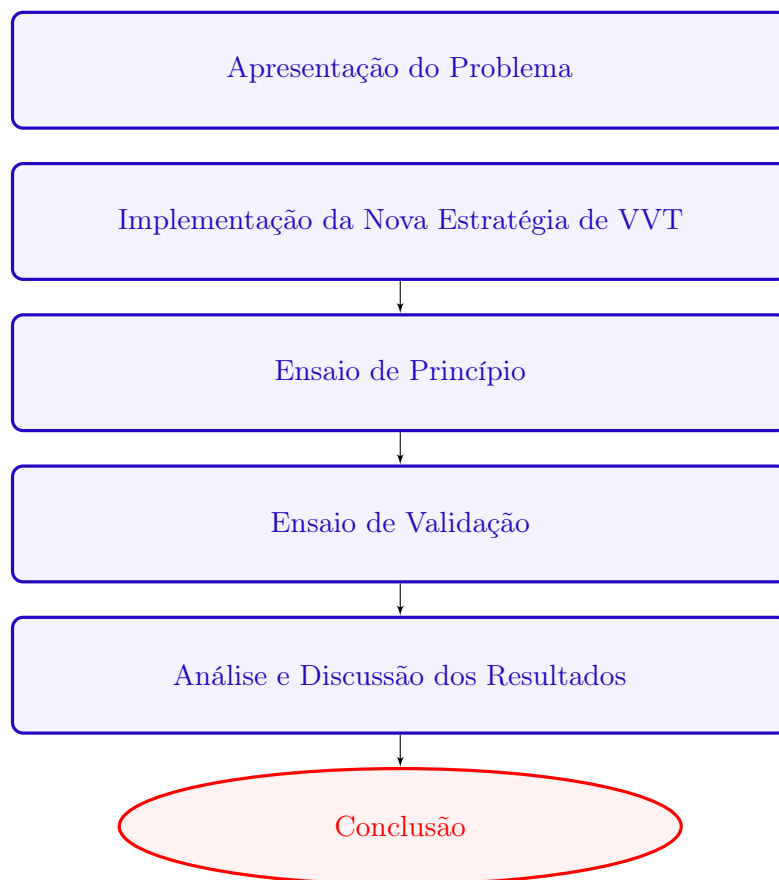


Figura 5 – Fluxo de trabalho

3.1 Apresentação do Problema

Em uma empresa do ramo automotivo, que atua nos diferentes cenários da América Latina, em etapa do desenvolvimento da calibração de um motor a combustão interna de três cilindros 1.0 turbo foi observado que, quando o veículo equipado com o motor se encontrava em condições de atividades superiores à 20% de inclinação e temperatura de ar no coletor de admissão acima de 60°C, a manobra de decolagem se tornava crítica, isto é, o veículo era incapaz de sair do lugar.

Isso ocorre em decorrência da perda de potência do motor causada pela queda na densidade

do ar em altas temperaturas, prejudicando sua eficiência volumétrica. Ainda, aclives superiores à 20% são considerados críticos para veículos convencionais, em virtude do esforço colocado sobre o eixo de tração. Portanto, considerando que a situação crítica observada nos testes reflete condições que compõem o cenário de topografia e clima presentes na América do Sul, seja em países andinos ou no próprio Brasil, torna-se imperativo otimizar o motor para garantir seu desempenho eficiente e confiável nessas circunstâncias. (CEBALLOS; MELGAR; TINAUT, 2021)

3.2 Implementação da Nova Estratégia de VVT

3.2.1 Modificação do Software

Após a identificação do problema com os responsáveis técnicos da linha de projeto, foi levantada a hipótese de que a aplicação de uma configuração de VVT específica para decolagens adversas poderia propiciar o torque necessário. Contudo, para aplicar uma configuração de VVT específica, foi necessária uma modificação no software da ECU; logo, com a equipe responsável pelo software foi realizada uma modificação que adicionou a funcionalidade de identificar condições de decolagem adversa e aplicar a configuração de VVT específica. Ainda, foi preconizado que a funcionalidade precisaria garantir que a transição entre as configurações nominal e modificada fosse acionada apenas nas condições de decolagem adversa, conforme a Figura 6; uma vez saído do estado de decolagem, o VVT deveria retornar à sua configuração de ângulos nominal. Isso ocorre em razão de preservar a configuração nominal, vide que, na visão geral do projeto, é a configuração que melhor estabelece um compromisso entre os pilares consumo, desempenho e emissões. A função global da nova função do software pode ser entendida como demonstrada a seguir.

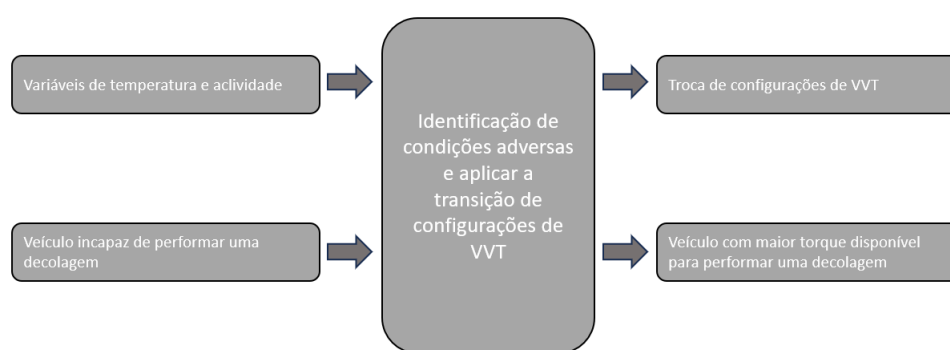


Figura 6 – Função Global da aplicação do software

Fonte: Próprio Autor

3.2.2 Definição da Configuração de VVT

A fim de entender, dentro do projeto do motor estudado, qual configuração de VVT proporcionaria o melhor desempenho, foi realizado um estudo sobre o comportamento do motor em diferentes configurações dos VVTs de admissão e escape. A válvula de admissão tem 0,7 mm de abertura em aproximadamente 10° após o ponto morto superior do evento de exaustão. E a

válvula de escape se fecha aproximadamente 10° antes do ponto morto superior de admissão. As diferentes configurações de VVT propostas tiveram como objetivo mudar independentemente o tempo de as válvulas abrirem e fecharem, mantendo os valores de duração e levante. A Figura 7 apresenta um perfil semelhante ao o perfil real nominal das válvulas no ciclo do motor estudado (HONG; PARVATE-PATIL; GORDON, 2004; LOU; ZHU, 2020; BOSCH, 2011).

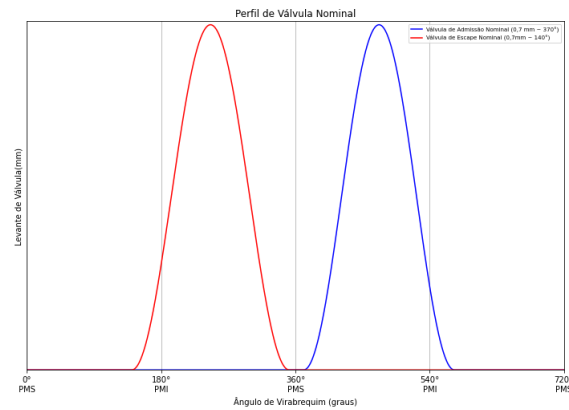


Figura 7 – Perfil das Válvulas do Motor Estudado

Fonte: Próprio Autor

O motor foi instrumentado em um dinamômetro de bancada e, então, foi feita uma varredura em plena carga na faixa de rotação de 1000 rpm a 3750 rpm em diferentes configurações de ângulos das VVTs. Conforme a Tabela 1, todas as seis configurações consistem em diferentes combinações de atrasos e avanços das VVTs de admissão e escape .

Configuração	Avanço da abertura da válvula de Admissão	Atraso no fechamento da válvula de Escape
Configuração 1	0°	0°
Configuração 2	0°	10°
Configuração 3	20°	0°
Configuração 4	20°	20°
Configuração 5	30°	10°
Configuração 6	30°	20°

Tabela 1 – Configurações das VVTs referentes às válvulas de admissão e escape

As configurações testadas foram selecionadas da seguinte forma: as configurações 1 e 2 já eram configurações utilizadas no projeto de calibração até então; a configuração 3 é a configuração nominal para decolagem, em virtude de ser a configuração que melhor estabelece um compromisso entre performance e emissões; e, as configurações 4 a 6 são as configurações que melhor apresentaram potencial de melhora no desempenho em virtude dos valores de torque apresentados em ensaio em um dinamômetro de bancada, conforme a Tabela 2 a seguir:

Rotação (rpm)	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4	Configuração 5	Configuração 6
1000	38,3%	39,1%	42,7%	44,7%	46,2%	46,6%
1250	44,5%	45,8%	51,6%	58,042%	58,8%	63,0%
1500	55,5%	56,9%	67,1%	76,3%	78,8%	80,7%
1750	71,8%	74,0%	84,4%	95,2%	96,6%	98,2%
2000	92,6%	92,6%	93,7%	94,1%	95,5%	95,5%
2300	93,7%	95,8%	93,6%	93,8%	94,2%	93,4%
2600	87,5%	89,6%	88,5%	90,4%	95,4%	95,4%
2900	85,8%	90,2%	86,7%	92,1%	90,6%	90,2%
3300	86,3%	86,3%	86,2%	86,7%	85,5%	86,3%
3700	86,4%	86,4%	85,2%	85,6%	81,2%	86,4%

Tabela 2 – Valores de torque normalizados para diferentes configurações de VVT.

A Tabela 2 apresenta os valores de torque normalizados em relação ao torque máximo que o motor pode entregar para diferentes configurações de posições de VVT. A Figura 8 organiza os dados da tabela em um gráfico; dessa forma, apresenta um comparativo dos valores de torque normalizados para cada faixa de rotação e configuração de VVT. É possível verificar que, em relação à configuração 3 (nominal), na faixa de 1500 rpm a 1800, a configuração 6 apresenta a maior diferença percentual, de aproximadamente 15% e, portanto, é a que extrai o melhor desempenho do motor. Durante esse ensaio não foram monitoradas as pressões internas dos cilindros.

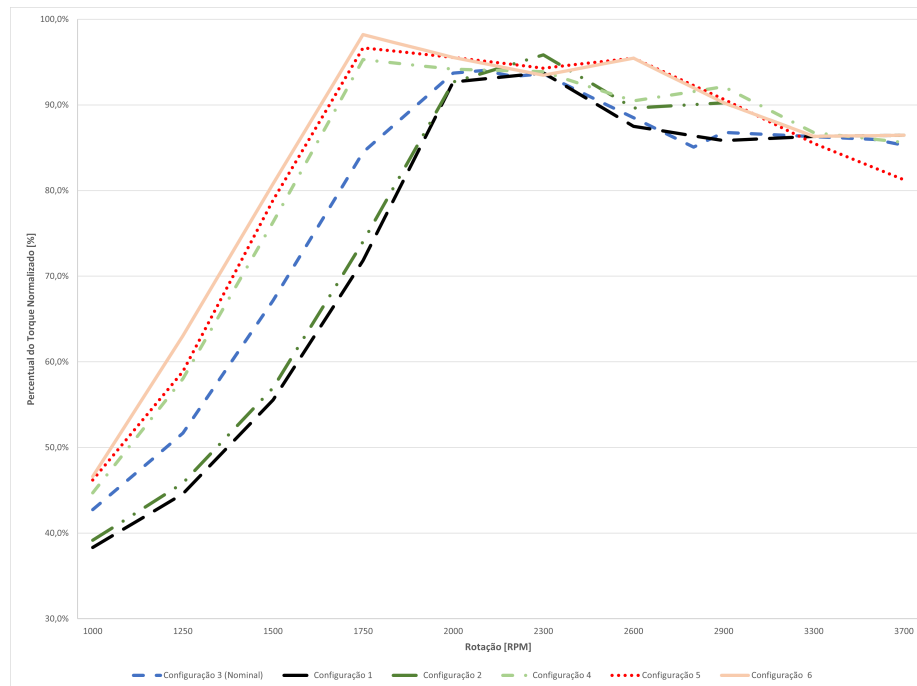


Figura 8 – Curvas de torque normalizados para diferentes configurações de VVT

Fonte: Próprio Autor

A configuração número 6 contempla as técnicas AAVA e FTVE, em que a abertura da válvula de admissão foi antecipada em 30° e o fechamento da válvula de escape foi atrasada em 20° conforme Figura 9. Em comparação, nota-se que, diferentemente do perfil apresentado pela Figura 7, há um período de sobreposição de válvulas de aproximadamente 30° representado pela área hachurada. Como visto anteriormente, a utilização dessas técnicas, quando em plena carga, propicia o fenômeno do *scavenging* e aumenta a eficiência volumétrica, isto é, aumenta a

quantidade de massa de ar fresco disponível para a próxima combustão e assim, aumenta sua qualidade e o desempenho do motor (LOU; ZHU, 2020; HONG; PARVATE-PATIL; GORDON, 2004; OSORIO; RIVERA-ALVAREZ, 2018). Quando colocado em perspectiva com o problema apresentado, o veículo que se encontra em situação de decolagem em um alto aclave com mais de 20% de inclinação, exige um grande esforço do motor, para que gere o torque necessário e o veículo comece a se mover. Contudo, a alta temperatura no coletor de admissão implica um ar menos denso que o ar em temperatura ambiente, ou seja, para um mesmo volume há menos massa de ar disponível para efetuar uma combustão eficiente (LOU; ZHU, 2020; CEBALLOS; MELGAR; TINAUT, 2021). Logo, ao utilizar a configuração que melhor proporciona o *scavenging*, a descompressão rápida tardia e uma melhor eficiência de retenção atua-se diretamente no fornecimento de massa de ar disponível no interior do cilindro, bem como o melhor uso da energia de combustão disponível na mistura, suprimindo a deficiência imposta pela alta temperatura e baixa densidade do ar.

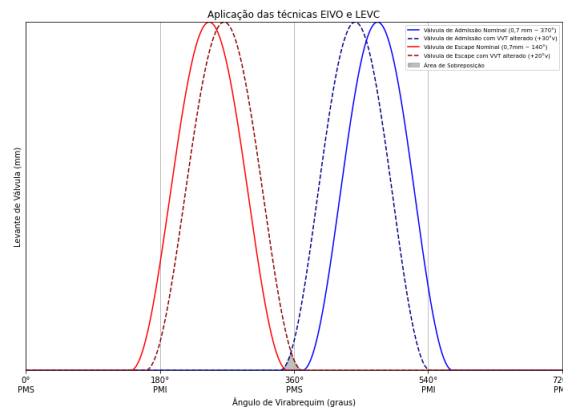


Figura 9 – Aplicação de AAVA e FTVE

Fonte: Próprio Autor

Dessa forma, a configuração 6 foi determinada como a configuração específica a ser aplicada.

3.2.3 Aplicação da Configuração Específica

Uma vez que foi decidida qual a configuração a ser utilizada, foi realizada a aplicação dos valores da configuração no software do veículo e feito o preparo para a aquisição de variáveis essenciais à validação das novas funções e comportamentos do veículo. Para isso, foi necessária a instrumentação do veículo para estabelecer a comunicação entre a ECU e o computador. Essa comunicação foi feita com uma ES592 da empresa ETAS, um cabo Lemo, um cabo Ethernet e o computador HP Zen book.



Figura 10 – ES592

Fonte: <httpswww.etas.comenproductses592.php>

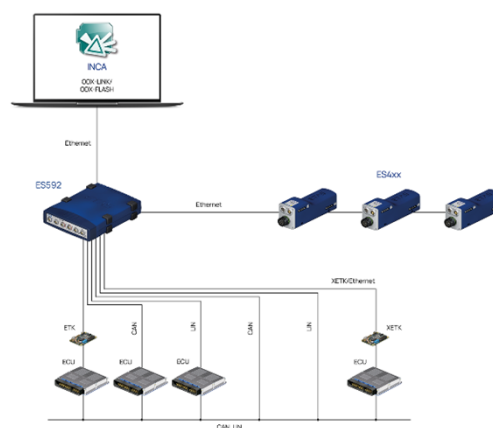


Figura 11 – Esquema de Instrumentação

Fonte: <httpswww.etas.comenproductses592.php>

A ES592 tem como principal função mediar a comunicação entre a ECU e o computador. Para acesso, alteração e aquisição dos valores calibráveis e medidos na ECU, foi utilizado o Software INCA, que faz a interface entre a ECU e o computador.

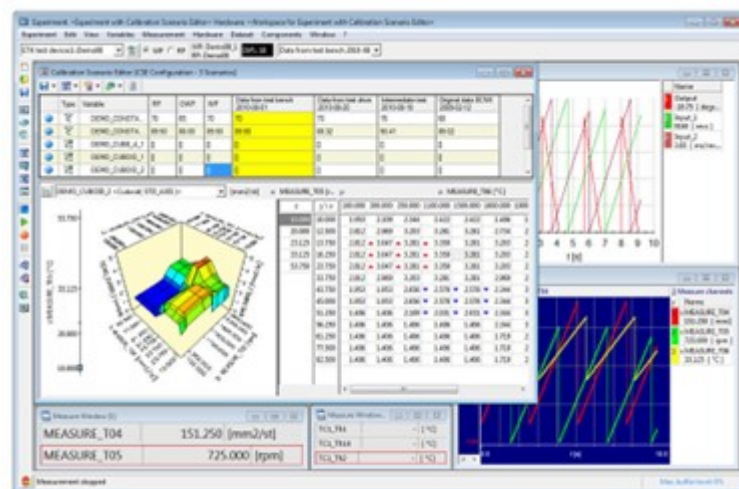


Figura 12 – INCA V 7.2

Fonte: <httpswww.etas.comenproductsinca.php>

Uma vez que os dados foram adquiridos, o INCA fornece um arquivo de extensão .MF4, que pode ser lido por meio do *Measured Data Analyser*, o software utilizado para as devidas análises dos resultados.

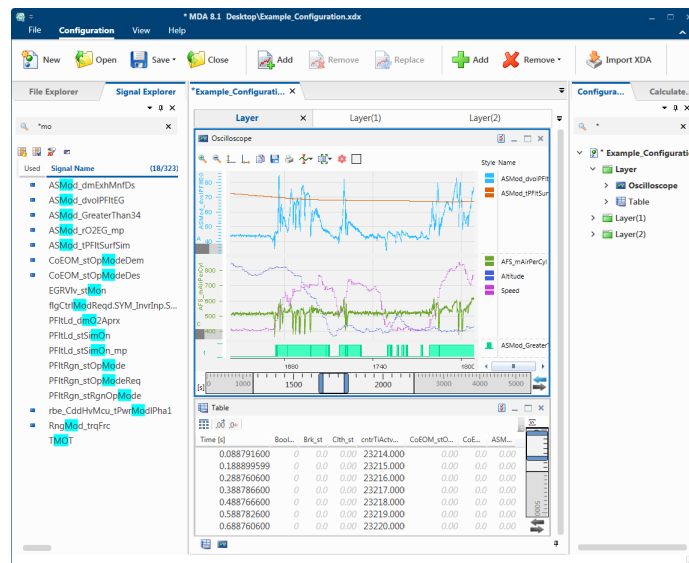


Figura 13 – Measured Data Analyser V8.6

Fonte: <https://www.etas.com/en/products/mda-mdav8.php>

3.3 Ensaio de Princípio

Foi feito um ensaio de princípio cujo objetivo consistiu em verificar se a nova funcionalidade do software, construída para decolagens em situações adversas, atuaria de forma coerente com o estipulado em sua função global, isto é: se a ECU identifica que o veículo se encontra em uma situação de decolagem com altas temperaturas do ar no coletor de admissão e grandes atividades, se aplica a configuração de VVT específica para essa situação e, uma vez que o veículo não estiver mais em fase de decolagem, retorna à configuração de VVT nominal.

A Figura 14 apresenta um fluxograma daquilo que consiste o ensaio e o seu comportamento esperado. O ensaio ocorre da seguinte maneira: o veículo é posicionado em uma rampa com inclinação superior a 20%, com temperatura superior a 60°C. O motor é então posto em plena carga e acelerado até atingir uma velocidade de referência V em que terá estabelecido uma condição inercial sustentável e não estará mais em condição de decolagem.

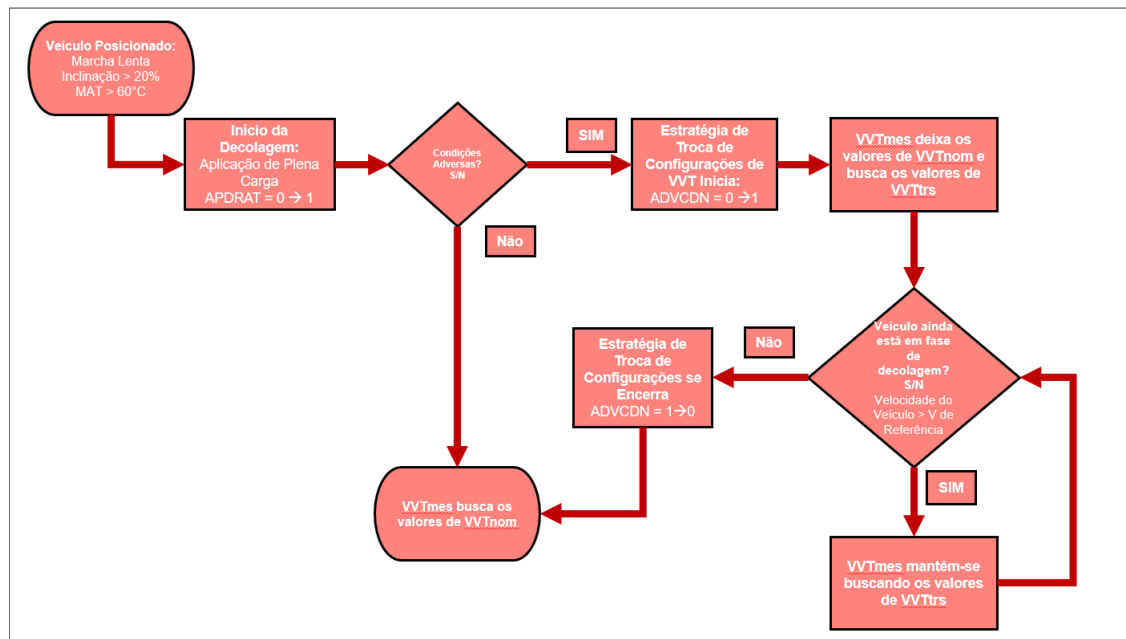


Figura 14 – Fluxograma do Ensaio de Princípio

Fonte: Próprio Autor

As variáveis analisadas e aquisitadas nesse ensaio são:

Variável	Sigla
Rotação	N
Porcentagem do Pedal do Acelerador	APDRAT
Temperatura do Ar no Coletor de Admissão	MAT
Sinal de Decolagem em Condições Adversas	ADVCDN
Inclinação da Rampa	RDSLP
Ângulo de VVT medido da Admissão	VVTmes _{Adm}
Configuração de Ângulos do VVT Nominal da Admissão	VVTnom _{Adm}
Nova Configuração de Ângulos do VVT da Admissão	VVTtrs _{Adm}
Ângulo de VVT medido do Escape	VVTmes _{Escp}
Configuração de Ângulos do VVT Nominal do Escape	VVTnom _{Escp}
Nova Configuração de Ângulos do VVT do Escape	VVTtrs _{Escp}

Tabela 3 – Variáveis aquisitadas no Ensaio de Princípio

O comportamento esperado para o ensaio foi: a ECU identifica que está em condição de decolagem adversa: ADVCDN assumindo valor 1; assim que a decolagem inicia, a ECU aplica a transição entre configurações: APDRAT assume valor 1 e VVTmes deixa o perfil dos valores do VVTnom e busca pelos valores do VVTtrs. Uma vez que o veículo sair da condição de decolagem por ter atingido a velocidade de referência V, o VVT retorna para a configuração nominal: o sinal ADVCDN cai de 1 para 0, indicando que não há mais necessidade de trocar as configurações de VVT. Logo, os valores de VVTmes devem deixar o perfil dos valores do VVTtrs e retomarem o perfil do VVTnom.

3.4 Ensaio de Validação

Após o ensaio de princípio e constatada a funcionalidade do software, foi feito um ensaio de validação no qual se procurou reproduzir a situação real de decolagem adversa; o veículo foi carregado com aproximadamente 400 kg para simular um veículo carregado em sua capacidade máxima e, assim, o pior cenário de decolagem. Foi posicionado em uma via urbana com aproximadamente 27% de inclinação. Dessa forma foram realizadas duas manobras:

- **Manobra 1:** Decolagem Crítica + Configuração nominal de VVT.
- **Manobra 2:** Decolagem Crítica + Configuração específica de VVT.

A Figura 15 retrata um fluxograma de como é o processo de ensaio e no que consistem as duas manobras citadas, bem como o critério de amostragem.

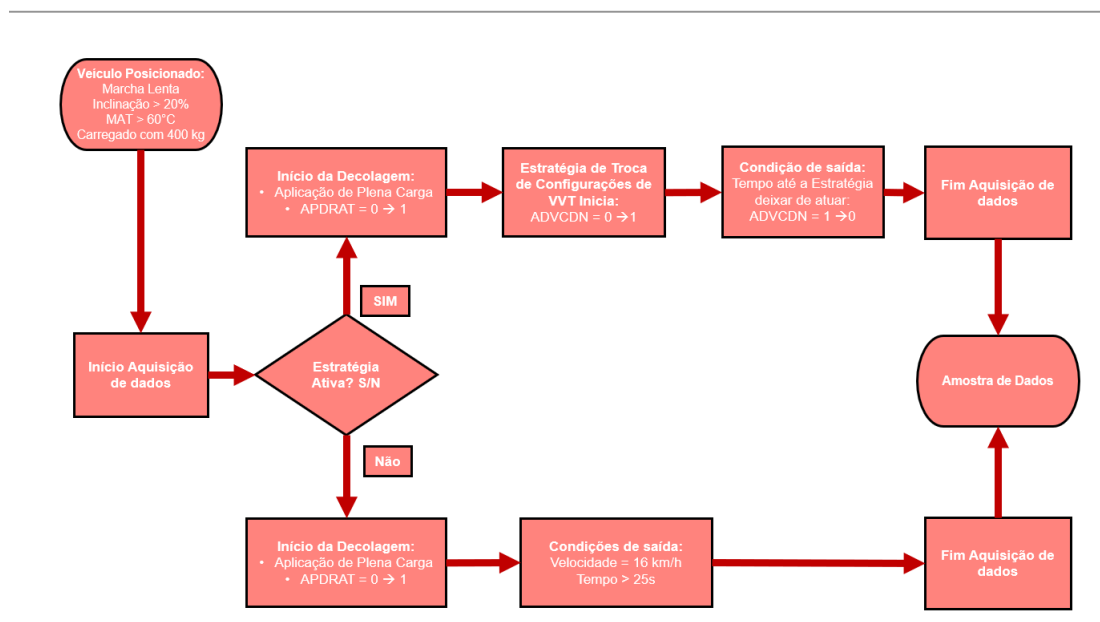


Figura 15 – Fluxograma do Ensaio de Validação

Fonte: Próprio Autor

O processo do ensaio consistiu em posicionar o veículo em uma rampa com inclinação superior à 20%, ligado em marcha lenta. Nesse ponto é iniciada a aquisição dos dados. Em seguida, o pedal do acelerador é pressionado completamente, colocando o motor em plena carga e acelerando o veículo. Esse processo é repetido para o caso com o VVT nominal e com o VVT modificado em que são separados os critérios para finalizar a aquisição. Para o caso com o VVT nominal, a aquisição é interrompida quando o veículo atinge a velocidade de 16 km/h, tendo concluído a decolagem ou o tempo excede 25 segundos. Entende-se que, se após 25 segundos o veículo não foi capaz de atingir 16 km/h, ele não será capaz de performar uma decolagem. Para o caso com o VVT modificado é esperado que a estratégia do software fique ativa, modificando a configuração dos VVTs; logo, a aquisição é interrompida assim que a estratégia deixa de atuar e a configuração dos VVTs retorna para o nominal.

Essas manobras foram realizadas em temperaturas do ar no coletor de admissão iguais a 60°C e 80°C. As rotações de decolagem exploradas foram 1600 rpm e 1800 rpm, em virtude de, conforme a Figura 19, serem as regiões de funcionamento do motor onde houve a maior diferença percentual de torque entre a configuração 6 e a configuração 3 (nominal).

As variáveis analisadas e aquisitadas neste ensaio são:

Variável	Sigla
Rotação	N
Velocidade	Vs
Sinal Lambda	λ
Pressão no Coletor de Admissão	MAP
Temperatura do Ar no Coletor de Admissão	MAT
Porcentagem do Pedal do Acelerador	APDRAT
Sinal de Decolagem em Condições Adversas	ADVCDN
Torque Estimado na Roda Normalizado	%TQEst

Tabela 4 – Variáveis aquisitadas no Ensaio de Validação

A variável %TQEst, é uma normalização feita nos valores da variável de torque estimado na roda em relação a um torque de referência T, de forma que os valores de torque estimado variem de 0 a 1. Esse sinal é calculado via modelagem em software e compreende um erro aproximado de 5Nm, que será embarcado na definição da incerteza dos resultados.

O comportamento esperado para o ensaio foi: maiores valores registrados de Velocidade e %TQEst para um mesmo intervalo de tempo nas manobras com a configuração de VVT modificada em contraste com as manobras com VVT nominal. Os valores de MAP e λ foram utilizados para verificar se o efeito na reatividade da velocidade e do %TQEst se refere apenas à diferença de configurações dos VVTs. Um MAP maior implica um fluxo de ar maior pelo motor, indicando o efeito físico da sobreposição das válvulas com o motor em plena carga. E valores constantes de λ ao longo das duas manobras indicam que o efeito positivo no desempenho do motor ocorre em virtude da mudança de configurações de VVT e não é mascarado por eventuais desvios de mistura.

As demais variáveis MAT, N, ADVCDN e APDRAT foram aquisitadas a fim de mapear e estabelecer os critérios de início e fim de manobra e o período de aquisição e uma base de comparação entre as amostras.

O critério de comparação entre as amostras foi o tempo em que o sistema identifica que o veículo se encontra em condições adversas de decolagem. Os valores das variáveis aquisitadas durante esse período, de ambas as manobras, foram utilizados para efetuar toda a análise do desempenho e operação entre as duas manobras.

3.5 Análise dos Resultados

3.5.1 Consolidação dos Dados

Os valores de cada variável medida apresentada na Tabela 4 foram agrupados ao longo de 14 ensaios e 28 manobras realizadas. Cada manobra foi comparada com seu par recíproco referente

ao ensaio, ou seja, uma manobra com a configuração nominal e outra com a nova configuração em mesma rotação e temperatura. Para agrupar e organizar os dados foram utilizados o MDA e o excel.

3.5.2 Análise Estatística

Uma vez que os dados foram consolidados e organizados, foram calculados os valores estatísticos básicos, a saber: média, desvio padrão, variância, erro padrão da média e intervalo de confiança, a fim de ter uma visão geral sobre o desempenho de cada configuração de VVT.

Logo, para as médias de cada variável, foi calculado o intervalo de confiança para quantificar a precisão das médias obtidas, incorporando tanto os erros sistemáticos quanto os erros aleatórios. O cálculo da média ($\bar{x}$) foi realizado conforme a Equação 3.1, considerando os n pontos adquiridos em cada manobra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Para quantificar a dispersão dos dados em torno da média, foi calculado o desvio padrão (s) conforme a Equação 3.2, o que permitiu avaliar a variabilidade presente nos dados:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

Com o desvio padrão calculado, foi possível determinar o erro padrão da média (EPM), utilizando a Equação 3.3.

$$EPM = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Uma vez calculado o (EPM) foi possível calcular a incerteza total (U) para contabilizar os erros sistemáticos (E_s advindos do viés do procedimento de medição, sendo também incorporados os erros inerentes aos sensores e modelos de medição utilizados. É calculada conforme a Equação 3.4

$$U = \sqrt{(EPM)^2 + (E_s)^2} \quad (3.4)$$

Posteriormente, o intervalo de confiança (IC) a 95% de confiança foi calculado com base na Equação 3.5, utilizando a tabela t de student:

$$IC = \bar{x} \pm t_{\alpha/2} \cdot U \quad (3.5)$$

Onde $t_{\alpha/2}$ é o valor crítico da distribuição t . O valor utilizado para o nível de confiança foi $\alpha = 0,05$, o que implica um valor de $t = 1,96$ para 95% de confiança.

Para comparar as médias das variáveis entre as duas manobras, foram calculados os valores t de student para duas médias, conforme a Equação 3.6.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (3.6)$$

Com $\bar{x}_1$ e $\bar{x}_2$ sendo as médias das duas manobras, s_1^2 e s_2^2 as variâncias, e n_1 e n_2 o número de pontos. Os valores do teste t juntamente à tabela t permitiram auferir os valores p para cada par de variável que, quando comparados ao valor de significância adotado, indicam se a diferença entre as médias é significativa ou vinculada ao acaso. Pode-se, assim, avaliar o efeito da troca de ângulos dos VVTs.

Por fim, foram gerados gráficos para todas as variáveis de forma a destacar visualmente as diferenças de reatividade e desempenho proporcionadas pelas diferentes configurações de VVT. Para realizar os cálculos de média, desvio padrão, erro padrão, análise t e auferição dos valores p foram utilizados o MDA e o excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo da pesquisa.

4.1 Ensaio de Princípio

O ensaio de princípio teve como principal objetivo verificar a ativação da nova funcionalidade do software descrita na Figura 6.

O comportamento esperado para o ensaio foi: a ECU identifica que o veículo está em condição de decolagem adversa: o valor do sinal ADVCDN sobe de 0 para 1; assim que a decolagem inicia: APDRAT varia linearmente de 0 a 1, implicando 100% de pedal; a ECU aplica a transição entre configurações: a curva do sinal VVTmes deixa o perfil dos valores do VVTnom e busca pelos valores do VVTtrs e, uma vez que não se encontra mais em situações de decolagem adversa: o sinal ADVCDN cai de 1 para 0 e os valores de VVTmes retornam ao perfil dos valores do VVTnom.

A Tabela 5 apresenta as condições de temperatura e inclinação em que o veículo se encontrava para a realização deste ensaio.

Inclinação [%]	Temperatura do Ar no Coletor de Admissão [°C]
27,2	60,3

Tabela 5 – Parâmetros iniciais do Ensaio de Princípio

As Figuras 16 e 17 apresentam as curvas aquisitadas durante a efetuação do ensaio de princípio para as válvulas de admissão e escape, respectivamente. Na primeira faixa são apresentadas as curvas de VVTtrs em vermelho, VVTmes em vermelho escuro e VVTnom em azul referentes às válvulas de admissão; na segunda faixa são apresentadas as curvas de pedal do acelerador (APDRAT); na terceira faixa é apresentado o sinal de detecção de condições adversas de decolagem (ADVCDN).

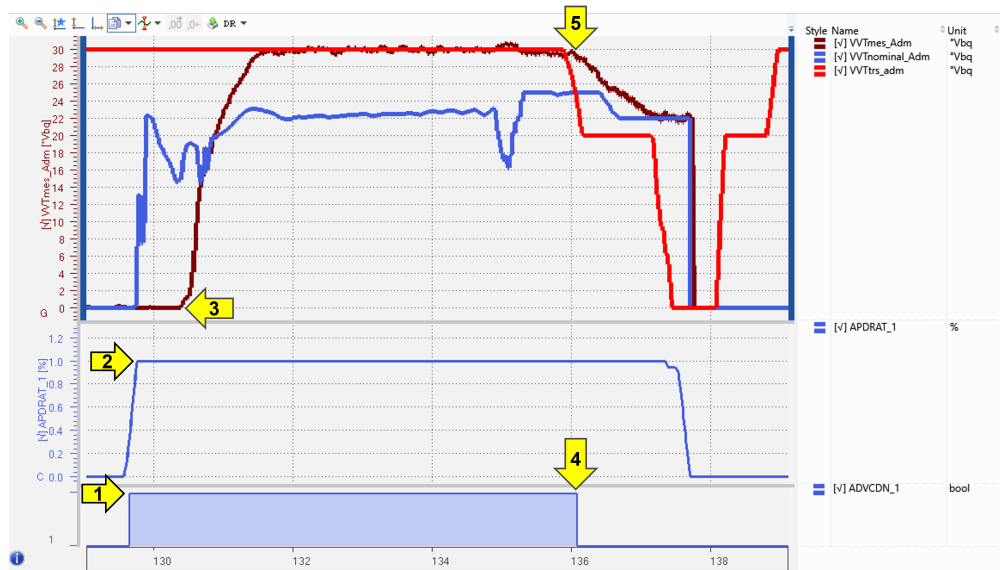


Figura 16 – Ensaio de Princípio - VVT das Válvulas de Admissão

Fonte: Próprio Autor



Figura 17 – Ensaio de Princípio - VVT das válvulas de Escape

Fonte: Próprio Autor

Nota-se que, dadas as condições iniciais de $MAT > 60C$ e inclinação $> 20\%$, a ECU identifica que o veículo está em condições adversas de decolagem e o sinal ADVCDN varia de 0 para 1, indicado pela seta número 1 em ambas as figuras. No instante em que o pedal do acelerador é subitamente pressionado, APDRAT vai de 0 a 1, a decolagem se inicia e o sinal ADVCDN varia de 0 a 1, indicado pela seta 2 em ambas as figuras. Nesse instante é possível perceber que a curva de VVTmes de ambos escape e admissão começam a transicionar dos valores da VVThom para os valores da curva VVTtrs, indicado pela seta número 3. No instante em que o sistema do veículo entende que não se encontra mais em situação de decolagem, ainda que em condições adversas, o valor do sinal ADVCDN cai de 1 para 0, representado pela seta número 4.

Então, a curva do VVT_{mes} retorna ao perfil do VVT_{nom}, indicado pela seta número 5. Logo, para o VVT das válvulas de admissão e escape, a nova funcionalidade do software atingiu o comportamento esperado.

Em suma, ao aplicar a nova funcionalidade ao software embarcado no veículo, foi possível, por meio do ensaio de princípio, verificar o comportamento esperado, ou seja, a mudança de fase da atuação das VVTs para propiciar uma decolagem robusta, mesmo que sujeito a condições adversas.

4.2 Ensaio de Validação

O ensaio de validação teve como principal objetivo verificar e validar se a aplicação das técnicas AAVA e FTVE atua de forma a otimizar uma decolagem em situações adversas. Como citado na Subseção 3.4, a manobra consistiu em carregar o veículo com 400 kg, posicioná-lo em uma rampa com de inclinação superior à 27% e aplicar 100% de variação no pedal do acelerador, colocando o motor em plena carga. O critério de amostragem foi o tempo em que o sistema identifica que o veículo se encontra em condições adversas de decolagem. Os ensaios foram feitos para as rotações formatadas de 1600 e 1800 rpm, nas temperaturas do ar no coletor de admissão de 60°C e 80°. Essa manobra foi repetida 28 vezes, sendo 14 com a nova função de software ativada e 14 com ela desativada, concluindo assim 14 ensaios.

O comportamento esperado para o ensaio foi: maiores valores registrados de Velocidade e %TQ_{Eest} para um mesmo intervalo de tempo, na manobra com a configuração de VVT modificada em contraste com a manobra com VVT nominal.

Os valores de MAP e λ foram utilizados para verificar se o efeito na reatividade da velocidade e do %TQ_{Eest} se refere apenas à diferença de configurações dos VVTs. Um MAP maior implica um fluxo de ar maior pelo motor, indicando o efeito físico da sobreposição das válvulas com o motor em plena cara. E valores constantes de λ ao longo das duas manobras indicarão que o efeito positivo no desempenho do motor ocorre em virtude da mudança de configurações de VVT e não é mascarado por eventuais desvios de mistura.

Em razão de compreender a quantidade de dados e ensaios, os dados foram organizados e analisados conforme proposto na Seção 3.5 e serão apresentados a seguir.

=Inclinação inicial Média[%]	Média MAT inicial no Ensaio à 60°C [°C]	Média MAT inicial no Ensaio à 80°C [°C]
27,4 ± 0,45	62 ± 5	82 ± 1

Tabela 6 – Parâmetros Gerais Médios de Operação

A Tabela 6 apresenta os valores médios de inclinação inicial e temperaturas iniciais médias do ar no coletor de admissão para os ensaios feitos à 60°C e 80°C. Logo, entende-se que foi possível estabelecer condições iniciais uniformes para os ensaios e eventual análise.

Ensaio - 1600 rpm e 60°[s]	Ensaio - 1600 rpm e 80°[s]	Ensaio - 1800 rpm e 60°[s]	Ensaio - 1800 rpm e 80°[s]
6,33 ± 0,09	20 ± 3	5,4 ± 0,4	8 ± 1

Tabela 7 – Tempo de Atuação da Estratégia para Diferentes Condições de Rotação e MAT

A Tabela 7 apresenta os valores médios do tempo de atuação da nova estratégia de software em diferentes condições de rotação e temperatura do ar no coletor de admissão. Em acordo com o ilustrado na Figura 6, o tempo de atuação representa o intervalo em que o sistema identifica que o veículo está em situação de decolagem sob condições adversas, ativando e mantendo a estratégia de transição nos ângulos de VVT.

Observa-se que o tempo de atuação é menor nos ensaios realizados com MAT de 60°C, indicando que, para uma mesma rotação, o aumento da temperatura no coletor prejudica a qualidade do ar admitido pelo motor e, conseqüentemente, o desempenho. Esse cenário leva a uma maior duração da estratégia em temperaturas mais elevadas. Além disso, verifica-se que os ensaios realizados a 1800 rpm apresentam tempos de atuação menores em comparação aos realizados a 1600 rpm. Isso sugere que a potência associada à rotação de 1800 rpm, faz com que o veículo alcance inércia e sustentação de aceleração favoráveis de forma mais rápida, reduzindo a necessidade de prolongamento da estratégia.

Tabela 8 – Organização dos dados de Lambda, MAP, Velocidade e Porcentagem de Torque

Ensaio	λ_{trs}	λ_{Nom}	$\overline{Map}_{trs}[mbar]$	$\overline{Map}_{Nom}[mbar]$	$\overline{V}_{trs}[km/h]$	$\overline{V}_{Nom}[km/h]$	%TQEest _{trs} [%]	%TQEest _{Nom} [%]
1 - 1600 - 60°	0,930 ± 0,003	0,925 ± 0,002	1265 ± 27	1092 ± 28	4,9 ± 0,2	0,8 ± 0,0	0,61 ± 0,03	0,49 ± 0,03
2 - 1600 - 60°	0,898 ± 0,001	0,957 ± 0,006	1258 ± 27	1080 ± 27	5,1 ± 0,2	1,2 ± 0,1	0,62 ± 0,03	0,48 ± 0,03
3 - 1600 - 60°	0,920 ± 0,002	0,898 ± 0,001	1260 ± 27	1086 ± 27	5,1 ± 0,2	0,8 ± 0,0	0,62 ± 0,03	0,49 ± 0,03
4 - 1600 - 80°	0,997 ± 0,001	0,982 ± 0,001	1176 ± 25	935 ± 26	3,3 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,44 ± 0,03	0,33 ± 0,03
5 - 1600 - 80°	1,002 ± 0,001	1,006 ± 0,001	1177 ± 25	983 ± 25	3,0 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,50 ± 0,03	0,35 ± 0,03
6 - 1800 - 60°	1,021 ± 0,002	0,981 ± 0,002	1335 ± 29	1049 ± 27	4,9 ± 0,2	0,2 ± 0,0	0,66 ± 0,03	0,48 ± 0,03
7 - 1800 - 60°	1,000 ± 0,001	1,016 ± 0,002	1311 ± 28	1199 ± 27	4,6 ± 0,2	3,0 ± 0,1	0,62 ± 0,03	0,56 ± 0,03
8 - 1800 - 60°	0,918 ± 0,001	1,016 ± 0,002	1315 ± 28	1129 ± 27	4,6 ± 0,2	1,2 ± 0,1	0,63 ± 0,03	0,52 ± 0,03
9 - 1800 - 60°	1,013 ± 0,002	1,036 ± 0,002	1480 ± 31	1267 ± 29	4,1 ± 0,2	1,3 ± 0,1	0,66 ± 0,03	0,56 ± 0,03
10 - 1800 - 80°	0,993 ± 0,001	1,012 ± 0,001	1279 ± 26	1120 ± 26	5,5 ± 0,2	1,1 ± 0,1	0,59 ± 0,03	0,48 ± 0,03
11 - 1800 - 80°	0,979 ± 0,001	1,024 ± 0,001	1151 ± 25	1053 ± 25	5,8 ± 0,2	0,0 ± 0,0	0,50 ± 0,03	0,44 ± 0,03
12 - 1800 - 80°	0,993 ± 0,001	1,024 ± 0,001	1152 ± 26	1173 ± 26	5,8 ± 0,2	2,0 ± 0,1	0,50 ± 0,03	0,50 ± 0,03
13 - 1800 - 70°	0,940 ± 0,002	1,028 ± 0,002	1451 ± 30	1244 ± 29	4,7 ± 0,2	2,1 ± 0,1	0,62 ± 0,03	0,53 ± 0,03
14 - 1800 - 70°	0,973 ± 0,002	1,021 ± 0,001	1480 ± 29	1239 ± 28	5,0 ± 0,2	1,7 ± 0,1	0,63 ± 0,03	0,53 ± 0,03

A Tabela 8 traz a organização dos principais dados aquisitados: λ , MAP, velocidade do veículo e %TQEest, para as manobras tanto com a ativação da troca de configuração de VVT, que carrega o subscrito *trs*, quanto sem ativação o qual acompanha o subscrito *nom*.

É possível ver que, para os valores das médias de MAP, V e %TQEest nas manobras onde houve a troca de configurações de VVT, aplicando o AAVA e o FTVE, os valores foram maiores quando comparados aos valores das médias dos ensaios com a configuração nominal. Assim, é necessário verificar se essa diferença encontrada entre as médias é realmente significativa e implicam uma mudança nas condições de ensaio, ou se é apenas fruto do acaso. Para isso, foi feito um teste t-de student e calculado os valores *p* para cada par de parâmetro apresentados na Tabela 9. Caso o valor *p* seja menor que o nível de significância proposto, 0,05, podemos negar a hipótese de que a diferença entre os valores das médias é fruto do acaso.

Ensaio	$p - \text{valor} \lambda$	$p - \text{valor} Map$	$p - \text{valor} V$	$p - \text{valor} TQE$
Ensaio 1 - 1600 - 60°	2×10^{-1}	9×10^{-43}	3×10^{-72}	2×10^{-52}
Ensaio 2 - 1600 - 60°	7×10^{-25}	3×10^{-42}	2×10^{-66}	5×10^{-63}
Ensaio 3 - 1600 - 60°	4×10^{-35}	5×10^{-43}	1×10^{-79}	1×10^{-61}
Ensaio 4 - 1600 - 80°	2×10^{-36}	3×10^{-285}	0	4×10^{-196}
Ensaio 5 - 1600 - 80°	1×10^{-6}	5×10^{-273}	1×10^{-186}	9×10^{-292}
Ensaio 6 - 1800 - 60°	7×10^{-60}	2×10^{-62}	3×10^{-65}	3×10^{-57}
Ensaio 7 - 1800 - 60°	4×10^{-27}	7×10^{-16}	6×10^{-11}	3×10^{-13}
Ensaio 8 - 1800 - 60°	0	4×10^{-39}	3×10^{-47}	6×10^{-37}
Ensaio 9 - 1800 - 60°	7×10^{-21}	4×10^{-21}	4×10^{-31}	2×10^{-20}
Ensaio 10 - 1800 - 80°	8×10^{-63}	1×10^{-38}	3×10^{-78}	1×10^{-44}
Ensaio 11 - 1800 - 80°	1×10^{-221}	4×10^{-38}	8×10^{-177}	6×10^{-45}
Ensaio 12 - 1800 - 80°	2×10^{-150}	2×10^{-2}	7×10^{-92}	3×10^{-1}
Ensaio 13 - 1800 - 70°	3×10^{-240}	2×10^{-23}	4×10^{-27}	7×10^{-19}
Ensaio 14 - 1800 - 70°	4×10^{-89}	2×10^{-34}	1×10^{-41}	4×10^{-27}

Tabela 9 – Tabela de p-valores para diferentes variáveis e condições de ensaio

A Tabela 9 apresenta os valores p para cada par de parâmetros em cada um dos 14 ensaios realizados. Observa-se que, na maioria dos casos, os valores p são menores que o nível de significância adotado de 0,05, permitindo rejeitar a hipótese de que as diferenças observadas sejam decorrentes do acaso. Assim, pode-se concluir que, na maior parte dos ensaios, a diferença entre as médias dos parâmetros analisados é estatisticamente significativa.

Para avaliar a influência da troca de configurações de VVT, foi necessário examinar também o comportamento das variáveis λ e MAP. A partir da Tabela 9, observa-se que, na maioria dos ensaios, houve uma diferença significativa entre as curvas de λ . Uma mistura ligeiramente mais rica, com λ variando entre 0,9 e 1, favorece o aumento de torque, o que pode dificultar a separação precisa dos efeitos proporcionados pela troca de configurações de VVT, já que ambos os fatores contribuem conjuntamente para a melhoria do desempenho do veículo.

Ao analisar os valores médios, nota-se que os desvios de enriquecimento da mistura não seguem um padrão consistente. Em alguns ensaios, a configuração nominal apresentou uma mistura mais rica que a manobra com as técnicas de VVT aplicadas, enquanto em outros ocorreu o oposto. Essas oscilações na curva de λ podem ser atribuídas à variabilidade cíclica do motor, caracterizada por flutuações no ciclo de combustão causadas por fatores como variações na distribuição do fluxo de ar entre os cilindros, mudanças na temperatura do motor e instabilidades na ignição. Contudo é preciso assumir que, os valores da sonda lambda podem estar sendo mascarados uma vez que a sobreposição de válvulas permite um fluxo de massa maior de ar nas galerias de admissão e escape. Nesse cenário, a massa de ar em excesso no coletor de escape implica ao controlador de malha fechada a mistura como pobre dentro do cilindro e aplica um enriquecimento desnecessário para corrigir essa suposta deficiência. No entanto, como a medição da sonda ocorre nos gases de exaustão, o valor analisado pode indicar uma relação estequiométrica, ocultando o real efeito do aumento de ar admitido e levando a um consumo excessivo de combustível.

As Tabelas 8 e 9 mostram que as manobras em que a AAVA e o FTVE foram aplicados

apresentaram valores significativamente maiores de pressão no coletor de admissão em relação às manobras sem alteração nos ângulos das válvulas. Esse comportamento era esperado, uma vez que o aumento do tempo de sobreposição das válvulas em plena carga permite um maior fluxo de ar pelo motor, resultando na sobrealimentação do sistema.

Essa melhora na eficiência volumétrica, por sua vez, eleva a qualidade da combustão, resultando em maior produção de torque. Os dados das Tabelas 8 e 9 confirmam esse efeito, evidenciando um ganho médio de torque de aproximadamente 10%.

Outro aspecto relevante é que, nas manobras com a configuração nominal de VVT, a velocidade média do veículo não ultrapassa 1,5km/h, o que reflete o impacto das condições adversas no desempenho. Em contrapartida, nas manobras com a nova configuração de VVT, a velocidade média atinge cerca de 5km/h. Esse aumento demonstra que o ganho de torque de 10% contribui de maneira significativa para a melhoria da aceleração inicial do veículo.

Ainda, era esperado observar uma maior reatividade nos valores de MAP, %TQEst e Velocidade durante os ensaios. Os resultados apresentados nas Figuras 18, 19 e 20 correspondem a quatro ensaios representativos entre os 14 realizados. Esses ensaios foram selecionados por representarem as diversas condições de operação exploradas ao longo dos testes.

Em azul referem-se à manobra na qual foi utilizado a configuração de VVT nominal e as curvas em vermelho referem-se à manobra na qual houve a modificação nas configurações dos VVTs.

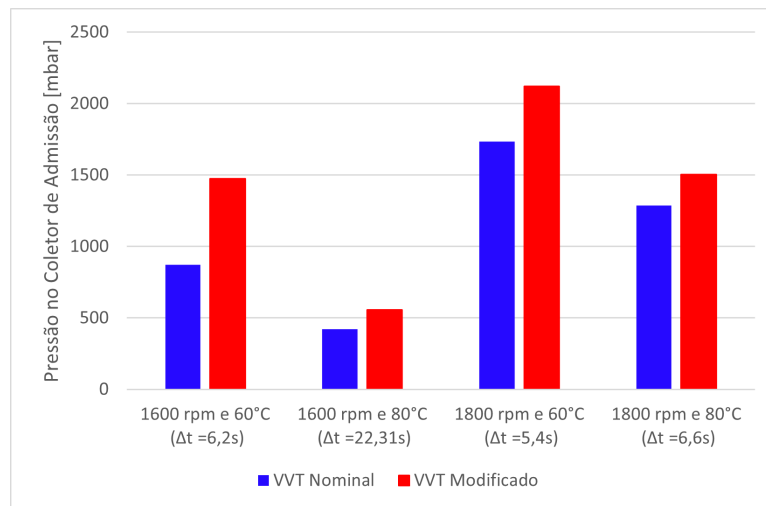


Figura 18 – Comparativo de Pressão no Coletor de Admissão para diferentes condições de ensaio

Fonte: Próprio Autor

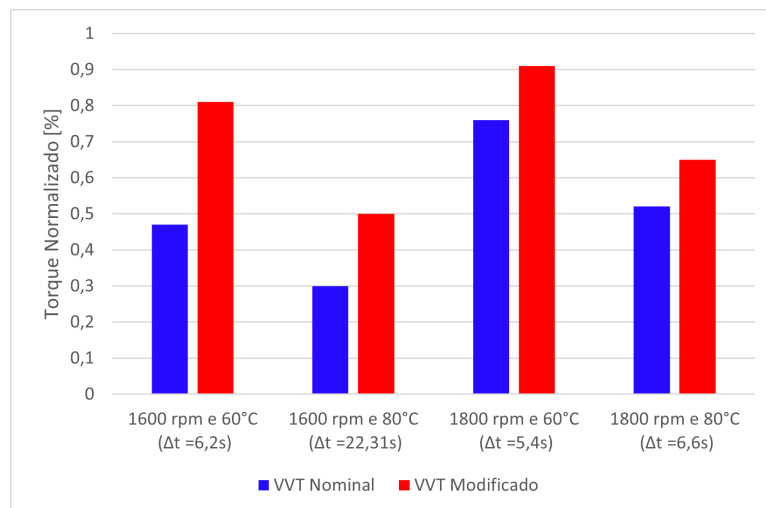


Figura 19 – Comparativo de Torque Normalizado para diferentes condições de ensaio.

Fonte: Próprio Autor

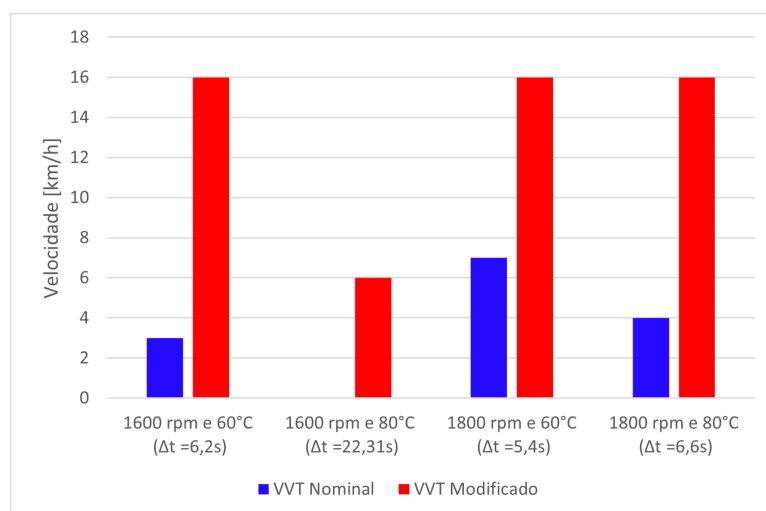


Figura 20 – Comparativo de Velocidade desenvolvida para diferentes condições de ensaio.

Fonte: Próprio Autor

Por meio das Figuras 18, 19 e 20 foi possível verificar que, nas manobras onde houve a modificação na configuração de VVT, foram obtidos, para um mesmo intervalo de tempo, valores maiores de MAP, Torque e Velocidade do que nas manobras onde foi aplicado a configuração de VVT nominal, evidenciando, dessa forma, a maior reatividade.

Nota-se que, no ensaio realizado a 1600 rpm e 60°C de MAT, o MAP atingiu 1474 milibar na manobra com o VVT modificado, enquanto o VVT nominal alcançou apenas 871 milibar. Isso corrobora o esperado devido ao maior fluxo de ar pelo motor. Esse ganho na alimentação do motor apresentou diferenças significativas: 81% do torque de referência foi atingido com o VVT modificado, em contraste com 47% com o VVT nominal. Isso resultou em velocidades, desenvolvidas em 6,2 segundos, de 16 km/h e 3 km/h, respectivamente, evidenciando o ganho de desempenho proporcionado pela nova configuração do VVT.

No ensaio a 1600 rpm e 80°C de MAT, o aumento na temperatura do ar no coletor teve um impacto considerável no desempenho. O MAP foi reduzido para 555 milibar com o VVT modificado e 421 milibar com o VVT nominal. Esse impacto também foi observado no %TQEst e na velocidade: com o VVT nominal foram atingidos apenas 30% do Torque de referência e o veículo não foi capaz de desenvolver velocidade mesmo após 22 segundos. Com o VVT modificado foram registrados 51% do Torque de referência e o veículo desenvolveu uma velocidade de 6 km/h.

Para o ensaio feito a 1800 rpm e 60°C de MAT, o MAP atingiu 2120 milibar com a modificação no VVT, enquanto com o VVT nominal alcançou 1734 milibar. Com o VVT modificado, o motor atingiu 91% do Torque de referência em contraste com 76% com o VVT nominal. Isso se declarou na velocidade de forma que, em 5,4 segundos, com o VVT modificado, o veículo atingiu 16km/h e, com o VVT nominal, o veículo alcançou apenas 6,5km/h. Quando a temperatura do coletor subiu de 60°C para 80°, assim como nos ensaios feitos a 1600 rpm, houve um impacto no desempenho do veículo em ambos os casos.

No ensaio feito a 1800 rpm e 80°C de MAT, com o VVT modificado, o MAP alcançou 1504 milibar em contraste com 1286 milibar com o VVT nominal. O Torque desenvolvido, com o VVT modificado, foi de 65% do Torque de referência comparado com 52% com o VVT nominal. Logo, em 6,6 segundos, a manobra realizada com a modificação no VVT atingiu 16 km/h, superando os 3,6 km/h desenvolvidos pela manobra com o VVT nominal.

Ainda, é possível verificar que os valores registrados nos ensaios a 1800 rpm, em ambas as respectivas temperaturas, superam os valores auferidos nos ensaios feitos a 1600 rpm, evidenciando o efeito positivo da elevação da rotação de decolagem de 1600 rpm para 1800 rpm. Logo, essa rotação permite um melhor aproveitamento do ganho em desempenho identificado nos ensaios em banco motor (Tabela 2 e Figuras 8), o que fica claro ao observar que, mesmo em condições mais severas, o veículo foi capaz de realizar a decolagem.

Em resumo, os resultados obtidos corroboram o comportamento esperado para o ensaio de validação, tanto do ponto de vista estatístico ao longo dos ensaios quanto em análise isolada de cada ensaio individual. Os efeitos observados são consistentes com os encontrados em estudos prévios, como os de Baeta (2011) (representados na Figura 4) e Hong et al.(2004). O ganho de aproximadamente 16% em torque bruto registrado nos ensaios realizados no banco de motores foi reduzido para uma média de 10%, quando os testes foram conduzidos em veículo. Essa redução se deve à modelagem do torque estimado (TQEst) e à integração do motor com o restante do sistema veicular.

O estudo foi conduzido para duas rotações formatadas para a decolagem, e os resultados indicam que o ganho de desempenho é mais expressivo quando a técnica é aplicada à rotação de 1800 rpm.

Portanto, conclui-se que a aplicação das técnicas AAVA e FTVE em situações de inclinação superiores a 20% e com temperaturas do ar no coletor de admissão superiores a 60°C proporciona um ganho significativo de desempenho, permitindo ao veículo realizar decolagens mesmo em condições adversas.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a análise da aplicação das técnicas de variação de tempo de válvulas (AAVA e FTVE) em um motor de três cilindros 1.0 turbo, para decolagens em situações críticas de operação, como acelerações superiores a 20% de inclinação e temperaturas de ar no coletor de admissão acima de 60°C.

Os resultados demonstraram que a aplicação das técnicas propostas trouxe ganhos significativos no desempenho do motor. Em condições reais de operação, observou-se um ganho médio de torque de aproximadamente 10%, enquanto em testes controlados em banco motor, esse ganho alcançou cerca de 16%. Além disso, o estudo identificou que o impacto das técnicas é mais expressivo a 1800 rpm, quando o veículo alcança condições favoráveis de sustentação e inércia de forma mais eficiente. A análise estatística e os resultados individuais dos ensaios corroboram a eficácia das técnicas AAVA e FTVE, alinhando-se aos comportamentos previstos e aos achados em pesquisas prévias. Dessa forma, conclui-se que as técnicas de variação de tempo de válvulas são estratégias viáveis e eficazes para superar limitações de desempenho em condições extremas.

A partir dessa conclusão, visto que o trabalho se ambienta no universo de leis de emissões e motores *downsized*, sugere-se, para trabalhos futuros, refazer os ensaios monitorando a pressão interna dentro do cilindro a fim de verificar o efeito da descompressão rápida tardia, a utilização de um analisador de gases e assim avaliar o impacto da aplicação da estratégia analisada em termos de emissões de poluentes.

REFERÊNCIAS

- BAETA, J. G. C. New alfa romeo 1.8 t gdi engine - description of the 'scavenging' technology. In: **Simpósio SAE Brasil de Powertrain**. [S.l.]: Fiat Powertrain, 2011.
- BELLIS, V. D. Performance optimization of a spark-ignition turbocharged vva engine under knock limited operation. **Applied energy**, Elsevier, v. 164, p. 162–174, 2016.
- BLAIR, G. **Design and simulation of four-stroke engines**. [S.l.]: SAE International, 1999.
- BONATESTA, F. et al. Fuel economy analysis of part-load variable camshaft timing strategies in two modern small-capacity spark ignition engines. **Applied energy**, Elsevier, v. 164, p. 475–491, 2016.
- BOSCH, R. **Bosch Automotive Handbook**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- CE, C. E. **Regulamento Euro 6 para emissões veiculares**. 2014. Padrão de emissões adotado por diversos países, incluindo a União Europeia e o Chile. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32007R0715>.
- CEBALLOS, J. J.; MELGAR, A.; TINAUT, F. V. Influence of environmental changes due to altitude on performance, fuel consumption and emissions of a naturally aspirated diesel engine. **Energies**, MDPI, v. 14, n. 17, p. 5346, 2021.
- DHINGRA, R.; DAS, S. Life cycle energy and environmental evaluation of downsized vs. lightweight material automotive engines. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 85, p. 347–358, 2014.
- FRASER, N. et al. Challenges for increased efficiency through gasoline engine downsizing. **SAE International Journal of Engines**, SAE International, v. 2, n. 1, p. 991–1008, 2009. ISSN 19463936, 19463944. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/26308449>.
- GARREAUD, R. D. The andes climate and weather. **Advances in geosciences**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 22, p. 3–11, 2009.
- HEYWOOD, J. B. Internal combustion engine fundamentals. (No Title), Mcgraw-hill, 1988.
- HONG, H.; PARVATE-PATIL, G.; GORDON, B. Review and analysis of variable valve timing strategies—eight ways to approach. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 218, n. 10, p. 1179–1200, 2004.
- IBAMA. **PROCONVE P8 - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores**. 2022. Norma brasileira que segue padrões equivalentes ao Euro 6. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br>.
- JOHNSON, T. Vehicular emissions in review. **SAE International Journal of Engines**, JSTOR, v. 9, n. 2, p. 1258–1275, 2016.
- JOSHI, A. Review of vehicle engine efficiency and emissions. **SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility**, v. 1, n. 2019-01-0314, p. 734–761, 2019.
- LOU, Z.; ZHU, G. Review of advancement in variable valve actuation of internal combustion engines. **Applied Sciences**, MDPI, v. 10, n. 4, p. 1216, 2020.

MILPIED, J. et al. Impact of fuel properties on the performances and knock behaviour of a downsized turbocharged di si engine—focus on octane numbers and latent heat of vaporization. **SAE International Journal of Fuels and Lubricants**, JSTOR, v. 2, n. 1, p. 118–126, 2009.

NAMAR, M. M. et al. Engine downsizing; global approach to reduce emissions: A world-wide review: A world-wide review. **HighTech and Innovation Journal**, Ital Publication, v. 2, n. 4, p. 384–399, 2021.

OSORIO, J. D.; RIVERA-ALVAREZ, A. Efficiency enhancement of spark-ignition engines using a continuous variable valve timing system for load control. **Energy**, Elsevier, v. 161, p. 649–662, 2018.

PARVATE-PATIL, G.; HONG, H.; GORDON, B. An assessment of intake and exhaust philosophies for variable valve timing. **SAE transactions**, JSTOR, p. 2174–2189, 2003.

WIESE, A. et al. **Modelling and control of engine torque for short-circuit flow and egr evacuation**. [S.l.], 2017.

ZHANG, Y.; ZHAO, H. Measurement of short-circuiting and its effect on the controlled autoignition or homogeneous charge compression ignition combustion in a two-stroke poppet valve engine. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 226, n. 8, p. 1110–1118, 2012.