

GERENCIAMENTO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA BI COMBUSTÍVEL COM OTIMIZAÇÃO DE TORQUE

Paulo Alexandre Pizará Hayashida¹, Lucas Motta de Novaes¹, João Francisco Justo¹,
Armando Antonio Maria Lagana¹ e Pedro Castro Rossetti²

¹Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

²ETAS

E-mails: paulo.hayashida@usp.br, lnovaes.motta@usp.br, jjusto@lme.usp.br,
lagana@lsi.usp.br, pedro.rossetti@etas.com

RESUMO

O sistema de controle do torque do motor tem um papel crítico em um veículo automotor, uma vez que o motor precisa atender à demanda solicitada pelo motorista de maneira mais rápida e estável possível. O torque produzido pelo motor é uma consequência da pressão de combustão desenvolvida no interior do cilindro, que é relacionada ao avanço de ignição. Logo é necessário o controle correto da mistura entre ar e combustível e do avanço de ignição, para se obter a máxima pressão de combustão. Porém diferentes combustíveis e suas misturas não possuem os mesmos parâmetros ótimos para o avanço de ignição e tempo de injeção. O presente trabalho propõe o controle do avanço de ignição e do tempo de injeção em malha fechada de um motor bi combustível, a fim de se aperfeiçoar o torque de saída do motor em função da composição do combustível utilizado. A porcentagem de etanol presente no combustível é obtida através de um sensor de composição. A eficiência do sistema em corrigir seus parâmetros em função da composição do combustível e os parâmetros de torque e potência são analisados.

INTRODUÇÃO

O aumento do preço dos combustíveis de origem fóssil e a preocupação relativa à emissão de poluentes fomentaram uma grande atividade de pesquisas na área do gerenciamento eletrônico de motores [1] e por fontes alternativas de energia para a propulsão de veículos automotores [2] [3].

O gerenciamento do motor é responsável por controlar diversos subsistemas do motor, como controle da mistura entre ar e combustível [4] [5] [6] controle da posição da válvula borboleta [7] [8] [9], controle de marcha lenta [10] [11] controle do avanço de ignição e de detonação [12] [13] [14]. Esses sistemas têm suas referências estipuladas em função da demanda de torque do motor a fim de atender à demanda solicitada pelo condutor do veículo [1].

Na área de fontes alternativas, diversas opções vêm sendo consideradas, por exemplo, os biocombustíveis, como biodiesel e etanol como alternativas para o óleo diesel e gasolina, respectivamente [15] [2] Esses os álcoois apresentam características interessantes, como alta octanagem e alto calor de vaporização, o que aumenta a resistência do combustível à detonação, possibilitando que o motor trabalhe com taxas de compressão maiores do que

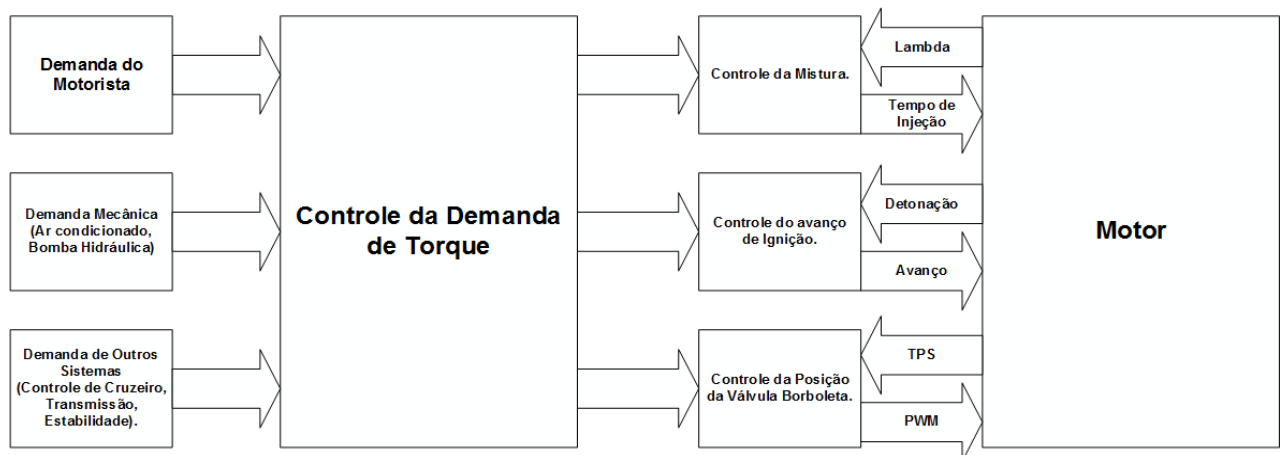
quando se utiliza gasolina, e diminuindo o pico de temperatura na câmara de combustão, levando a maior resistência contra detonação, redução da emissão de óxidos de nitrogênio (NOx), aumentando da potência de saída do motor, menor intervalo entre a ignição e o início da combustão e maior velocidade de propagação da chama [2] [3] [16].

Atualmente, o etanol é utilizado como substituto da gasolina ou misturado à mesma, principalmente no Brasil, ou como aditivo em países como EUA, Canadá e Índia [2] [3] [15]. A adição de etanol à gasolina propicia uma melhoria nas características do combustível, como: o torque de saída, o consumo e redução da emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) entre 10-90% e 20-80%, respectivamente, dependendo da condição de funcionamento do motor [17]. Porém, os trabalhos, que utilizam mistura entre gasolina e etanol como combustível, são realizados utilizando a unidade de gerenciamento do motor original, que não são produzidas para gerenciar veículo em tais condições [17] [18] [19] [20] [21] [22]. A adição de etanol à gasolina altera a relação estequiométrica do combustível com o ar, uma vez que o etanol possui oxigênio em sua estrutura molecular, reduzindo o número de moléculas necessárias para a combustão ideal do combustível, sendo a relação estequiométrica do álcool de 8.98:1 e da gasolina 14.58:1 [19] [2]. Sendo assim, as diferentes características do etanol, da gasolina e de suas misturas requer que o gerenciamento de parâmetros do motor, como o tempo de injeção de combustível e o avanço do ponto de ignição, sejam realizados em função da composição do combustível utilizado, a fim de se maximizar o torque de saída do motor e reduzir a emissão de poluentes.

1. GERENCIAMENTO ELETRÔNICO DO MOTOR

Segundo [1] o aumento da complexidade no gerenciamento do motor e a necessidade de integração com outros sistemas, como os sistemas de transmissão e tração, tornam o gerenciamento do motor em função do torque uma opção mais viável. O gerenciamento pode ser dividido em dois subsistemas: controle de torque do motor e estimação do torque de saída do motor. O primeiro consiste em gerar uma referência de torque de saída através de parâmetros, como a demanda do motorista através do pedal do acelerador, a rotação atual do motor e condições específicas como: partida do motor, marcha lenta e aquecimento do catalisador [1]. O segundo subsistema consiste da estimação do torque de saída do motor, segundo [1] é necessário estimar o torque de saída do motor indiretamente uma vez que sensores de torque não são utilizados em motores comerciais. Os sistemas de controle da mistura ar e combustível, posição da válvula borboleta e de avanço de ignição recebem seus valores de referência a partir do torque desejado estipulado pelo controle de torque, e controlam seus respectivos atuadores como tempo de injeção, avanço de ignição, válvula borboleta através de seus próprios algoritmos de controle [1] [23]. A figura (1) ilustra a base de funcionamento do gerenciamento do motor.

Figura 1 Estrutura do Gerenciamento do Motor.



Fonte: Autor.

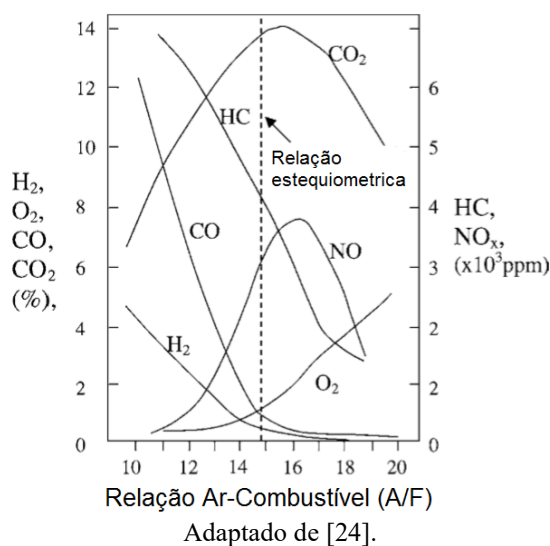
1.1. Fator Ar/Combustível

O fator (A/F) é a razão entre a massa de ar e a massa de combustível admitida pelo motor. A relação estequiométrica é definida como a relação necessária do fator (A/F) para que ocorra uma combustão completa. A relação estequiométrica é uma característica do combustível utilizado, sendo de 8.98:1 para etanol e de 14.58:1 para gasolina pura e de 12.7:1 para gasolina E25 [3]. O fator lambda (λ) representa a razão entre a estequiometria ideal do combustível e a real do processo de combustão, sendo o fator lambda definido pela equação (1).

$$\lambda = \left[\frac{\left(\frac{\text{massa de ar ideal}}{\text{massa de combustível ideal}} \right)}{\left(\frac{\text{massa de ar real}}{\text{massa de combustível real}} \right)} \right] \quad (1)$$

O fator lambda (λ) se relaciona diretamente com a emissão de poluentes pelo motor, sendo que uma mistura rica, ou seja, onde a relação entre a massa de ar e combustível real é maior do que a ideal, apresenta emissões de maiores para H_2 , HC e CO. Misturas pobres, onde o fator (A/F) real é menor do que o ideal, apresentam emissões maiores de NO_x , como ilustrado na figura (2) [24]

Figura 2 Emissões em relação ao fator (A/F),



Sendo assim, o fator (λ) é utilizado como referência para o gerenciamento do motor para correção do tempo de injeção de combustível.

2. METODOLOGIA

A investigação será executada no veículo Volkswagen Gol 1.6 modelo. Este motor possui uma taxa de compressão de 12:1, sendo assim, um motor que utiliza uma taxa de compressão intermediária em relação a motores a gasolina e motores e etanol. Este motor possui sistema de alimentação de combustível indireta múlti ponto, e sistemas de ignição e válvula borboleta eletrônica, permitindo o controle desses componentes.

As modificações necessárias foram a substituição do sensor de oxigênio original por um sensor do tipo sonda lambda de banda larga para o controle da mistura entre ar e combustível, e utilização do sensor Br-FFS para medir a composição do combustível em tempo real. Um sensor de pressão será utilizado para realizar o processo de calibração do controle do avanço de ignição e detonação. A plataforma que será utilizada para o gerenciamento eletrônico do motor e implementação dos controladores é a FlexECU. O *software* de aplicação utilizado é o Otto-3, desenvolvido por [25] usando o *software* ASCET, e seus parâmetros são ajustados através do *software* INCA.

3. PROJETO

O projeto consiste da implementação da malha de controle da mistura em malha fechada e do controle da composição do combustível no *software* de aplicação Otto 3.

3.1. Otto 3

O Otto3 é um *software* de aplicação desenvolvido por [25] no *software* ASCET, tendo como plataforma a Flex-ECU-G1. O objetivo do Otto3 é gerenciar o motor do veículo Volkswagen Gol 1.6. A figura (3) ilustra os módulos que compõem o Otto3.

Project: FlexECU Otto 3
v3.4

pg: 1/2



A partir do erro de rotação, o módulo LAMBDA_CALC estipula um ganho no tempo de injeção, que é enviado para o módulo INJ_CALC. O módulo INJ_CALC calcula o tempo de injeção do combustível, o ângulo de acionamento dos injetores e a estratégia de corte de combustível. Estes parâmetros são utilizados pelo módulo INJ_OUT que através de chamada de funções do LLSW controla as válvulas injetoras de combustível. O módulo IGN_CALC calcula os parâmetros de avanço de ignição que são utilizados no módulo IGN_OUT, para serem enviadas ao LLSW para controle das bobinas de ignição.

3.2. Controle da mistura em malha fechada

O controle utiliza o sinal de um sensor de oxigênio, instalado no escapamento do veículo e conhecido como sonda lambda, para informar o fator lambda da mistura, e assim controlar o tempo de injeção de combustível até que o fator lambda medido alcance o valor de referência definido pelo controle de rotação.

A sonda lambda utilizada neste projeto é uma de banda larga em conjunto com o equipamento LA4. A função do LA4 é controlar o aquecimento da sonda e o circuito de bombeamento de oxigênio da sonda, além de informar, através de um *display* de LCD, o fator lambda. Além disso, o LA4 pode disponibilizar o valor do fator lambda através de uma saída diferencial, onde o valor da diferença de potencial é proporcional ao valor de lambda medido.

O controlador utilizado é o proposto por [26], sendo este adaptado para o *firmware* da Otto3, sendo do tipo proporcional integral (PI) de tempo discreto. O sinal de controle é dado pela equação (2).

$$C(z) = 1 + \left(P + \frac{IT_s}{z-1} \right) e(z) \quad (2)$$

onde $e(z)$ é o sinal de erro, P é o ganho proporcional do controlador, I é o ganho integral do controlador e T_s é o tempo de integração.

Segundo [26], o valor do ganho proporcional é definido através da equação (3), onde k é o ganho. Segundo o autor, este parâmetro é definido igual a um, t_{de} é o *delay* definido como duas vezes o tempo de resposta desejado, t_c é o tempo de resposta desejado e t_{le} é o tempo de resposta do sistema definido pela equação (4) através do número de cilindros do motor e da rotação por segundo n .

$$P = \frac{1}{k} \frac{t_{le}}{t_{de} + t_c} \quad (3)$$

$$t_{le} = \left\lceil \frac{2 * (N^a \text{ Cil} - 1)}{n * N^a \text{ Cil}} \right\rceil = \frac{3}{2 * n} \quad (4)$$

O ganho integral é definido em função do ganho proporcional pela equação (5).

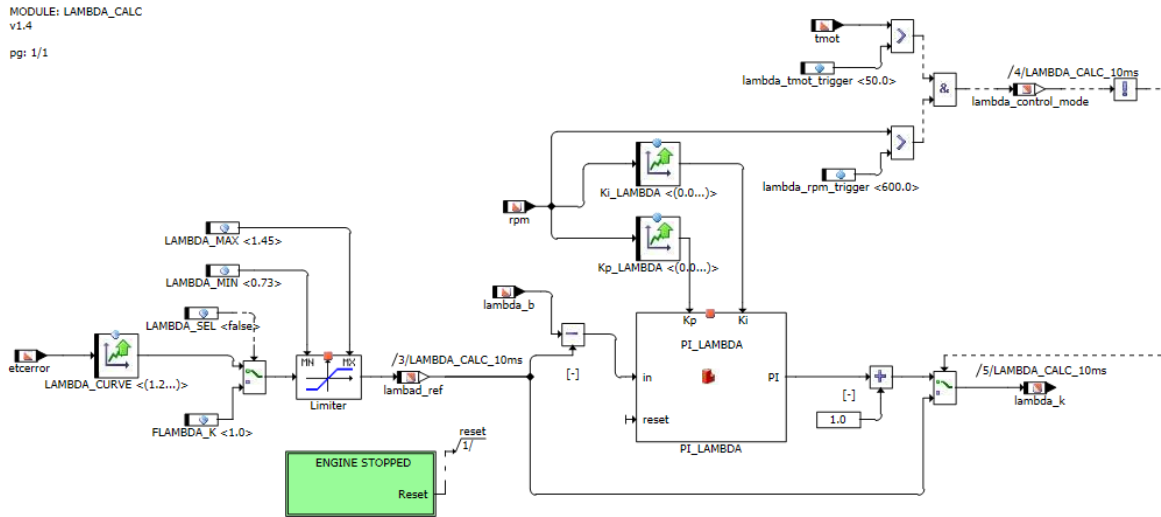
$$I = \frac{P}{t_{le}} \quad (5)$$

Como os ganhos Integral e Proporcional dependem do fator t_{le} , que é função da rotação do motor, seus valores são pré-calculados através das equações (3) e (5) em intervalos de 100 RPM, utilizando o tempo de resposta desejado de 2 segundos. Estes valores são inseridos em um mapa de uma dimensão de 60 posições, que é indexado através do valor da rotação do motor.

O parâmetro T_s utilizado por [26] é calculado através do tempo que o motor leva para completar um ciclo. Logo, este é dependente da rotação do motor. Entretanto, neste projeto as aplicações que utilizam parâmetros de tempo precisam ser executadas em tarefas periódicas, logo o T_s escolhido foi de 10ms e a aplicação foi definida para ser

executada em uma tarefa periódica com período de 10ms. A figura (4) ilustra o controle aplicado através do *software* ASCET.

Figura 4 Sistema de controle de Lambda em malha fechada.



Fonte: Autor.

3.3. Controle da composição

O controle da composição do combustível tem a função de corrigir os parâmetros do tempo de injeção de combustível e do avanço de ignição em função da composição do combustível. A composição do combustível é obtida através de um sensor modelo (Br-FFS-Gen 3) fornecido pela Continental. Este sensor, que possui um tubo onde o combustível circula, mede a capacitância, a condutividade e a temperatura do combustível para determinar a sua composição. O sensor então fornece esta informação através de uma onda quadrada, onde a frequência do sinal é proporcional à porcentagem de etanol contida no combustível, como demonstrado pela equação (6), e a temperatura em graus Celsius do combustível pode ser calculada através do tempo em nível lógico baixo do sinal de resposta do sensor.

$$\text{Porcentagem de Etanol} = \text{frequência} - 50 \quad (6)$$

Logo, se o combustível atual for Etanol puro, a frequência de saída do sensor será de 150 Hz; caso o combustível atual seja gasolina E27.5, que é comercializada no território brasileiro, a frequência de saída será de 77.5 Hz.

O módulo de controle utiliza essa informação para definir os parâmetros de tempo de injeção base e avanço de ignição base em relação aos parâmetros definidos para etanol e gasolina E27.5. O tempo de injeção base é calculado pela soma do tempo de injeção corrigido para etanol e para gasolina. O tempo de injeção corrigido para etanol é calculado como o produto entre o tempo base para etanol ($T_{\text{injeção, etanol}}$) e pela porcentagem de etanol na composição do combustível, (P_{etanol}). O tempo de injeção corrigido para gasolina é calculado como o produto entre o tempo de injeção

base para gasolina ($T_{injeção,gasolinaE27.5}$) e pela porcentagem de gasolina presente na composição do combustível ($1 - P_{etanol}$).

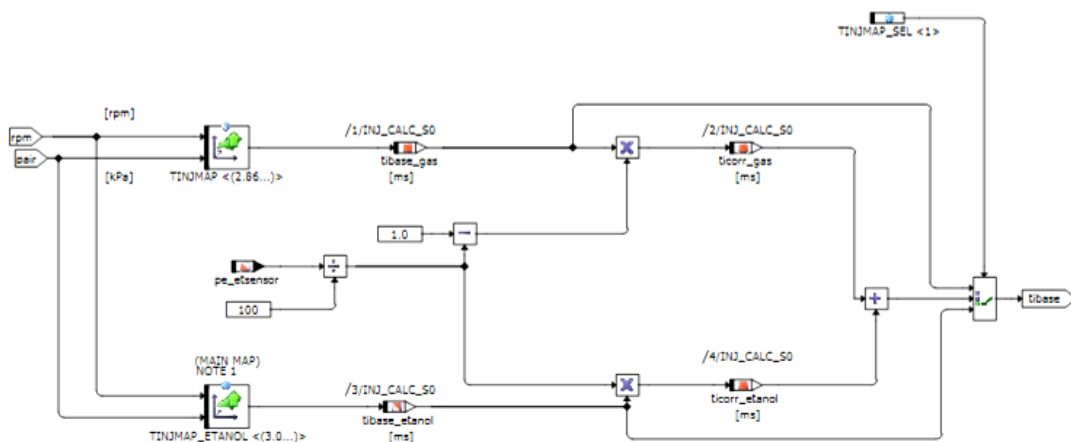
As equações (7) e (8) ilustram respectivamente os cálculos do tempo de injeção $T_{injeção}$ e avanço de ignição $A_{ignição}$.

$$T_{injeção} = \{(P_{etanol} * T_{injeção,etanol}) + [(1 - P_{etanol}) * T_{injeção,gasolinaE27.5}]\} \quad (7)$$

$$A_{ignição} = \{(P_{etanol} * A_{ignição,etanol}) + [(1 - P_{etanol}) * A_{ignição,gasolinaE27.5}]\} \quad (8)$$

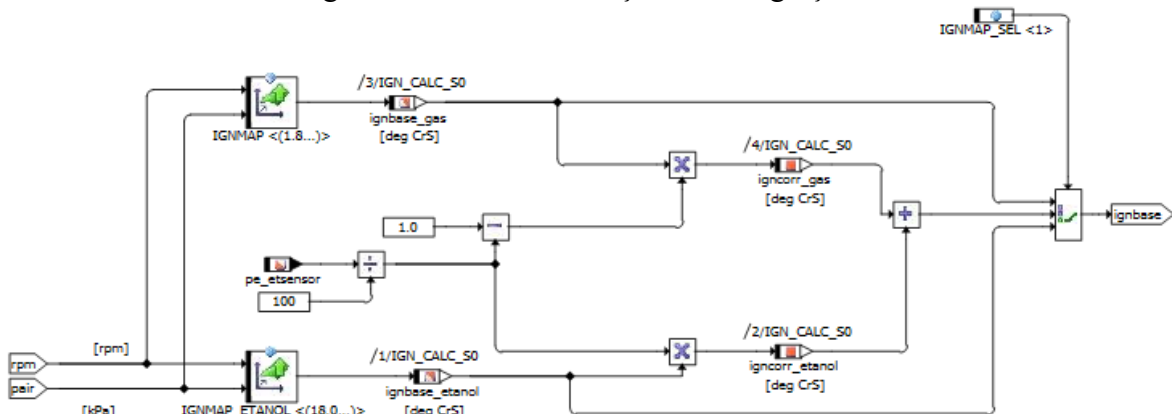
O método utilizado foi desenvolvido no *software* ASCET. A figura (5) ilustra o controle aplicado ao cálculo do tempo de injeção, e a figura (6) ilustra o controle aplicado ao cálculo do avanço de ignição.

Figura 5 Cálculo do tempo de injeção base.



Fonte: Autor.

Figura 6 Cálculo do avanço base de ignição



Fonte: Autor

É possível alterar a opção do cálculo do tempo de injeção e avanço de ignição bases através das variáveis de calibração INJMAP_SEL e IGNMAP_SEL, forçando a referência da composição como 100% etanol, ou 100% gasolina ou por controle de composição como descrito acima.

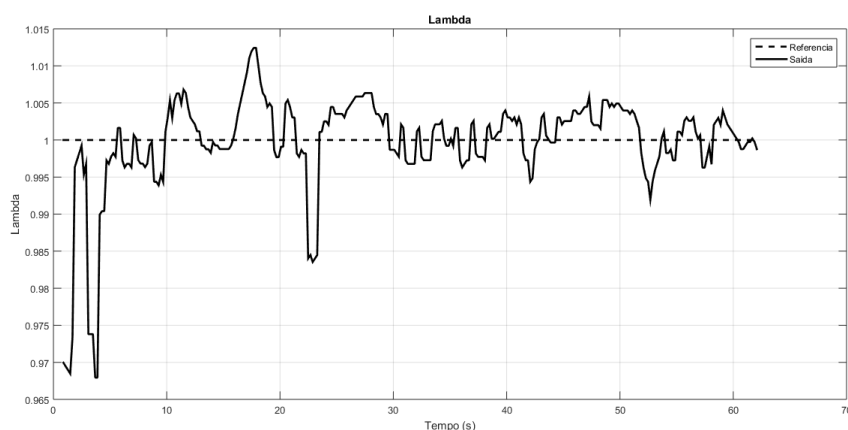
4. RESULTADOS

Para o teste do controlador da mistura ar e combustível, dois métodos foram considerados. O primeiro utilizou uma referência fixa de lambda e de rotação, sendo ambos os parâmetros forçados como referência para os controladores. O segundo teste é realizado com o motor em regime de aceleração, onde o controle de ETC estipula o valor de referência para o controlador da mistura ar e combustível.

4.1. Referência Fixa.

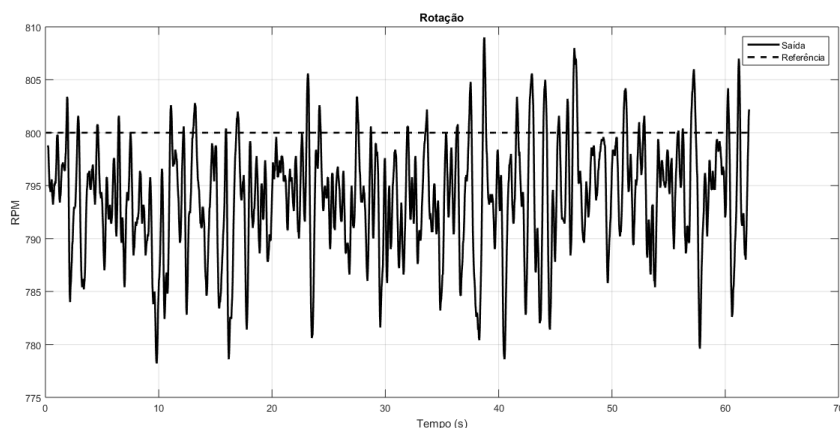
O teste foi realizado durante 60 segundos, o valor de lambda de referência foi mantido em 1, o valor de referência para o controle de rotação foi mantido em 800 RPM, a composição do combustível foi monitorada, e se encontrava com aproximadamente 58% de etanol, com o controle de composição ativado. Os valores de saída para Lambda e rotação são aplicados a um filtro de média móvel com janela de 5 amostras. Os resultados são ilustrados pelas figuras (7) resposta de lambda, (8) rotação e (9) composição.

Figura 7 Resposta da saída de lambda ao teste de regime estacionário.



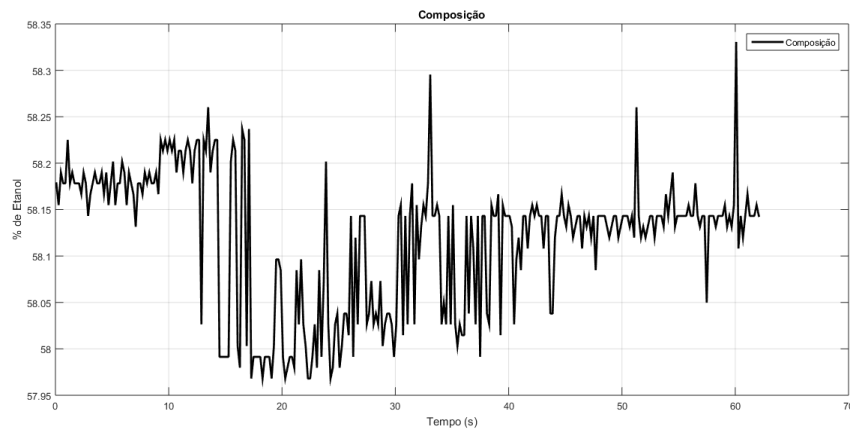
Fonte Autor.

Figura 8 Resposta da rotação ao teste de regime estacionário.



Fonte Autor.

Figura 9 Composição do combustível em (%) de etanol durante o teste de regime estacionário.



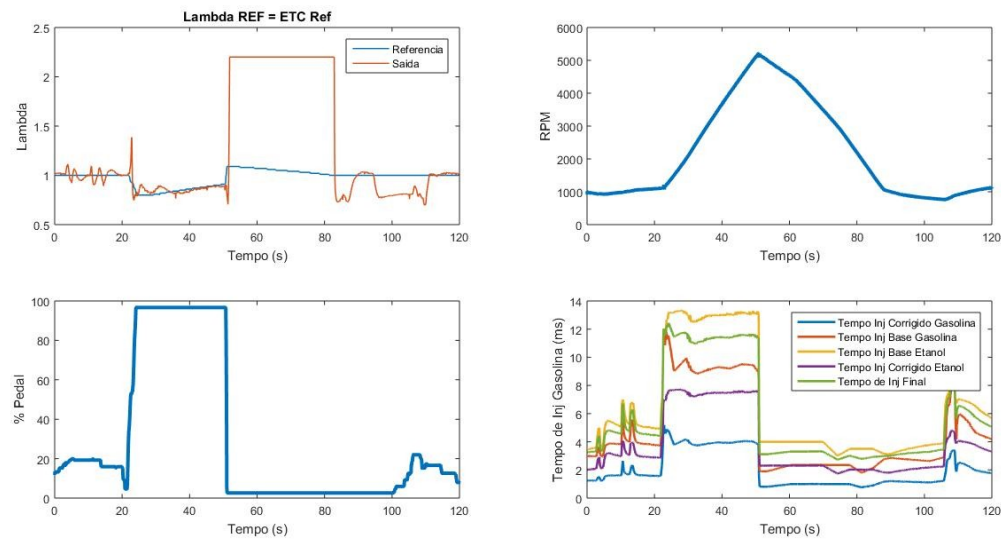
Fonte Autor.

Quando o controle de composição está ativo, a saída de lambda apresenta erro menor do que 1% desconsiderando o ruído de medição e a rotação apresenta erro menor do que 3%.

4.2. Regime de Aceleração

Para o teste do controle em regime de aceleração, foi realizada a aceleração do veículo a partir da marcha lenta até 5000 RPM, com o controle de composição ativo e a referência de lambda sendo estipulada pelo controle de rotação ETC. A figura (9) mostra a resposta de lambda em função da referência de ETC, a rotação do veículo, o sinal do pedal do acelerador e o tempo de injeção.

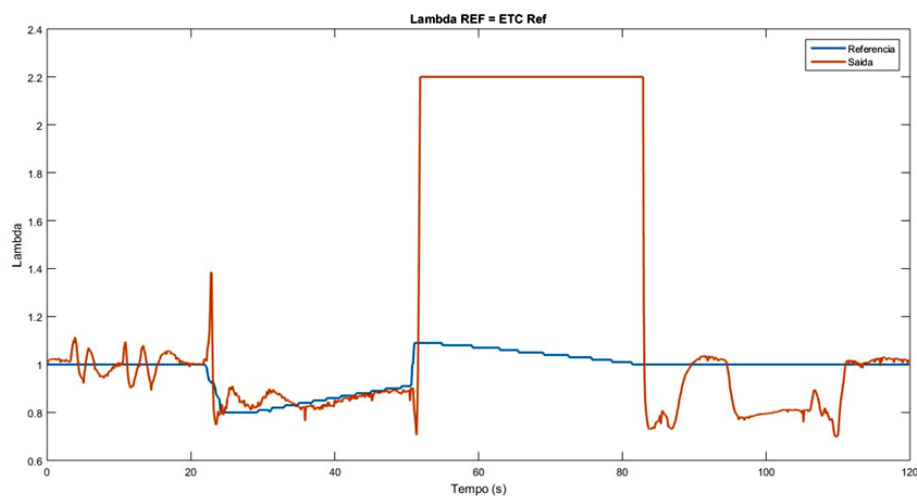
Figura 9 Teste de Aceleração. (a) valores de lambda de referência e saída, (b) rotação de saída do motor, (c) sinal do pedal do acelerador, (d) tempos de injeção final, corrigidos para gasolina e etanol e base para gasolina e etanol.



Fonte: Autor.

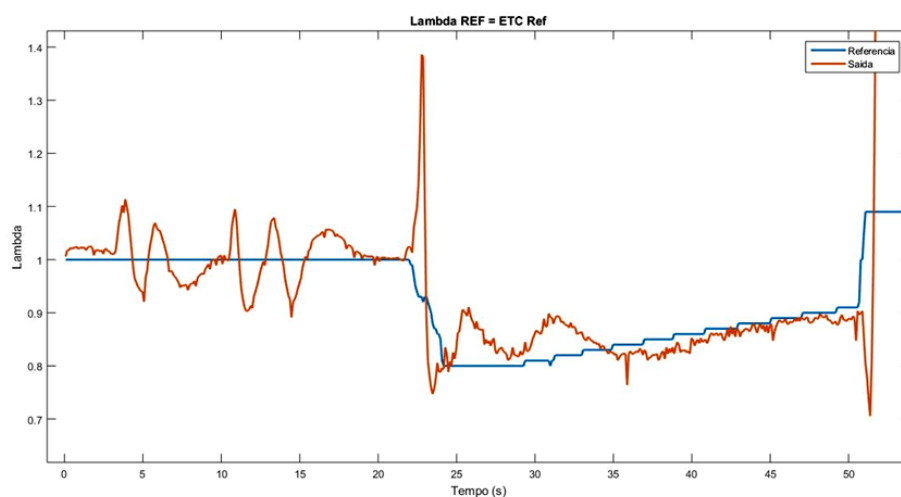
A figura (10) ilustra em detalhes a resposta de lambda em função da referência gerada pelo controle de ETC. O sinal alto, perto de 50 segundos, se refere à condição de corte de combustível durante a desaceleração. O pico inicial, perto de 20 segundos, se refere ao momento em que a válvula borboleta abre para atender à demanda de ar necessária para a aceleração, o que faz com que a massa de ar aumente abruptamente levando a um pico de 1.4 no fator lambda de saída, como ilustrado pela figura (10). Pode-se destacar também o valor da referência em degraus gerados pelo controle ETC ilustrado na figura (11) para atender a demanda de aceleração. Como esperado o valor de lambda de saída segue a referência de lambda. Sendo que a referência de lambda tende a um, conforme a demanda de aceleração é atendida.

Figura 10 Teste de Aceleração resposta de Lambda, (Azul) sinal de referência, (Vermelho) saída.



Fonte: Autor.

Figura 11 Teste de Aceleração referência de lambda do controle ETC, (Azul) sinal de referência, (Vermelho) saída.

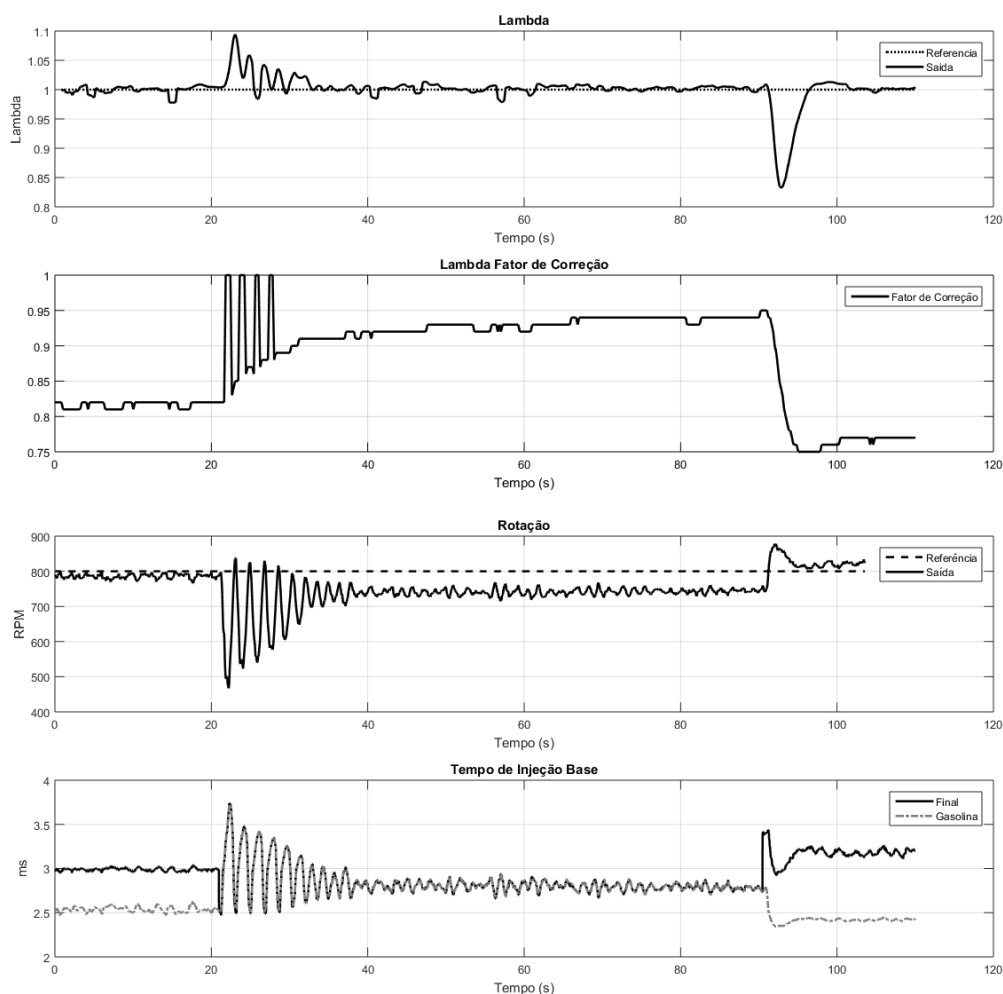


Fonte: Autor.

4.3. Transição

O teste de transição é realizado para se analisar a resposta do sistema a uma troca rápida na referência de composição. O procedimento empregado consiste em manter o motor estável com o controle de composição ativo no início do teste, a composição do combustível é de 58% de etanol, com aproximadamente 20 segundos de teste a referência de combustível é alterada para 100% gasolina, com aproximadamente 90 segundos a referência é alterada novamente para o controle de composição.

Figura 12 Teste de transição de referência de combustível, referência de $\lambda = 1$, referência de rotação = 800 RPM, composição do combustível 58% de etanol.



Fonte: Autor

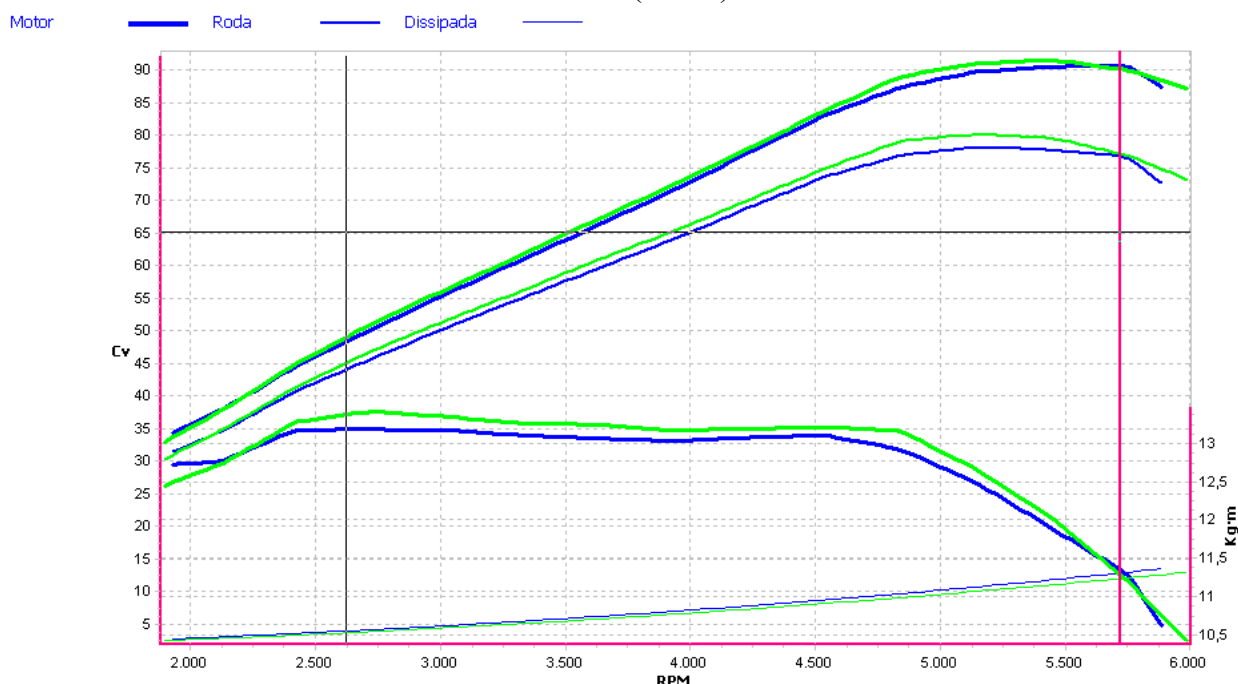
Como pode ser observado pela Figura (12) quando ocorre a transição da referência a rotação apresenta instabilidade e demora 20 segundos para estabilizar novamente, isso provoca com que o tempo de injeção também fique instável uma vez que este é função do erro de rotação, o controle da mistura em malha fechada então atua para estabilizar o tempo de injeção em torno do valor estequiométrico.

4.4. Comparação de torque e potência.

Os resultados a seguir comparam o torque e a potência da unidade de gerenciamento do motor original com a desenvolvida neste trabalho, o teste foi realizado utilizando um dinamômetro de rolo, a composição do combustível era de 58% de etanol, e a unidade original se encontrava adaptada para o combustível. A potência máxima alcançada pela unidade original foi de 90 Cv a 5700 RPM, a unidade deste trabalho conseguiu 91 Cv a aproximadamente 5400 RPM. Em relação ao torque máximo a unidade original alcançou 35 Kgm a 2500 RPM, a unidade deste trabalho conseguiu aproximadamente 37 Kgm a 2750 RPM. A figura (13) ilustra os resultados do teste de

potência e torque onde as curvas azuis representam a resposta com a unidade original e as curvas verdes a resposta obtida com a unidade deste trabalho.

Figura 13 Comparação de torque e potência entre a unidade original (Azul) e a desenvolvida neste trabalho (Verde).



Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs o desenvolvimento das estratégias de controle da mistura em malha fechada e de composição aplicados a ECU de desenvolvimento Flex-ECU, utilizando o *software* de aplicação Otto3 para realizar a implantação. O sistema foi então submetido a testes para validação de seus resultados.

Os resultados obtidos demonstram a eficiência das estratégias em regime estacionário, de aceleração e de transição. Obtendo erro menor do que 1% para Lambda de saída e de 3% para rotação em regime estacionário. Em relação ao teste de aceleração o sistema consegue seguir o valor estipulado pelo controle de rotação, mantendo o lambda necessário para que a mistura permita a aceleração do veículo, e depois estabilizando na referência quando a rotação de referência é alcançada. O teste de transição valida a redundância dos sistemas, sendo que o controle da mistura corrige o tempo de injeção mesmo quando um valor errado da composição é fornecido. Sendo assim o presente trabalho consegue resultados satisfatórios em relação à eficiência dos sistemas desenvolvidos.

O trabalho também obteve êxito em alcançar resultados similares em relação à potência e torque se comparado com a unidade original.

REFERÊNCIAS

- [1] B. ASHOK, S. D. ASHOK e C. R. KUMAR, “A review on control system architecture of a SI engine management system,” **ANNUAL REVIEWS IN CONTROL**, vol. 41, pp. 94-118, 2016.
- [2] A. K. AGARWAL, “Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal,” **PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE**, vol. 33, 2007.
- [3] S. M. SARATHY, P. OSSWALD, N. HANSEN e K. KOHSE-HOEINGHAUS, “Alcohol combustion chemistry,” **PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE**, vol. 44, 2014.
- [4] T. SARDARMEHNI, J. KEIGHOBADI, M. B. MENHAJ e H. RAHMANI, “Robust predictive control of lambda in internal combustion engines using neural networks,” **ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING**, vol. 13, pp. 432-443, 2013.
- [5] Y. YILDIZ, A. M. ANNASWAMY, D. YANAKIEV e I. KOLMANOVSKY, “Spark ignition engine fuel-to-air ratio control: An adaptive control approach,” **CONTROL ENGINEERING PRACTICE**, vol. 18, pp. 1369-1378, 2010.
- [6] E. M. FRANCESCHI, K. R. MUSKE, J. C. PEYTON JONES e I. MAKKI, “An adaptive delay-compensated PID air fuel ratio controller,” *SAE technical paper. No: 2007-01-1342*, 2007.
- [7] S. A. AL-SAMARRAIE e Y. K. ABBAS, “Design of electronic throttle valve position control system using nonlinear PID controller,” **International Journal of Computer Applications**, vol. 4, pp. 27-34, 2012.
- [8] X. YUAN, Y. WANG e L. WU, “SVM-based approximate model control for electronic throttle valve,” **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, pp. 2747-2756, 2008.
- [9] E. LARS e L. NIELSEN, “Non-linear model-based throttle control,” *SAE technical paper, No. 2000-01-0261*, 2000.
- [10] C. JACEK e C. JACEK, “A neural network model-based observer for idle speed control of ignition in SI engine,” **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, vol. 23, pp. 1-7, 2010.
- [11] J. ZHANG, T. SHEN e R. MARINO, “Model-based cold-start speed control scheme for spark ignition engines,” **CONTROL ENGINEERING PRACTICE**, vol. 18, pp. 1285-1294, 2010.
- [12] C. ENRICO, C. NICOLÒ, C. ALBERTO, C. FORTE, G. MANCINI, M. DAVIDE, P. FABRIZIO e V. RAVAGLIOLI, “*Transient spark advance calibration approach*,” **Energy Procedia**, vol. 45, pp. 967-976, 2014.
- [13] I. RADUCANU, D. AROTARITEI e L. DIMITRIU, “Adaptive control of the fuel injected per cycle and of the ignition advance for the spark ignition engine using fuzzy inferential systems,” *SAE technical paper. No. 2001-01-3384*, 2001.
- [14] J. YANKUN e B. LIU, “A study on ignition advanced angle control strategy of EFI gasoline engine,” *SAE technical paper. No. 2010-01-0244*, 2010.
- [15] M. F. DEMIRBAS e M. BALAT, “Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: A global perspective,” **ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT**, vol. 47, 2006.
- [16] M. GAUTAM e D. MARTIN, “Combustion characteristics of higher-alcohol/gasoline blends,” **PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART A-JOURNAL OF POWER AND ENERGY**, vol. 214, 2000.

- [17] W. HSIEH, R. CHEN, T. WU e T. LIN, "Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels," **ATMOSPHERIC ENVIRONMENT**, vol. 36, 2002
- [18] F. YUKSEL e B. YUKSEL, "The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine," **RENEWABLE ENERGY**, vol. 29, 2004.
- [19] G. NAJAFI, B. GHOBADIAN, T. TAVAKOLI, D. R. BUTTSWORTH, T. F. YUSAF e M. FAIZOLLAHNEJAD, "Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network," **APPLIED ENERGY**, vol. 86, 2009.
- [19] T. F. YUSAF e M. FAIZOLLAHNEJAD, "Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network," **APPLIED ENERGY**, vol. 86, 2009.
- [20] R. SUAREZ-BERTOIA, A. A. ZARDINI, H. KUEKEN e C. ASTORGA, "Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC)," **FUEL**, vol. 143, 2015.
- [21] S. PHUANGWONGTRAKUL, W. WECHSATOL, T. SETHAPUT, K. SUKTANG e S. WONGWISES, "Experimental study on sparking ignition engine performance for optimal mixing ratio of ethanol-gasoline blended fuels," **APPLIED THERMAL ENGINEERING**, vol. 100, 2016.
- [22] P. IODICE, A. SENATORE, G. LANGELLA e A. AMORESANO, "Effect of ethanol-gasoline blends on CO and HC emissions in last generation SI engines within the cold-start transient: An experimental investigation," **APPLIED ENERGY**, vol. 179, 2016.
- [23] L. GLIELMO, F. VASCA e C. ROSSI, "Architecture for electronic control unit tasks in automotive engine control," **PROCEEDINGS OF THE 2000 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER-AIDED CONTROL SYSTEM DESIGN**, pp. 42-47, 2000.
- [24] LEE, J H. 2003. Review on zirconia air-fuel ratio sensors for automotive applications. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**. 21, 2003, Vol. 38.
- [25] ROSSETTI, Pedro Castro e DOS SANTOS, João Pedro Freitas. 2015. Otto III by FlexECU – Gerenciamento Eletrônico de um Motor VW 1.6L. São Paulo : Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos., 2015.
- [26] B. S. PEREIRA, "Controle da mistura ar/combustível em um motor a combustão interna : sistema em malha fechada," São Paulo, 2015.