

# CONTROLE DA PROPORÇÃO AR/ COMBUSTÍVEL EM UM MOTOR COM TECNOLOGIA FLEX

Lucas Motta De Novaes<sup>1</sup>, Paulo Alexandre Pizará Hayashida<sup>1</sup> Armando Antônio Maria Laganá<sup>1</sup> João Francisco Justo Filho<sup>1</sup> e Pedro de Castro Rossetti <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

<sup>2</sup>ETAS

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

## RESUMO

O gerenciamento de um motor a combustão interna busca o compromisso entre performance, eficiência e baixos índices de emissão para automóveis. O controle da mistura ar/combustível tem impacto direto no funcionamento do motor, tanto para emissão de poluentes quanto no consumo específico e potência entregues ao veículo [4]. Este aspecto torna-se mais relevante ainda para motores bicomcombustíveis, por possuírem parâmetros variantes com a composição do combustível utilizado. Atualmente tal controle utiliza um sensor de oxigênio de banda estreita, permitindo apenas que se trabalhe com seu transiente. Este artigo adota a solução de utilizar uma sonda lambda de banda larga, a fim de aplicar controle também fora de regimes estacionários de rotação do motor a partir de valores absolutos de realimentação. O fato de não haver uma referência que precise estar sempre em transição, que ocorre no caso da banda estreita, possibilita a imposição de uma referência alvo que não seja apenas estequiométrica. Aliado a este controle, é utilizada uma correção baseada na medida do teor de etanol do combustível a ser consumido, de forma a eliminar intervalos sub-operacionais necessários para adaptação à composição de combustível em reabastecimentos e flutuações. Ao final é apresentada uma análise dos resultados gerados [2].

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a disponibilidade de combustíveis fósseis e as emissões de gases do efeito estufa aumentaram o interesse pelos biocombustíveis. O etanol, misturado com a gasolina, melhora as propriedades para a operação de motores de combustão interna, tendo um forte impacto sobre o desempenho do motor e por este motivo tem tido uma aceitação cada vez maior.

Para usufruir dos benefícios da mistura do etanol combustível requer uma adaptação do controle ar-combustível (A/C) e do controle de ignição. O sistema de controle deve considerar as propriedades da mistura de combustível, seja através de medição direta ou por estimativa. Especialmente, devido às diferentes propriedades do etanol e da gasolina, a estrutura de controle A/C deve ser adaptada à variabilidade do combustível

de maneira online, o que convencionalmente não é aplicado para motores naturalmente aspirados. Este artigo apresenta uma das possíveis soluções que podem ser empregadas para auxiliar no controle da mistura ar/combustível em um motor *Flex-fuel*.

Na primeira seção tratar-se-ão os aspectos básicos referentes à relação A/C. A segunda seção traz uma visão geral sobre o controle de formação da mistura A/C. A terceira seção descreve os métodos de correção e controle aplicados de forma prática. E por fim a quarta seção discute os resultados.

## 1. RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL

Uma visão simplista da operação de um motor à combustão interna é que o motor mistura ar e combustível. Esta mistura A/C é queimada liberando energia e trabalho através da expansão volumétrica dos gases e, como consequência desta produção de trabalho, tem-se as emissões de gases na atmosfera após o processo da combustão. A medida da mistura ar/combustível é importante tanto para a produção do trabalho quanto para o controle dos níveis de emissões.

### 1.1. Ar

O ar é constituído por diferentes gases, que consistem em oxigênio, nitrogênio, argônio, dióxido de carbono, dentre outros. O oxigênio é essencial em um motor, o processo de oxidação libera energia na forma de calor. Os outros gases são inertes e possuem efeitos mínimos na combustão, porém, abancam calor e espaço na câmara de combustão. A proporção de distribuição em volume e em massa estão listadas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Discriminação dos diferentes gases que constituem o ar.

Constituinte	Símbolo	Volume [%]	Massa[%]
Oxigênio	O <sub>2</sub>	20.95	23.14
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	78.09	75.53
Argônio	Ar	0.93	1.28
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.03	0.05

Fonte: [1]

Dos gases apresentados apenas o oxigênio é consumido pelo processo de combustão, o argônio, nitrogênio e o dióxido de carbono são expandidos de maneira elástica, gerando a pressão de trabalho para os motores de combustão interna.

### 1.2. Combustíveis

Os elementos químicos mais importantes dos combustíveis são o hidrogênio H e o carbono C, a junção entre os dois elementos é denominada como hidrocarboneto. Em alguns casos há a presença do oxigênio no combustível (caso dos álcoois). A maioria dos combustíveis para motores veiculares são hidrocarbonetos HC's, os quais permanecem em forma líquida sob condições

atmosféricas [1]. Os combustíveis mais utilizados em motores à combustão interna que possuem sistema de ignição à centelha (SI – *Sparked Ignition*) são a gasolina e o etanol, e suas principais propriedades físico-químicas estão listadas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Propriedades físico-químicas dos combustíveis gasolina e etanol.

<i>Propriedade</i>	<i>Gasolina E0</i>	<i>Etanol</i>
Concentração de carbono/oxigênio (%)	86 / 0	52 / 35
Densidade a 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	747	789
Resistência à detonação (RON)	92	111
Calor de combustão (MJ/Kg)	42.4	26.8
Ponto de ebulição (°C)	20 – 300	78.5
Constante dielétrica	2.0	24.3

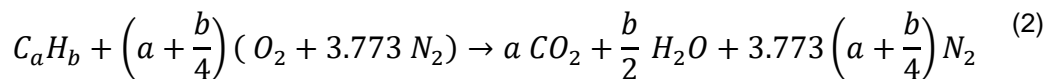
Fonte: [2] e [3]

### 1.3. Relação A/C estequiometria

A relação A/C expressa a proporção em massa entre o ar e a massa de combustível admitidos pelo motor para que haja a reação química de combustão.

$$A/C = \frac{m_a}{m_c} \quad (1)$$

Uma reação de combustão estequiométrica entre um combustível hidrocarboneto genérico  $C_aH_b$  e ar, deve obter como produtos a água e o dióxido de carbono como expresso pela Eq. (2).



Com base no cálculo da Eq.(2). As relações A/C estequiométricas são respectivamente definidas pelas Eqs. (3), (4) e (5) dos combustíveis gasolina E0RON95, gasolina E27 e etanol H100.

$$A/C_{\text{estequiométrica gasolina E0}} \cong 14,6 \quad (3)$$

$$A/C_{\text{estequiométrica gasolin E27}} \cong 12,5 \quad (4)$$

$$A/C_{\text{estequiométrica Etanol}} \cong 9,0 \quad (5)$$

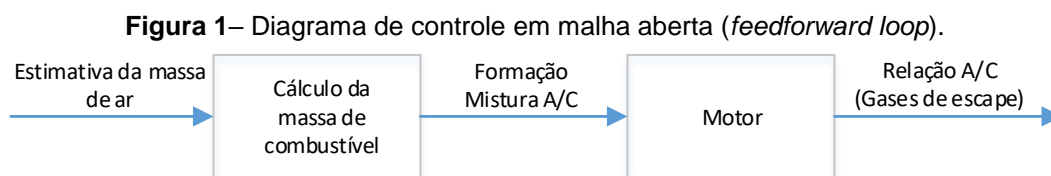
As relações estequiométricas do etanol e da gasolina são, portanto, referências para o controle da mistura A/C.

## 2. TRATAMENTO DA RELAÇÃO A/C

O controle da mistura ar/combustível de forma geral constitui-se por uma combinação entre o tratamento deste controle em ciclo aberto e o tratamento em ciclo fechado. O controlador da mistura A/C corrige o cálculo da largura de pulso que aciona a válvula injetora de combustível, dosando assim, a massa de combustível, com as apropriadas compensações [4].

### 2.1. Controle em ciclo aberto

O ciclo aberto (*feedforward loop*) para controle da mistura ar/combustível determina a quantidade de combustível a ser injetada em função de uma estimativa de massa de ar realizada pelo sistema de admissão do ar. Esta é uma abordagem está esquematizada na Figura 1.



Fonte: O autor

#### 2.1.1. Estimativa da massa de ar

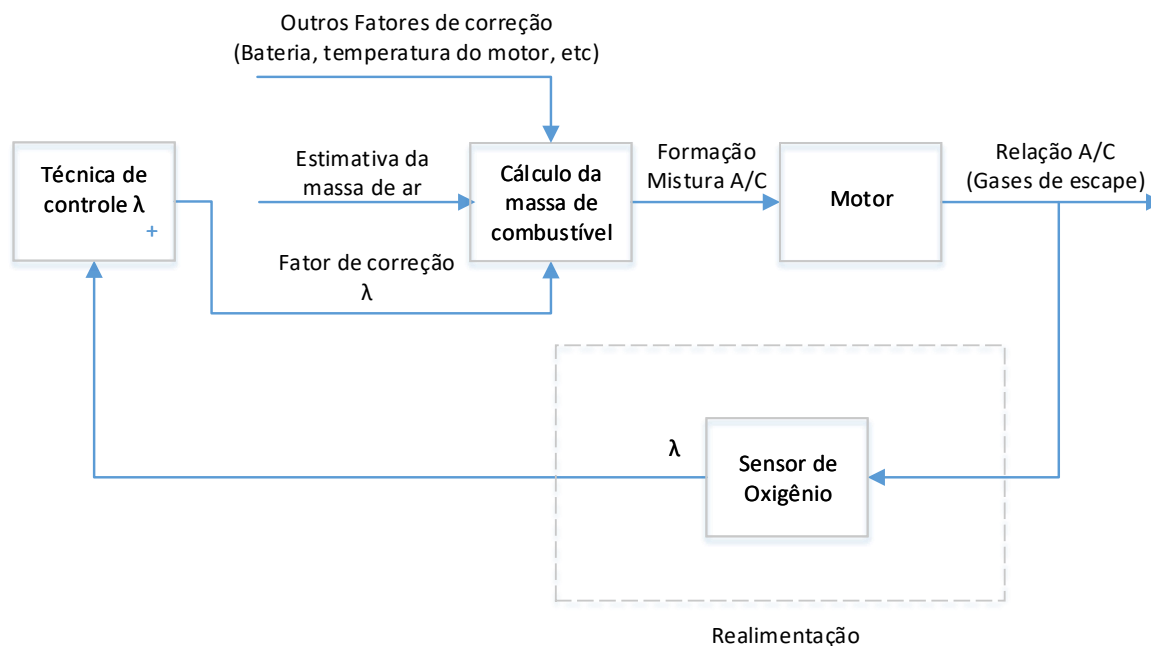
A massa de combustível preliminar é requerida para que se mantenha a combustão na região estequiométrica em função do fluxo de ar e pressão no coletor de admissão. Geralmente seguem-se duas técnicas para se estimar o fluxo de ar para o cilindro de um motor SI. Uma delas é a estratégia *speed density*. A partir do sinal MAP (*Manifold Absolute Pressure*) a equação dos gases perfeitos de Clapeyron é empregada para estimar a massa do ar entrante de maneira indireta, correlacionando a massa de ar com a pressão do ar presente no coletor de admissão e eficiência volumétrica do motor.

A outra técnica é a medição direta do fluxo de ar através do sensor MAF (*Manifold Air Flow*). Para maiores informações consultar [1] e [4].

### 2.2. Controle em ciclo fechado

O ciclo fechado (*feedback loop*) de controle de formação da mistura A/C é formado pelo conjunto união entre as abordagens *feedforward* e *feedback*. O ciclo em malha aberta determina em primeira instância o fluxo de combustível a ser consumido em função da quantidade de ar, o ciclo em malha fechada realiza correções de forma automática a fim de se alcançar uma determinada referência alvo.

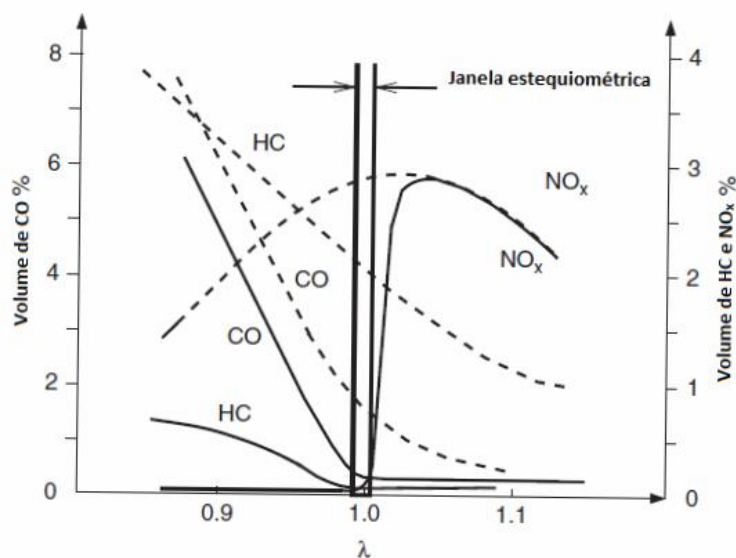
**Figura 2** – Diagrama de controle em malha fechada (*feedback loop*).



Fonte: O autor

Para os motores a combustão interna que empregam o ciclo Otto denominados como SI (*Sparked Ignition*), emprega-se o pós-tratamento para os gases de escape com um conversor catalítico de 3 vias o TWC (*Three Way Catalytic*). O principal objetivo do feedback loop é manter a relação A/C resultante da queima dos gases em um estreito intervalo denominado janela estequiométrica, onde obtém-se a maior eficiência de conversão dos três principais gases poluentes (Figura 3).

**Figura 3** – Representação da faixa de eficiência para conversão dos gases realizada por um catalisador de três vias.



FONTE: Adaptado de [1]

### 2.2.1.0 Sensor de oxigênio

Os sensores empregados no monitoramento da relação A/C medem o conteúdo de oxigênio nos gases de exaustão, para o qual é estabelecida uma relação  $\lambda$ . Para isto, a célula de Nernst é usada como elemento sensor. O princípio de medida é baseado na ideia de que na superfície do elemento sensor existe uma mudança de átomos de oxigênio para íons de oxigênio [1].



Popularmente conhecido como sonda *lambda*, este sensor mede o teor de oxigênio presentes nos gases expelidos no sistema de escapamento após a queima da mistura A/C, correlacionando-a em uma relação  $\lambda$  representada pela Eq. (7).

$$\lambda = \frac{A/C_{instantânea}}{A/C_{estequiométrica}} \quad (7)$$

O fator *lambda* é utilizado para que se possa determinar qual o estado da mistura consumida pelo motor. Quando o coeficiente *lambda* é menor do que 1 ( $\lambda < 1$ ), a mistura é denominada rica, significando que a mistura atual possui mais combustível do que a quantidade ideal para reagir com o oxigênio, sendo que a parcela que não foi consumida será perdida.

Por outro lado, quando *lambda* é maior do que 1 ( $\lambda > 1$ ), a mistura é denominada pobre, ou seja, a mistura atual possui uma quantidade maior de oxigênio do que a ideal para a reação com o combustível. Idealmente tem-se *lambda* igual a 1 ( $\lambda = 1$ ), quando a mistura A/C real é igual à mistura ideal, isto é, toda a mistura foi convertida pela reação química da combustão.

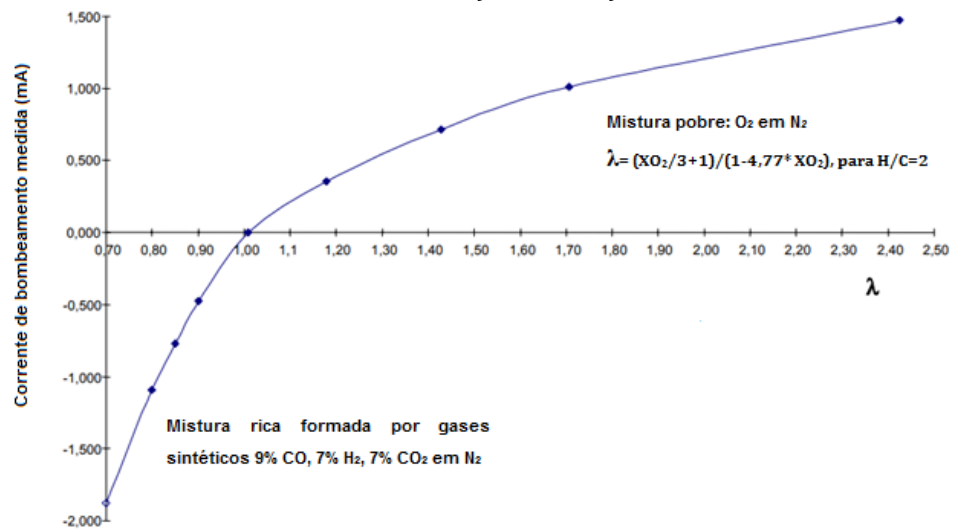
Utilizou-se um sensor de oxigênio de banda larga, devido a sua vasta aplicabilidade em motores de combustão interna, este tipo de sensor é denominado UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen) ou LSU (Lambda Sonde Universal) na designação alemã.

Segundo [7], um sensor de banda larga, que utiliza o princípio de corrente limitante, gera uma força eletromotriz que é medida na forma de tensão, de acordo com a Eq.(8):

$$U_{\lambda BL} = I_p R_b + \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O_2(ambiente)}}{p_{O_2(exaustão)}} \quad (8)$$

No entanto, a medida da relação *lambda* é realizada através da medição corrente de bombeamento  $I_p$ , a Figura 4 mostra os pontos de calibração do sensor, que é realizada com gases específicos, sendo a função  $f(x)$  uma interpolação linear entre estes pontos medidos.

**Figura 4** – Exemplo de calibração da corrente de bombeamento de um sensor *broad/wide band* em função da relação  $\lambda$ .



FONTE: Adaptado de [5]

### 3. MÉTODOS UTILIZADOS

#### 3.1. Controle A/C

Um *software* de aplicação denominado Otto III foi desenvolvido em [6] para um motor 1.6l I4, utilizando a ferramenta ASCET no desenvolvimento lógico do gerenciamento, tendo como alvo a utilização da unidade de comando programável FlexECU.

Posteriormente, utilizou-se a proposta de uma correção *feedforward* em função da constituição do combustível, tratando-a em separado na forma de componentes gasolina e etanol, a partir da disponibilidade da medida de volume percentual do etanol para a ECU (*Engine Control Unit*). Com este método pôde-se realizar interpolação entre parâmetros ótimos tabelados para a gasolina E27 como para etanol hidratado H100.

$$a_{ign} = (\%_{etanol} a_{ign\ etanol}) + [(100\% - \%_{etanol}) a_{ign\ E27}] \quad (9)$$

$$t_{inj} = (\%_{etanol} t_{inj\ etanol}) + [(100\% - \%_{etanol}) t_{inj\ E27}] \quad (10)$$

Os parâmetros corrigidos foram o avanço de ignição de forma concisa (limites conservadores por não haver correção de efeitos de *knock*) e o tempo de injeção de forma mais elaborada, suplementada pelo conjunto de controle de proporção da mistura A/C. Para mais informações acerca do sensor de volume de etanol consultar [2].

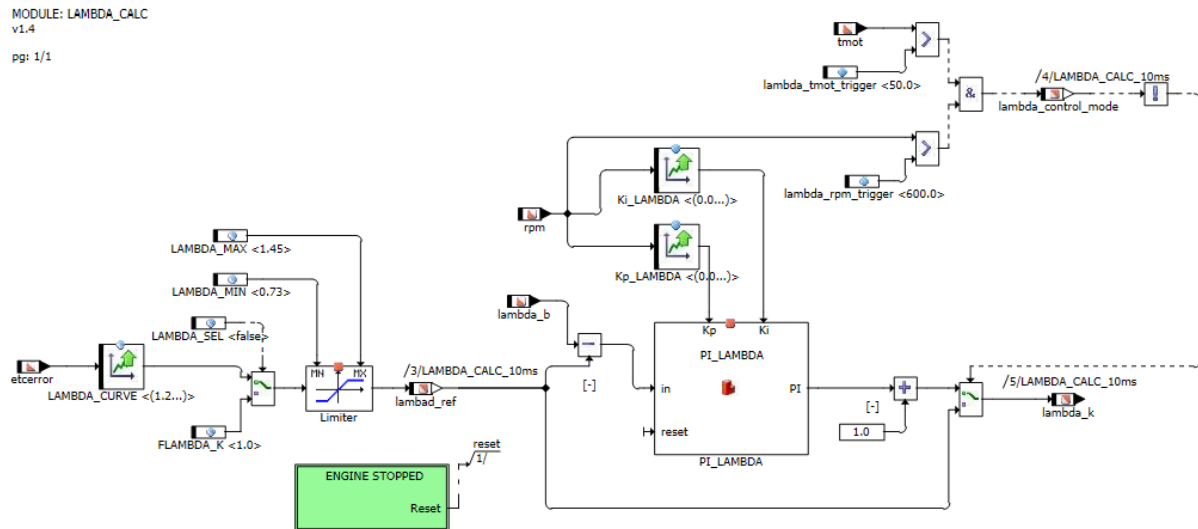
**Figura 5** –Diagrama de cálculo de correção para tempos de injeção em função do combustível.





rotacionado pelo motor de arranque no momento de partida. A Figura 7 exibe a estrutura de blocos utilizada do módulo lógico para controle da mistura A/C em malha fechada, denominado *LAMBDA\_CALC*.

**Figura 7** – Diagrama do módulo lógico para controle *LAMBDA\_CALC*.



Fonte: O autor

A relação *lambda* é endereçada em função do sinal de erro do modulo de controle de rotação pelo mapa *LAMBDA\_CURVE*. Os elementos deste mapa passam por um saturador que limita a excursões máxima e mínima da referência utilizada para o compensador PI, que possui como saída um ganho multiplicativo *que* é o principal fator corretivo para o tempo de injeção.

## 4. RESULTADOS

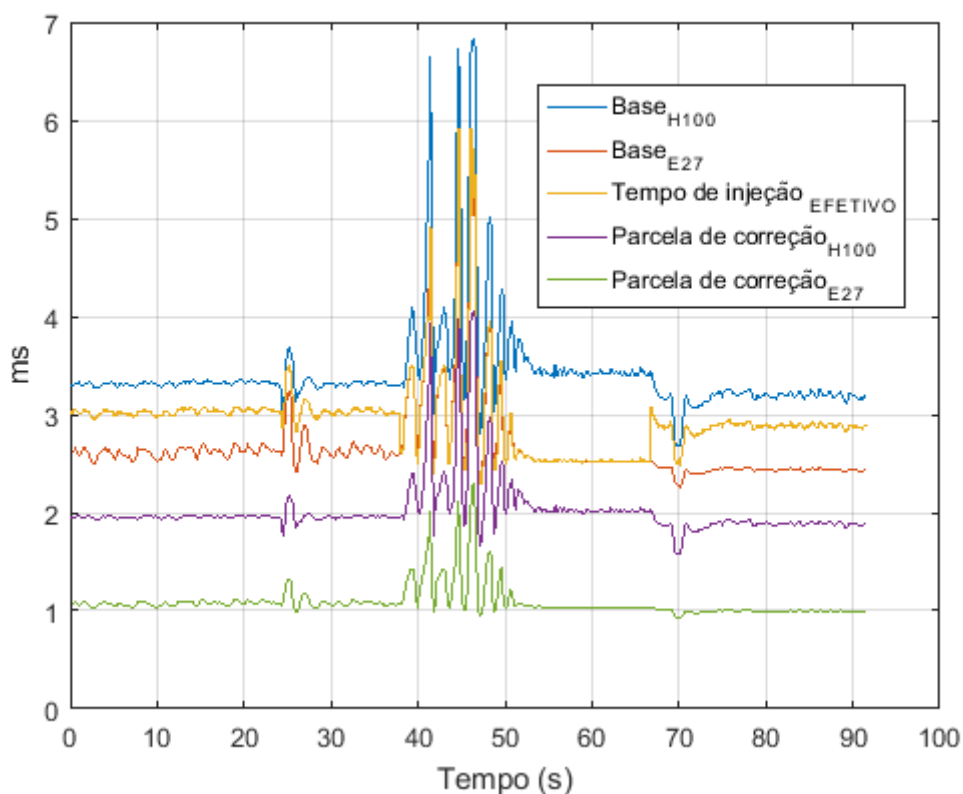
Nesta seção foram avaliados os efeitos de não se utilizar o método de interpolação para os parâmetros de controle no sistema de tratamento do controle da relação A/C. O intuito dos testes a seguir foi comparar o método utilizado de correção online em função do combustível com o efeito do período para adaptação do combustível em evento de reabastecimento. O volume de etanol presente no combustível utilizado durante os testes foi de 59%.

A operação e a obtenção de dados foram realizadas com o auxílio do sistema de calibração INCA (*INtegrated Calibration and Acquisition systems*).

### 4.1. Teste de uma composição de combustível intermediária com parâmetros da gasolina E27

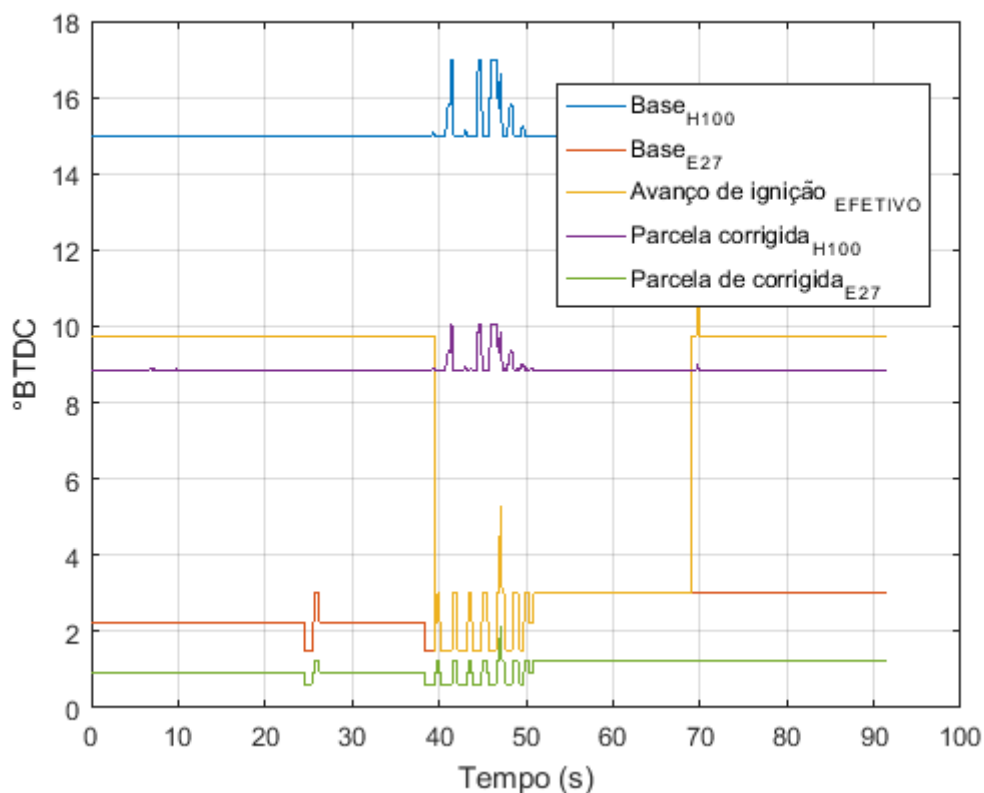
O tempo de injeção possui relação direta com a massa de combustível admitida pelo motor e consequentemente, com a relação ar combustível resultante. Foram pré-definidos os períodos de injeção (Figura 8) e avanços de ignição (Figura 9) relativos aos extremos que a composição do combustível poderia atingir (mapas base).

**Figura 8** - Valores tabelados de tempo de injeção e saída interpolada (teste simulado para E27)



Fonte: O autor

**Figura 9** – Valores tabelados de avanço de ignição e saída interpolada (teste simulado para E27)

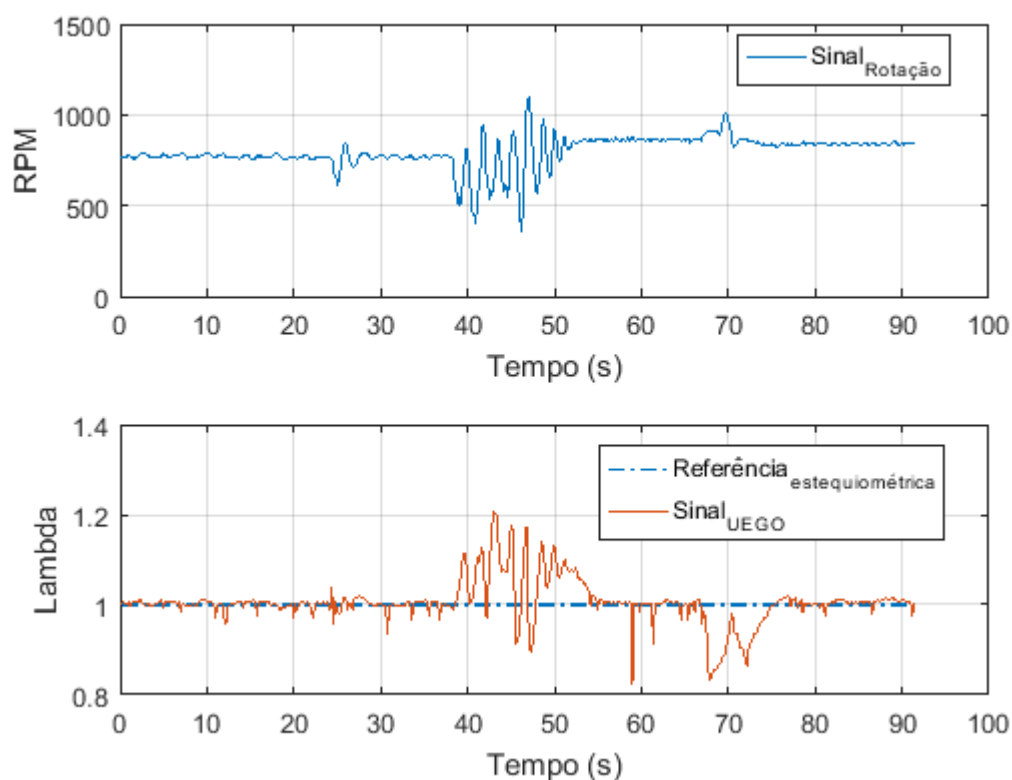


Fonte: O autor

Na Figura 9 estão representados os avanços de ignição tabelados nos mapas base para gasolina E27, etanol Hidratado H100 e avanço de ignição correspondente à medida instantânea do teor de etanol do combustível que alimenta o motor, ou seja, aquele que está presente na galeria de combustível.

Durante a janela de 39 a 52 segundos, foram impostos forçadamente o avanço de ignição (Figura 9) e o tempo de injeção (Figura 8) para valores respectivos à gasolina, como efeito, observou-se através do fator de medição  $\lambda$  (Figura 10) que no exato momento da transição da largura do pulso de injeção a mistura foi empobrecida devido a relação A/C da gasolina ser maior que a do etanol e, portanto, demandar menos combustível para uma quantidade ar ser aproximadamente igual.

**Figura 10** - Sinal de saída e referência do controle A/C (teste simulado para E27)



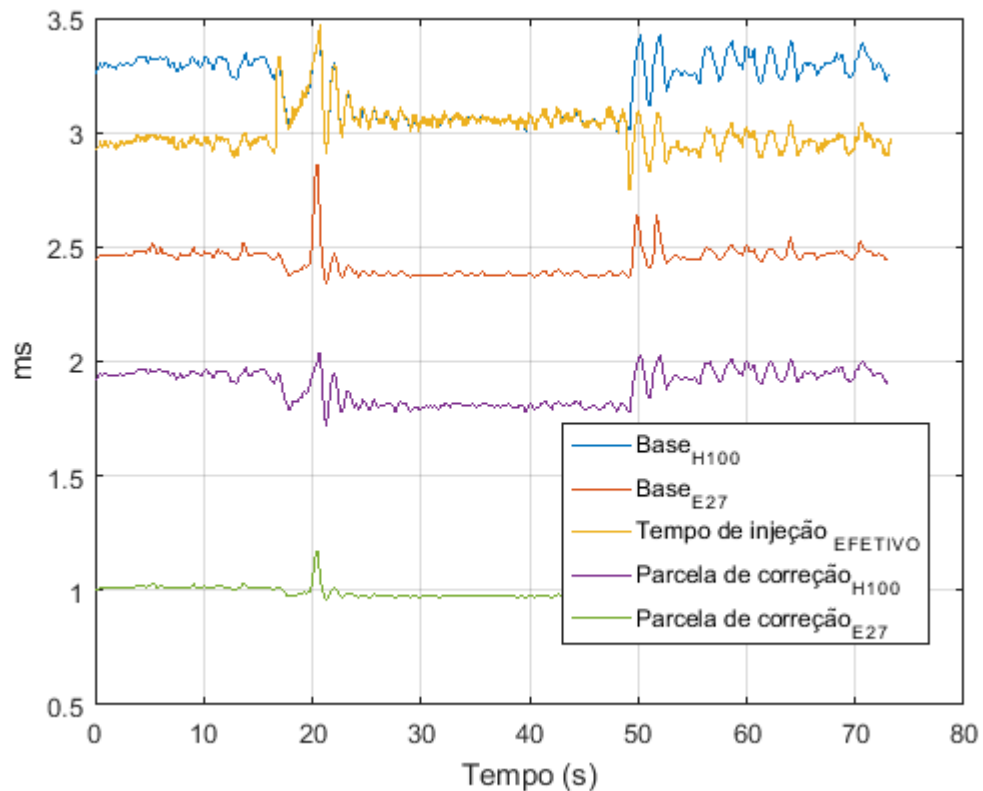
**Fonte:** O autor

Com isto obteve-se um comportamento oscilatório nos períodos de injeção e avanços de ignição em razão da não conformidade com o teor de etanol real do combustível. Posteriormente esse efeito foi compensado pelo controle da relação *lambda* após um período de 10 segundos.

#### 4.2. Teste de composição de combustível intermediária com parâmetros do etanol hidratado H100

Procedimento similar ao realizado na seção 4.1 foi repetido com o diferencial de simular um evento de reabastecimento anterior a uma adaptação feita ao etanol hidratado.

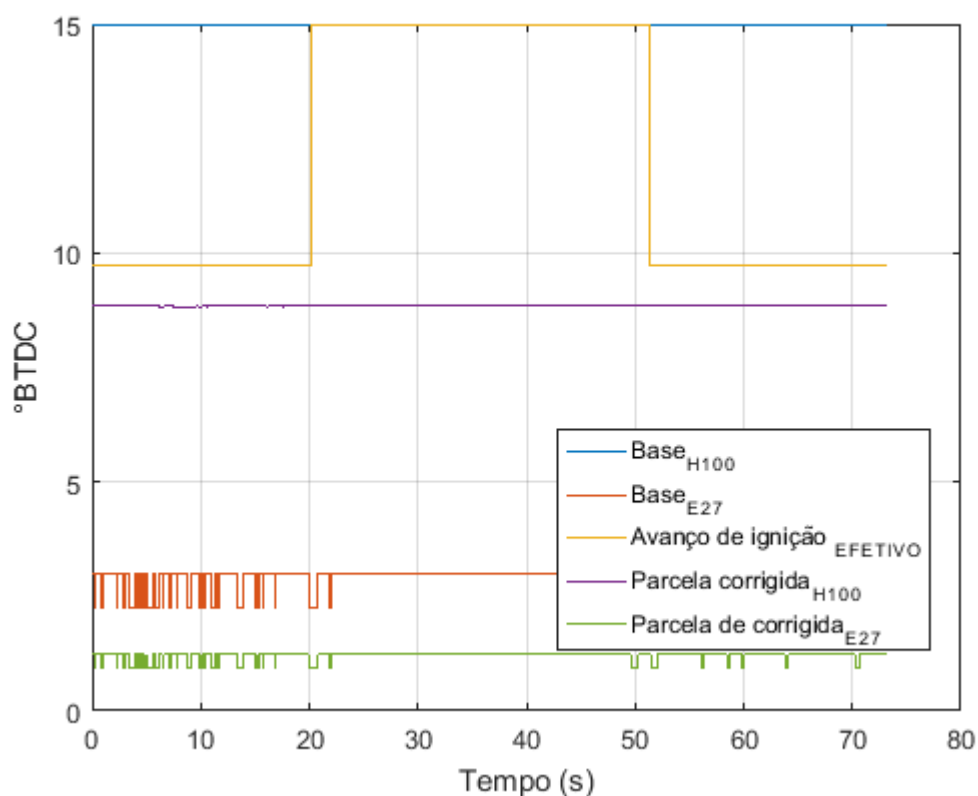
**Figura 11** - Valores tabelados de tempo de injeção e saída interpolada (teste simulado para H100)



Fonte: O autor

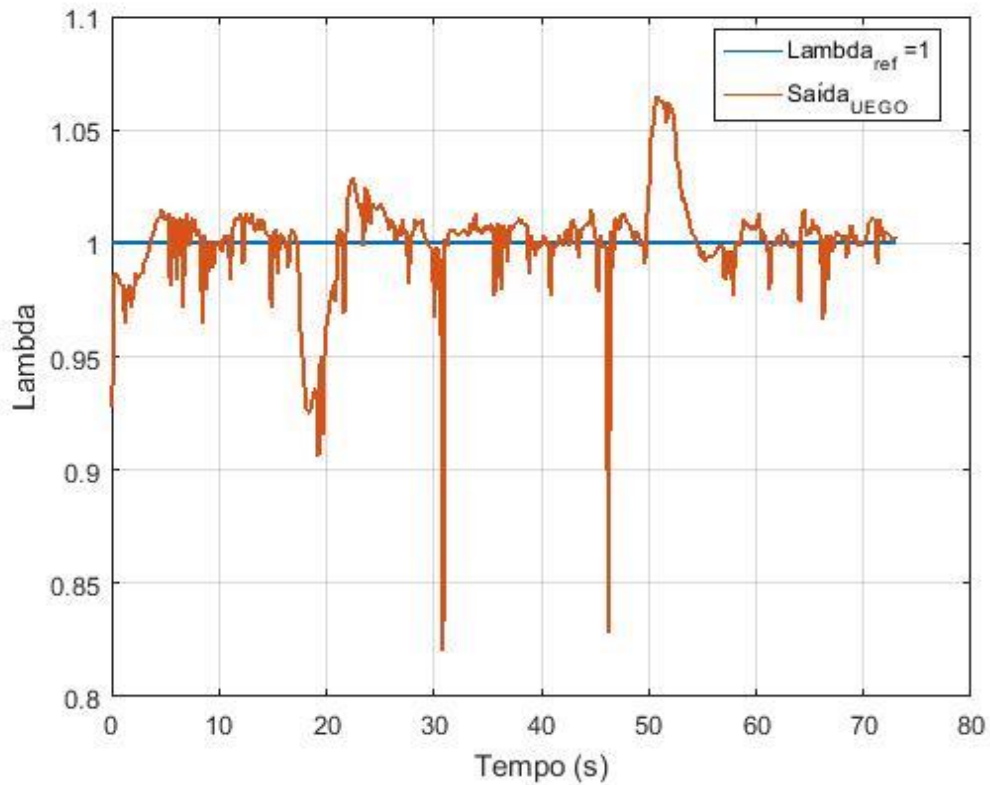
A Figura 11 exibe os tempos de injeção sendo forçados para a referência do etanol hidratado, exemplificando a mudança no teor de etanol quando a mistura estaria adaptada para o etanol.

**Figura 12** - Valores tabelados de avanço de ignição e saída interpolada (teste simulado para H100)



No espaço do período de 20 a 50 segundos, foram impostos forçadamente o avanço de ignição (Figura 12) e o tempo de injeção (Figura 11) para valores respectivos à gasolina, como efeito, observou-se através do fator de medição  $\lambda$  (Figura 13) que no instante de mudança da largura de pulso da injeção a mistura foi enriquecida devido a relação A/C estequiométrica para o etanol ser inferior à da gasolina e, portanto, demandar mais combustível para a mesma quantidade massa de ar.

**Figura 13** - Sinal de saída e referência do controle A/C (teste simulado para H100)

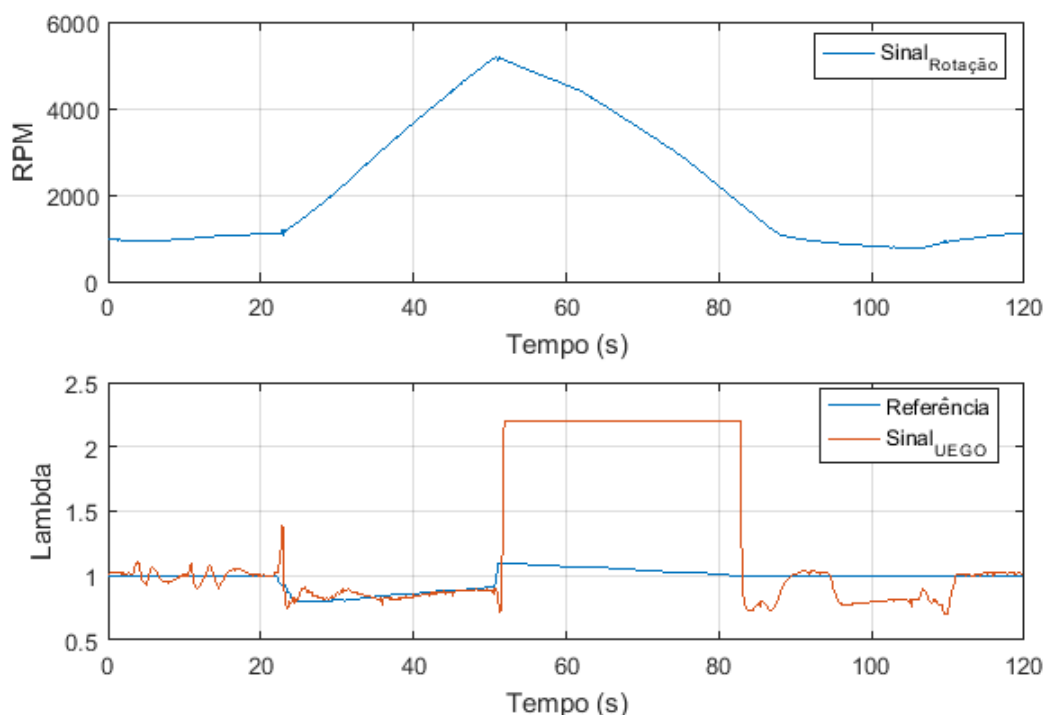


**Fonte:** O autor

#### 4.3. Teste de mudança de referência em aceleração brusca (*kickdown*)

O principal objetivo deste experimento era observar se o laço de controle de *lambda*, mesmo estando ativo se adequaria a uma repentina demanda de torque. A partir do sinal de excitação para o controle de rotação do motor através do sistema EGAS (acelerador eletrônico). A rotação foi incrementada da condição de marcha lenta (800 RPM) até a rotação de 5200 RPM, momento em que o sinal do pedal foi devolvido à condição de repouso para que ocorra a desaceleração e reestabelecimento da condição de marcha lenta

**Figura 14** – Saída de rotação em regime de aceleração e sinal de medição relação lambda.



Fonte: O autor

Na medição *lambda* exibida pela Figura 14 durante os instantes iniciais a rotação do motor encontrava-se em regime de marcha lenta com uma relação lambda que oscilava em torno de sua referência estequiométrica. O valor da relação lambda começa a ser alterado no instante de 25 segundos, o sinal medido passa a ser o de uma mistura enriquecida aos 27 segundos quando o sinal se torna empobrecido durante 30 segundos e posteriormente retorna ao ponto estequiométrico.

A diferença entre as rotações de referência e de saída constitui o erro do módulo ETC. Durante um regime transitório de rotação, a referência lambda torna-se dependente desse erro. Na detecção de um erro positivo pelo controle de rotação, é interpretada uma solicitação de aceleração. Através do sinal de pedal eletrônico, o ganho de enriquecimento da mistura endereçado, como efeito primário obtém-se o aumento da vazão de ar devido a rápida abertura aplicada na válvula borboleta, o que torna a mistura pobre durante este primeiro momento, após isto, a malha de controle detecta a alteração da referência a ser seguida, e o período de injeção é maximizado pela ação de controle para obtenção do enriquecimento da mistura com o aumento do fluxo de combustível para os cilindros, resultando em reações de combustões mais carregadas do ponto de vista energético, com a finalidade de acréscimo da rotação do motor e conseqüentemente do seu torque de saída. Quando o erro de rotação se torna negativo, obtém-se o processo inverso, a referência desejada para a relação lambda é atingir uma mistura empobrecida, para auxiliar na desaceleração do veículo, contribuindo em conjunto com a estratégia de *cut-off* para aplicação do chamado “freio motor” com a finalidade de se evitar sobressinais na aceleração do motor



## CONCLUSÃO

Ainda não foram realizados testes de emissões e nem estão sendo considerados ciclos de regeneração para o conversor catalítico devido à tecnologia do TWC não requerer tais procedimentos, porém, estima-se que as emissões estejam em níveis relativamente baixos em razão da referência estequiométrica, onde ocorre a maior eficiência das conversões catalíticas realizadas por um TWC.

Este artigo demonstrou uma abordagem para gerenciamento da mistura ar/combustível em um motor *Flex-fuel*, exemplificando como pode ser eliminado o tempo de adequação dos parâmetros de combustão na variância do tipo de combustível utilizado; e foi abordada uma aplicação de correção dos parâmetros de controle da combustão em função da composição de combustível

## REFERÊNCIAS

- [1] ERIKSSON, Lars; NIELSEN, Lars. **Modeling and control of engines and drivelines**. United Kingdom: John Wiley and Sons, 2014.
- [2] MCKAY, B.; VANVELZEN, I.; GUTH, C.; ACHLEITNER, E.; BIBER, P. An Onboard Ethanol Concentration Sensor for the Brazilian Market. **SAE Technical Papers Series**, 2012.
- [3] AHN, Kyung-ho; STEFANOPOULOU, Anna G. Estimation of ethanol content in flex-fuel vehicles using an exhaust gas oxygen sensor. **IEEE International conference on control applications**, 2011.
- [4] ASHOK, B.; DENIS ASHOK, I.; RAMESH KUMAR. A review on control system architecture of a SI Engine management system. **Annual review in control**, 2012.
- [5] ROSSETTI, P. C.; SANTOS, J.P.F. **Otto III by FlexECU – Gerenciamento Eletrônico de um Motor VW 1.6L**. Universidade de São Paulo, 2015.
- [6] BOSCH. **Planar Wide Band Lambda Sensor LSU 4.9**. 2005. pp. 1-13, Technical product information. 2005.
- [7] LEE, Jong Heun. **Review on zirconia air-fuel ratios for automotive applications**. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*. 2003, Vol. 38, 21, pp. 4247-4257. 2003.