



APLICAÇÃO DE CÁLCULOS MATEMÁTICOS PARA OTIMIZAÇÃO DOS PONTOS DE TROCA DE MARCHA EM UM VEÍCULO AUTOMOTOR, VISANDO A REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Carlos Henrique Fuscaldi Campos

Charles Quirino Pimenta

Pedro Américo Júnior

carlos.henrique@fcagroup.com

charles.pimenta@fcagroup.com

paamj@oi.com.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico, 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

Abstract. *Energy efficiency issues and performance are key items in development of powertrain and vehicle systems. In addition to these global trends and new objectives in the automotive industry, new government regulations, such as Brazil INOVAR AUTO program and the constant search for better products made by consumers, make the challenge even greater automotive engineering. Technologies applied to the development of powertrain systems are made by several manufacturers. In some cases, the models and concept employed achieve better performance, or better efficiencies consumption, but not always all features at the same time, even with multiple simulation capabilities.*

A methodology designed to provide better energy efficiency and conserve the performance characteristics will be presented in this work. The procedures are described used for the calibration of engine control systems and exchange, resulting the best compromise of handling and gear changes with the view of better consumption. They will be presented the basic stages and the gains made in developing a configuration applied to a point display system for gear changes or Shift Point - GSI (Gear Shift Indicator). In this paper we will discuss the procedures and results applied the configuration that best compromise objective of autonomy and energy efficiency.

Keywords: *Gear Shift Indicator, Consumo, Combustível, Shift Point*

1 INTRODUÇÃO

Os temas eficiência energética bem como desempenho são itens fundamentais no processo de desenvolvimento dos sistemas de *powertrain* e veículos. Além dessas tendências mundiais e novos objetivos na indústria automotiva, as novas regulamentações governamentais, como o programa brasileiro INOVAR AUTO e a constante busca por melhores produtos feita pelos consumidores, tornam o desafio da engenharia automotiva ainda maior. Tecnologias aplicadas ao desenvolvimento de sistemas de *powertrain* são apresentadas por vários fabricantes. Em alguns casos, os modelos e conceito empregados atingem melhores performances, ou melhores eficiências de consumo, mas nem sempre todas as características ao mesmo tempo, mesmo com vários recursos de simulação.

Uma metodologia desenvolvida para proporcionar uma melhor eficiência energética e conservar as características de desempenho será apresentada neste trabalho. Serão descritos os procedimentos usados para a calibração dos sistemas de controle do motor e câmbio, resultando o melhor compromisso de dirigibilidade e trocas de marcha com a ótica de melhor consumo. Serão apresentadas as etapas fundamentais e os ganhos obtidos no desenvolvimento de uma configuração aplicada a um sistema de indicação de pontos para trocas de marcha ou *Shift Point – GSI (Gear Shift Indicator)*. Neste trabalho serão discutidos os procedimentos e resultados aplicados a configuração que objetiva melhor compromisso de autonomia e eficiência energética.

2 DESENVOLVIMENTO

Serão apresentados os estudos e resultados obtidos em uma aplicação com motor 1,8 L 16v, aspirado. Nesta etapa, será descrita a análise de torque x consumo do motor para obter as melhores condições propostas de trocas de marcha em dinamômetro de bancada. Apresentaremos a metodologia para análise, cálculo e simulação, utilizando uma ferramenta computacional desenvolvida em ambiente MATLAB®.

2.1 DEFINIÇÃO DOS *SHIFT POINTS* EM FUNÇÃO DOS DADOS DE DINAMÔMETRO

Este trabalho de definição dos *Shift Points* foi dividido em algumas etapas: experimentação e pós processamento.

2.1.1 EXPERIMENTAÇÃO

1) Entendimento do fenômeno físico;

O consumo horário de combustível do motor pode ser expresso como uma função da rotação e da quantidade de ar aspirado a cada ciclo. A rotação determinará o número de ciclos por segundo e a pressão do coletor influenciará no rendimento volumétrico e posteriormente na carga de ar do motor.

Ao aplicar a relação estequiométrica de ar-combustível sobre o valor da carga de ar e multiplicar pelo número de ciclos por segundo, obteremos o consumo horário do motor.

Desta forma o experimento deverá conter variações da rotação do motor e da pressão no coletor, de forma a reproduzir variações da carga e do número de ciclos, para que seja possível modelar suas características.

Foram utilizados modelos como forma de representar os dados, para obter melhores resultados através da redução das incertezas de medição e do tempo de desenvolvimento.

A literatura científica especializada disponibiliza diversos modelos que podem ser empregados na modelagem dos fenômenos envolvidos para este tipo de aplicação.

Neste caso, podem ser utilizados modelos polinomiais ajustados por regressão linear, redes neurais e modelos analíticos baseados na fluidodinâmica do sistema de aspiração para a predição da carga de ar.

O modelo a ser empregado é o modelo polinomial, por ser um modelo de emprego mais simples. Além disso, modelos deste tipo oferecem como vantagem principal uma maior disponibilidade de informações sobre seus métodos de implementação além de um custo de implementação computacional mais baixo. No entanto, possuem como desvantagem a necessidade de empregar modelos de ordens elevadas para que seja possível modelar sistemas com dinâmica complexa.

2) Escolha dos pontos de experimentação;

Os pontos experimentais foram escolhidos tomando como base as rotações do mapa da estratégia da ECU (*Electronic Control Unit*).

Sua escolha objetiva garantir um erro mínimo de predição nos modelos utilizados na fase de pós-processamento, para as rotações utilizadas na função que controla o GSI (*Gerar Shift Indicator*) e nas rotações principais do motor.

3) Realização do experimento em dinamômetro;

O experimento realizado no dinamômetro, consistiu em medir o consumo horário em 11 condições de rotação e 10 condições de pressão do coletor, totalizando 110 pontos de operação do motor. O ensaio foi feito sob condições controladas de temperatura do ar ambiente em 20 °C, ar de aspiração em 40 °C e fluido refrigerante em 90 °C.

Foram medidas a pressão atmosférica local, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido para que se calculasse o fator de correção da potência e do torque lidos. Logo, todos os resultados apresentados foram corrigidos para as condições referenciais de temperatura e pressão ao nível do mar.

Utilizou-se para isto uma cela de testes equipada com dinamômetro AVL® ativo (Figura 1), medidor de combustível, controle de temperatura do combustível, controle de temperatura do ar aspirado e do ar ambiente, controlador de pedal, e sistema de automação do dinamômetro, supervisor e sistema de aquisição de dados.



Figura 1: Exemplo de Dinamômetro de Bancada AVL® Ativo.

A medição do consumo de combustível foi realizada em regime de operação constante do motopropulsor, de maneira automatizada por computador.

O tempo de aquisição é estabelecido de forma a manter a incerteza de medição em um valor inferior a 2%, desta forma, tem-se um tempo de aquisição variável com a rotação e a carga no motor.

Foram colhidas informações de no mínimo 3 ensaios em cada ponto ou região em análise do motor para que seja realizada a avaliação da dispersão dos resultados.

4) Verificação e validação dos dados experimentais;

Aplicou-se alguns critérios de avaliação sobre a qualidade dos dados: estabilização da temperatura de saída dos gases de escape, dispersão dos valores instantâneos de torque, dispersão dos valores medidos nas repetições da prova, dispersão da razão de mistura ar-combustível ao redor do valor estequiométrico e outros.

5) Repetição dos pontos experimentais insatisfatórios;

Alguns pontos necessitam ser readquiridos após a avaliação dos critérios de validação dos dados experimentais, pois podem apresentar alguma inconformidade ou dispersão.

Nesta situação, realiza-se um ensaio extra com aquisição apenas nestes pontos.

Após a etapa de experimentação, com todos os dados validados e corrigidos, passa-se a etapa de pós processamento das informações coletadas ao laboratório.

2.1.2 PÓS PROCESSAMENTO

Todo o pós processamento dos dados foi realizado em ambiente MATLAB® com o uso de alguns *toolboxes*.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi elaborada uma ferramenta com interface gráfica, o que permite a fácil reutilização do código em projetos subsequentes e o registro do *know how* adquirido com a atividade.

O processamento dos dados e sua posterior transformação em calibração é dividido nas etapas a seguir:

1) Organização dos dados;

Esta etapa compreende a ordenação, tabulação dos dados coletados e conversão de unidades de medida.

Desta maneira pode-se trabalhar com o resultado dos experimentos como um único bloco de dados organizado e padronizado que permite seu posterior arquivamento e reutilização de maneira simples e rápida.

2) Ajuste dos parâmetros e coeficientes do modelo escolhido;

Nesta etapa, os dados coletados de consumo são empregados para modelar o comportamento do motor em todas as suas condições de operação.

Utilizam-se dados do veículo como relações de marcha e diferencial para o cálculo do *shift point*. Os principais dados empregados no modelo são a rotação do motor, o torque efetivo medido, o consumo horário de combustível, o torque indicado medido.

Os dados de consumo horário (kg/h) são modelados segundo um modelo polinomial com variáveis independentes: rotação e o torque médio efetivo medido.

Como o modelo é linear nos parâmetros estes podem ser determinados pelo processo de regressão linear múltipla pelo método de mínimos quadrados. A modelagem é necessária para tratar os erros e flutuações de medição para que se produza um mapa de trocas mais regular e suave.

$$CONS(CME, RPM) = A(RPM) \times CME^2 + B(RPM) \times CME + C(RPM) \quad (1)$$

Onde:

CONS: Consumo Horário Modelado [kg/h];

CME: Torque Médio Efetivo Medido [Nm].

Os coeficientes A, B e C são obtidos através das seguintes equações:

$$A(RPM) = w_1 \times RPM^2 + w_2 \times RPM + w_3 \quad (2)$$

$$B(RPM) = w_4 \times RPM^2 + w_5 \times RPM + w_6 \quad (3)$$

$$C(RPM) = w_7 \times RPM^2 + w_8 \times RPM + w_9 \quad (4)$$

Onde:

RPM: Rotação do motor [rpm];

w_n : Coeficientes do Polinômio obtidos por minimização do somatório do erro ao quadrado entre os dados e a simulação do modelo para CME, CME^2 e Consumo horário de combustível [kg/h].

Uma vez que os dados de consumo horário foram modelados, calcula-se o consumo específico [g/cv.h] a partir deste utilizando a equação encontrada em Heywood.

$$ESPCONS = \left(\frac{1000 \times CONS}{\frac{RPM \times CME}{7026}} \right) \quad (5)$$

Onde:

ESPCONS: Consumo Específico Modelado [g/cv.h].

A partir desta etapa, construiu-se o mapa de consumo horário em função da rotação e do torque medido no eixo.

O mapa de consumo foi construído na unidade de gramas por segundo e pode ser visualizado na Figura 2.

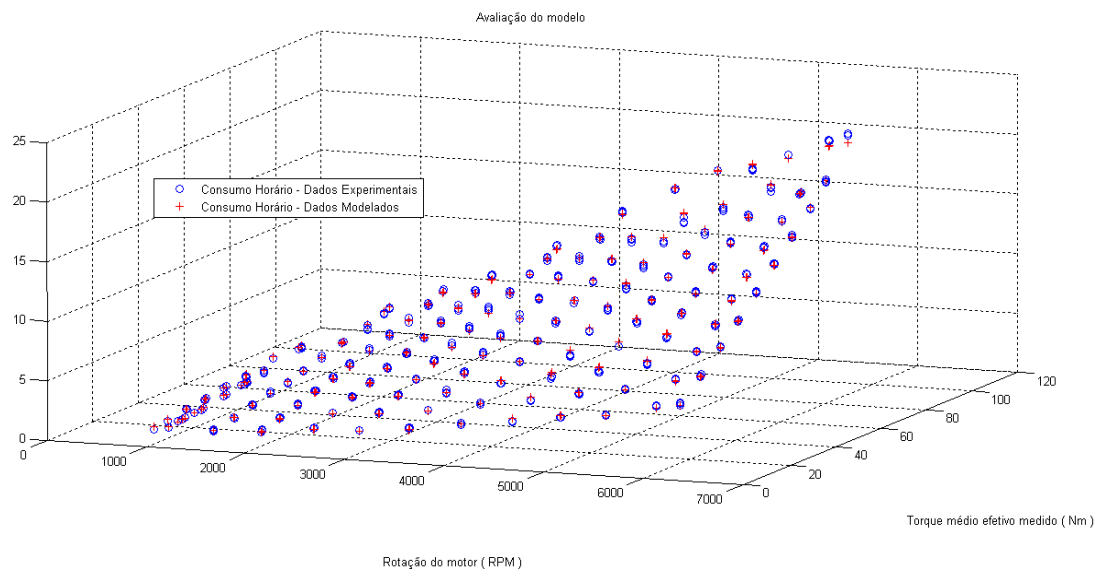


Figura 2: Comparativo entre o Consumo Horário Medido x Consumo Horário Modelado.

3) Avaliação do modelo;

O modelo obtido foi confrontado com os dados experimentais e foi avaliado segundo parâmetros estatísticos comuns para avaliação de modelos de predição: o coeficiente de adequação R^2 , a média e a variância do erro e o somatório do erro quadrático.

R^2	0,99937
Média do erro	-0.0049 kg/h
Variância do erro	0,0021 kg/h
RMSE	0,0099 kg/h

Tabela 1. Parâmetros Estatísticos empregados para avaliação e validação do modelo obtido.

A análise que pode ser feita é sobre o valor da coluna R^2 . Esta é uma medida do grau de proximidade entre os valores estimados e observados, sendo portanto uma medida do sucesso da estimativa, o R^2 é próximo de 1 se o ajuste da regressão é perfeito, ou próximo de zero caso contrário.

Em nosso caso obtivemos um valor de 0,99937 para este coeficiente, o que indica fortemente que o ajuste do modelo empregado está bom.

4) Cálculo dos mapas de calibração;

Para a geração dos mapas de calibração foram construídos 5 modelos de consumo, sendo um para cada velocidade do câmbio. Estes modelos foram construídos através da conversão da rotação do motor em rotação aplicada à roda, através das relações de cada marcha e diferencial, para cada velocidade do câmbio.

Os pontos de troca de marcha são valores de torque efetivo em função da rotação e da marcha atual, e a sua escolha consiste em encontrar o ponto de interseção entre os mapas de consumo de duas marchas subsequentes.

Desta forma o sistema irá sugerir a marcha que oferecerá o consumo ótimo para aquela condição.

Calcula-se a rotação na roda correspondente aplicando a relação de marcha final para a marcha corrente.

$$Nroda = RPM_n \times RelMarcFinal_n \quad (6)$$

Onde:

$Nroda$: Rotação da roda do veículo [rpm];

RPM_n : Rotação do motor para marcha n [rpm];

$RelMarcFinal_n$: Relação de marcha final para a marcha n.

Em seguida calcula-se a rotação do motor após a mudança de marcha utilizando a relação da próxima marcha e a rotação na roda obtida em (6).

$$RPM_{n+1} = Nroda \times RelMarcFinal_{n+1} \quad (7)$$

Onde:

RPM_{n+1} : Rotação do motor para marcha n+1 [rpm];

$RelMarcFinal_{n+1}$: Relação de marcha final para a marcha n+1.

Calcula-se o consumo específico para todas as condições de torque para as duas rotações no motor obtidas em (6) e (7).

$$ESPCONS_n = ESPCONS[RPM_n, CME] \quad (8)$$

$$ESPCONS_{n+1} = ESPCONS[RPM_{n+1}, CME] \quad (9)$$

Onde:

$ESPCONS_n$: Consumo específico modelado para marcha n [rpm];

$ESPCONS_{n+1}$: Consumo específico modelado para marcha n+1 [rpm];

O *Shift Point* para *Up Shift* é definido como valor de torque onde o consumo de combustível do motor em RPM_{n+1} fica inferior que o consumo na condição RPM_n .

Caso contrário, se o consumo de combustível do motor em RPM_n fica inferior que o consumo na condição RPM_{n+1} é definido um *Down Shift*.

A Figura 3 ilustra esta lógica, onde estão representadas as curvas de consumo a 2000 rpm para 4ª, 3ª e 5ª marchas. Também estão representados os pontos de troca, através da linha vertical (trocas *Up Shift* e *Down Shift*).

Os pontos de troca foram escolhidos de forma que se obtenha um menor consumo de combustível ao se efetuar o *shift*.

Uma pequena histerese é adicionada para que se garanta a economia mesmo na presença de erros de estimativa do modelo empregado. Este método é então repetido para cada rotação do motor, obtendo assim duas curvas de torque de troca para cada marcha: uima curva de *Up Shift* e uma curva de *Down Shift*.

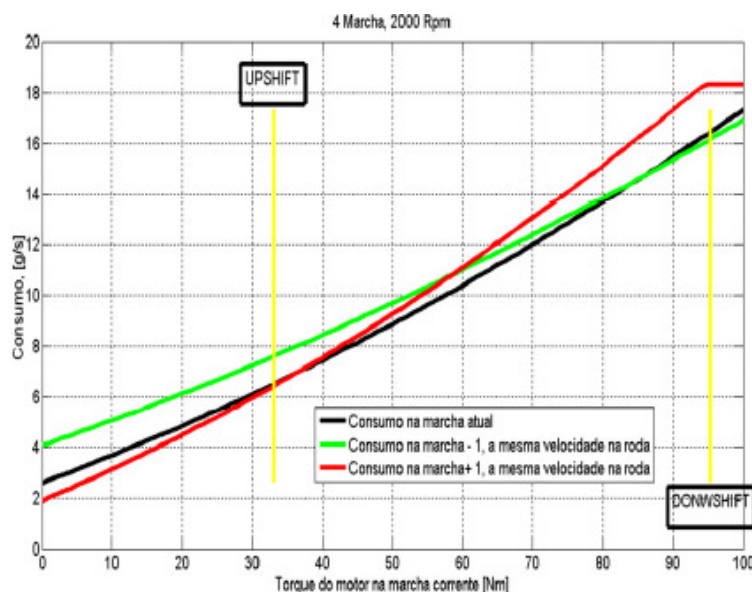


Figura 3: Pontos de troca sugeridos pelo modelo (*Up Shift* e *Down Shift*).

Na Figura 4 está representado o gráfico de consumo de terceira marcha. A região delimitada acima desta curva corresponde a região de menor consumo em quarta marcha, enquanto abaixo indica a região de trabalho de terceira marcha.

O cursor do gráfico recomenda a troca para quarta marcha e indica a região em que o motor irá trabalhar após a mudança, o percentual de economia de combustível é indicado no *box* superior.

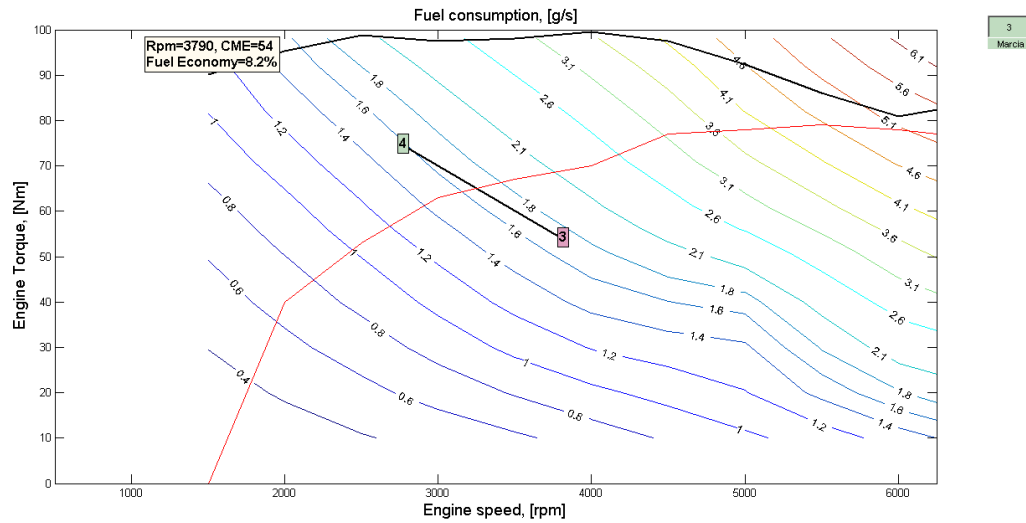


Figura 4: Gráfico de consumo para terceira marcha com regiões de trabalho e troca de marcha sugeridas.

Este mapeamento é realizado então para cada uma das marchas do veículo, resultando em um mapa de torque de troca de marchas em função da marcha e da rotação.

Este mapa é a conjunção das curvas de troca de cada marcha em uma única superfície. Na Figura 5 é demonstrado a representação de um mapa de torque de troca para *Up Shift*, para cada marcha e rotação de trabalho do motor.

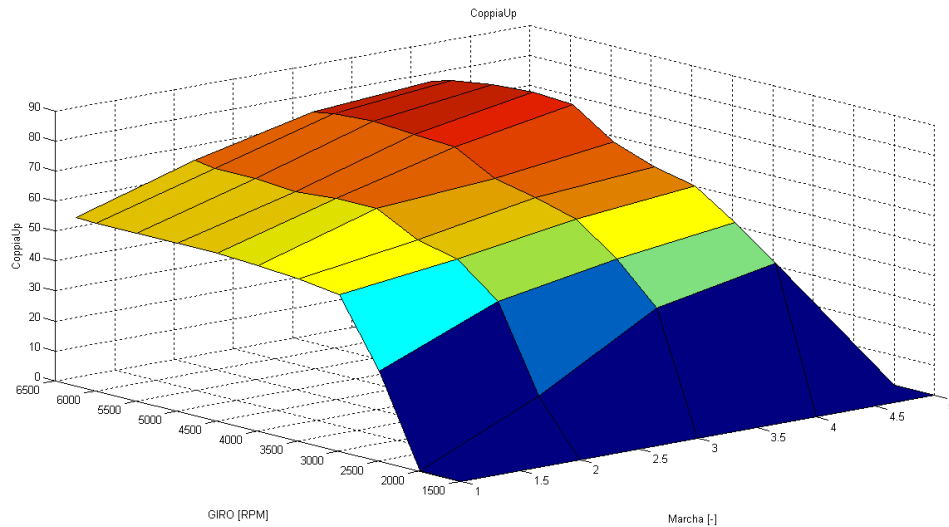


Figura 5: Mapa de torque de trocas *Up Shift* para cada marcha e região do motor.

Foram construídos um total de quatro mapas: dois mapas de *Up Shift*, um para o motor operando com combustível álcool (E100) e outro para quando o motor estiver operando com combustível gasolina (E22), e dois mapas de *Down Shift*, um para o motor operando com combustível álcool e outro para quando o motor estiver operando com combustível gasolina.

3 RESULTADOS

Após a definição uma calibração inicial para o mapa de trocas de marcha, o veículo foi submetido a avaliações comparativas de consumo, considerando sua calibração inicial x a calibração dos mapas de troca de marcha proposto.

Tais avaliações foram realizadas em laboratório rastreado de emissões e consumo, sobre um ciclo padrão FTP 75 (*Federal Test Procedure*) + ciclo *Highway*.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados para as medições de consumo de combustível. Os dados são apresentados de forma percentual comparativa, indicando a melhora atingida se comparada com os valores de referência (*Shift Point* 25-40-65-72 km/h).

Combustível	Ciclo de Medição	
	FTP 75	<i>Highway</i>
E22	6,1 %	4,6 %
E100	2,2 %	2,1 %

Tabela 2. Resultados de medição de consumo Ciclos FTP 75 e *Highway*.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados atingidos e com o conhecimento adquirido durante os estudos realizados, foram observados os seguintes pontos principais em destaque:

- Para sistemas dotados de GSI, torna de extrema importância a elaboração de uma metodologia de calibração clara e criteriosa para que os objetivos de projetos sejam atingidos. Principalmente se considerarmos as novas tendências de desenvolvimento com o incremento de conteúdos tecnológicos mais complexos e a necessidade constante de otimização de recursos e prazos utilizando ferramentas computacionais e de simulação;

- Os resultados de consumo oriundos dos testes em ciclo padronizado, demonstraram resultados satisfatórios e significativos. A metodologia desenvolvida com os modelos e simulações oriundos da calibração em dinamômetro, com as propostas geradas através dos modelos matemáticos e ferramenta de simulação desenvolvida no ambiente MATLAB® se mostrou eficiente para esta finalidade.

Agradecimentos

Os autores generosamente agradecem o apoio da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – e a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG.

REFERENCIAS

Heywood, John B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: MacGraw-Hill, 1988, XXIV, 930pg.

Rask, E. and Sellnau, M., *Simulation-Based Engine Calibration: Tools, Techniques, and Applications*. SAE Technical Paper Series, SAE 2004-01-1264.

Dhaou, I., B., *Fuel Estimation Model for ECO-Driving and ECO-Routing*. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV), Baden-Baden, Germany 5-9,2011.

Chung D. at all, *Dynamic Analysis and Simulation of Driveability and control os a double transition shifting system*. 978-1-4244-2601-0/09 – IEEE, 2009.

Kirtane, C. at all, *Gear Shift Schedule Optimization and Drive Line Modeling for Automatic Transmission* – 1st Internacional and 16th National Conference on Machines and Mechanisms, IIT Roorkee, India 18-20 2013.

Lumsden G. at all, *Mapping Complex Engines*. SAE Technical Paper Series, SAE 2004-01-0038.

Montgomery D., *Design And Analysis Of Experiments*. 5Th Edition – Jhon Wiley & Sons 1997.