

# ESTUDO E PROPOSIÇÃO PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DO MOTOR FLEX-FUEL.

**Humberto Yuki Higa**  
humbertohiga@gmail.com

*Resumo: Em termos ambientais, o automóvel Flex-Fuel é imbatível na questão da redução das emissões do gás carbono que causam o efeito estufa. Basicamente, o que é liberado durante a combustão do etanol, retorna à cana de açúcar através da fotossíntese, sendo assim, é considerado como um combustível que agride menos ao meio ambiente já que o ciclo do carbono se fecha. Como existe a flexibilidade do motor, o motorista também poderá escolher em abastecer com a gasolina de acordo com o preço que lhe convém, principalmente em períodos de entre safras. O Flex-Fuel revolucionou o mercado brasileiro, tanto nas questões ambientais quanto comerciais. Porém, ainda existe espaço para melhorias tecnológicas do Flex-Fuel. Usualmente, os fabricantes de automóveis do Brasil, privilegiam uma taxa de compressão para um tipo de combustível, ou então usam uma taxa de compressão intermediária nos motores de combustão interna do tipo Flex-Fuel. Ambos os casos, de uma forma ou outra, o motor não funciona de forma que privilegie o baixo consumo de combustível, já que a taxa de compressão sempre é mantida constante tanto para a gasolina, quanto para o etanol. Dessa forma, o motor consumirá mais combustível se comparado a um automóvel exclusivamente a gasolina ou a álcool, principalmente quando a base de comparação for o álcool, já que o Flex-Fuel, muitas vezes possui uma eficiência térmica menor que um carro exclusivamente à álcool. O intuito do presente trabalho é estudar o funcionamento dos motores Flex-Fuel, modelar matematicamente uma combustão do motor através do software Scilab e propor alternativa de downsizing para melhor aproveitamento do combustível no que diz respeito ao menor consumo.*

**Palavras chave:** Motor de Combustão Interna (MCI), Flex-Fuel, Rendimento, Consumo, Etanol, Downsizing.

## 1. Entendendo o consumo maior do motor Flex-Fuel

A importância do rendimento térmico está relacionado ao desempenho do motor e a sua economia. A potência efetiva do motor pode ser calculada como:

$$N_e = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot \eta_{Térmico} \cdot \eta_{Mecânico} \quad (1)$$

$$N_e \Rightarrow \text{Potência efetiva}$$

$$\dot{m}_c \Rightarrow \text{Vazão do combustível}$$

$$PCI \Rightarrow \text{Poder calorífico inferior}$$

$$\eta_{Térmico} \Rightarrow \text{Rendimento térmico}$$

$$\eta_{Mecânico} \Rightarrow \text{Rendimento Mecânico}$$

Como se observa, a potência do motor é diretamente proporcional ao rendimento térmico. A economia, ou seja, o consumo específico (kg/cv h), está relacionado pela fórmula:

$$C_e = \frac{632}{PCI \cdot \eta_{Térmico} \cdot \eta_{Mecânico}} \quad (2)$$

Normalmente, o PCI do álcool é menor que a da gasolina, o que contribui com a menor potência efetiva. Porém, para compensar este efeito, o rendimento térmico do motor exclusivamente a álcool é maior, pois trabalha com taxa de compressão maior. Sendo assim, a potência específica é equivalente ou maior que o motor exclusivamente a gasolina. Considerando o motor Flex, observamos que o rendimento térmico se mantém constante, já que a taxa de compressão não varia com os dois combustíveis. Como o rendimento térmico é o mesmo, e o PCI do álcool é menor e para que não haja modificações em sua potência efetiva, pela fórmula (10), uma das únicas formas é aumentando a vazão do combustível, ou seja, aumenta-se o consumo de combustível. Também aumenta o consumo específico. É por isso que o carro Flex possui um consumo muito mais excessivo que um motor exclusivamente a álcool.

## 2. Características de cada combustível.

Tabela 1: Características da gasolina

Gasolina	
Calor específico (kJ/kg)	34900
RON	91
MON	80
Razão estequiométrica Ar/Comb.	14,5
Calor latente de vaporização(kJ/kg)	376 a 502
Temperatura de ignição(°C)	220

Tabela 2: Características do etanol.

Etanol	
Calor específico (kJ/kg)	26700
RON	109
MON	98
Razão estequiométrica Ar/Comb.	9
Calor latente de vaporização(kJ/kg)	903
Temperatura de ignição(°C)	420

## 3. Motivação.

Como foi escrito inicialmente, motores Flex tendem a consumir mais e e algumas emissões tendem a ser maiores se comparados a modelos monocombustíveis.

Temos pela tabela:

Tabela 3: Chevrolet Monza 1989  
(fonte: revista Mecânica Março/89)

Chevrolet Monza 1.8 1989		
km/h	álcool	gasolina
60	11,9	17,4
80	10,6	16
100	9,5	14,1
120	8,5	11,8

Tabela 4: Chevrolet Vectra 2010  
(fonte: Best Cars)

Chevrolet Vectra 2.0 Flex 2010		
km/h	álcool	gasolina
60	8,8	12,4
80	8,1	11,3
100	7,4	10,2
120	9,1	6,6

Observa-se que um Chevrolet Monza SL/E de 1989 monocombustível, com toda limitação tecnológica da época com o uso do carburador, consegue ser mais econômico que um Vectra atual com motorização Flex. Ambos os motores são equivalentes, pertencem à Família II da linha GM. No Monza a álcool, em média,

consegue ser 21% mais econômico que um Vectra Flex utilizando álcool. No Monza a gasolina, a economia chega a impressionantes 46% frente ao Vectra Flex utilizando gasolina. Quanto ao níveis de emissões, têm-se:

Tabela 5: Ford Focus 1.6 Flex  
(fonte:CONAMA 2010)

Ford Focus 1.6 (Flex)	
NMHC (g/km)	0,032
CO(g/km)	0,347

Tabela 6: Ford Focus 2.0 Gasolina  
(fonte:CONAMA 2010)

Ford Focus 2.0 Gasolina	
NMHC (g/km)	0,015
CO(g/km)	0,086

Tabela 7: Toyota Corolla 1.6 gasolina  
(fonte:CONAMA 2010)

Toyota Corolla 1.6(gasolina)	
NMHC (g/km)	0,032
CO(g/km)	0,162

Tabela 8: Toyota Corolla 1.8 Flex  
(fonte:CONAMA 2010)

Toyota Corolla 1.8 Flex	
NMHC (g/km)	0,039
CO(g/km)	0,552

Nota-se que em motores Flex, as emissões de monóxido de carbono são maiores que seus equivalentes a monocombustível. No Ford Focus, os níveis de emissões desse gás, chegam a ser 188,37% maiores que o modelo equivalente. Mesmo o modelo monocombustível tendo uma cilindrada maior, que em tese, deveria poluir mais que o motor 1.6. Quanto ao Toyota Corolla, a diferença chega a impressionantes 340% maiores. Emissões de monóxido de carbono também é um indicativo que o combustível é subaproveitado.

#### 4. Modelagem.

Inicialmente, a Wiebe propôs uma equação que representa a taxa da queima do combustível. Temos a seguir:

$$x(\theta) = 1 - \exp \left[ -a \cdot \left( \frac{\theta - \theta_1}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (3)$$

Segundo HEYWOOD (DE MELO, 2007), o uso de valores de  $a = 5$  e  $m = 2$  se mostraram bastante adequados.

Estabelecidos os parâmetros, define-se a quantidade total de energia fornecida ao sistema, segundo HEYWOOD(DE MELO, 2007). Sendo assim, tem-se:

$$Q_{Total} = \eta_{combustão} \cdot m_{combustível} \cdot PCI \quad (4)$$

Sendo que  $\eta_{combustão}$  é a eficiência da combustão,  $m_{combustível}$  é a massa do combustível e PCI é o poder calorífero inferior do combustível.

Essa mesma fórmula pode ser substituída por:

$$Q_{Total} = \eta_{combustão} \cdot \left( \frac{m_{mistura}}{1 + \frac{m_{ar}}{m_{combustível}}} \right) \cdot PCI \quad (5)$$

$$m_{\text{mistura}} = m_{\text{combustível}} + m_{\text{ar}} \quad (6)$$

Sendo que  $m_{\text{ar}}$  é a massa do ar admitido.

Segundo ALLA (DE MELO, 2007), a eficiência da combustão  $\eta_{\text{combustão}}$  pode ser determinada por:

$$\eta_{\text{combustão}} = \eta_{\text{máxima}} \cdot (-1,6082 + 4,6509 \cdot \lambda - 2,0764 \cdot \lambda^2) \quad (7)$$

E segundo HEYWOOD (DE MELO, 2007), a eficiência máxima de combustão  $\eta_{\text{máxima}}$  para um motor a ignição por centelha é de cerca de 90%.

Combinando as equações de Wiebe com a da quantidade total de energia fornecida, tem-se uma formulação do fornecimento da energia em função da posição do girabrequim. Tem-se:

$$Q_{\text{Total}}(\theta) = Q_{\text{Total}} \cdot x(\theta) \quad (8)$$

Porém, deve se considerar a perda de calor pelas paredes do cilindro por convecção, dessa forma, obtêm-se a energia útil:

$$Q_{\text{Útil}}(\theta) = Q_{\text{Total}} \cdot x(\theta) - Q_{\text{convecção}}(\theta) \quad (9)$$

Pelo princípio da transmissão de calor (KREITH, 1958), a perda de calor por convecção se dá através da seguinte expressão:

$$Q_{\text{convecção}}(\theta) = hA(\theta)(T(\theta) - T_{\text{paredes}}) \quad (10)$$

Tem-se uma equação proposta por Woschni (DE MELO, 2007):

$$h = 0,013 D^{-0,2} P^{0,8} T^{-0,53} v_g^{0,8} \quad (11)$$

Sendo que:

$$v_g = 2,28 v_p + 0,00324 (P - P_o) V_d T_1 / (P_1 V_1) \quad (12)$$

$$v_p = 2NS \quad (13)$$

Para o cálculo do calor específico, segundo HEYWOOD (DE MELO, 2007), a variação do calor específico é função da temperatura e obedece a seguinte expressão:

$$c_p(T) = a_0 + a_1(\ln T)^1 + a_2(\ln T)^2 + a_3(\ln T)^3 + a_4(\ln T)^4 + a_5(\ln T)^5 \quad (14)$$

Para o interesse do presente trabalho, as constantes estão apresentadas na seguinte tabela (DE MELO, 2007):

Tabela 9: Constantes dos coeficientes do calor específico.

Elemento	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
Etanol	-12834,48	10834,12	-3579,02	578,33	-45,6	1,41
Gasol	-8102,97	7963,2	-2923,24	509,14	-42,28	1,35
Gás carbono	-1412,37	1288,47	-452,81	77,55	-6,44	0,21
Oxigênio	10228,34	-7184,92	2010,87	-279,69	19,35	-0,53
Nitrogênio	-7513,36	5708,38	-1712,17	254,3	-18,7	0,54
Água	-11780,76	8490,52	-2414,78	339,34	-23,54	0,65

Sendo que *Gasol*, é a gasolina brasileira vendida com adição de 25% de volume de etanol.

Ainda, têm-se (DE MELO, 2007, HEYWOOD, 1988):

$$k = \frac{c_p}{c_p - R} \quad (15)$$

Para uma mistura de gases, pode-se fazer uma média ponderada para a mistura (DE MELO, 2007), ou seja, um calor específico equivalente:

$$c_p = \frac{\sum c_{p_i} N_i}{N_t} \quad (16)$$

Para o equacionamento do motor, têm-se:

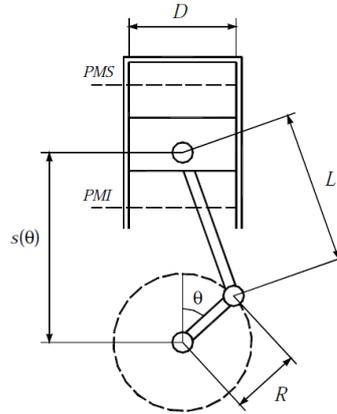


Figura 29: Desenho de um MCI (DE MELLO.2007)

Sendo que  $s(\theta)$  é a distância entre o pino do pistão e o centro do girabrequim. Tem-se então:

$$s(\theta) = R \cdot \cos\theta + \sqrt{L^2 - R^2 \cdot \sin^2\theta} \quad (17)$$

Para o volume total, têm-se:

$$V_{total} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left[ L + R - s(\theta) + \frac{2 \cdot R}{(R-1)} \right] \quad (18)$$

Para o cálculo da temperatura durante a compressão do gás, utiliza-se a seguinte formulação politrópica:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (19)$$

Por simplificação, considera-se  $k=1,4$  apenas durante a compressão.

Para o cálculo da variação da temperatura, durante a queima do combustível e a expansão do gás na câmara de combustão e por hipótese desconsiderando-se a correção de compressibilidade, têm-se:

$$Q = m c_p \Delta T \quad (20)$$

Porém, para o trabalho presente, têm-se:

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{útil}}}{(m_{\text{ar}} c_{p_{\text{ar}}} + m_{\text{combustível}} c_{p_{\text{combustível}}})(1-x) + m_{\text{resíduos}} c_{p_{\text{resíduos}}} x} \quad (21)$$

A massa de ar e a massa de combustível, é consumido durante o processo, enquanto que a massa de resíduo é produzido. As constantes de calor específico também varia ao longo da reação e está em função da temperatura como foi mostrado anteriormente.

Para o cálculo da pressão, durante a compressão do gás, da queima do combustível, e da expansão da câmara de combustão do motor, parte se a partir da seguinte formulação:

$$PV = mRT \quad (22)$$

Porém, para o presente trabalho, têm-se:

$$P = \frac{TR_{\text{eq}}((m_{\text{ar}} + m_{\text{combustível}})(1-x) + m_{\text{resíduos}}x)}{V_{total}} \quad (23)$$

A massa de ar e a massa de combustível, é consumido durante o processo, enquanto que a massa de resíduo é produzido. As constantes de calor específico também varia ao longo da reação e está em função da temperatura como foi mostrado anteriormente. O volume também varia de acordo com a equação (18). A temperatura varia de acordo com a equação (21).

A partir dos equacionamentos obtidos, a simulação e programação foram efetuadas no ambiente do *SCILAB*.

## 5. Resultados.

Atualmente, muito têm se ouvido a falar do termo *Downsizing*. Isso representa no mundo automotivo, um motor com capacidade cúbica menor, porém com desempenho de potência e torque semelhantes a um motor de capacidade cúbica maior. Isso é possível sobrealimentando o motor menor com um compressor (*Blower*) ou um turbo-compressor.

Um exemplo real é a nova família de motores *Ecoobost* da Ford. Um motor 1.0 dessa família, com sobrealimentação aproveitada por um turbocompressor, consegue extrair cerca de 120 cv e 17 kgfm de torque, ou seja, um motor 1.0 consegue tirar quase que a potência de um motor 1.8 tradicional.

No Brasil, muitos automóveis também tiveram este conceito. Dois exemplos memoráveis eram o *Ford Fiesta/Ecosport Supercharged* (Lançado em 2003) e o *Volkswagen Gol/Parati 1.0 16V Turbo* (Lançado em 2000). Ambos possuíam motores 1.0, porém sobrealimentados por um compressor, no caso do *Ford*, e turbocomprimido no caso do *Volkswagen*. Conseguiram extrair 90 cv e 112 cv respectivamente, potência equivalente a um motor 1.6 e 2.0 tradicionais à época. Porém, para o presente trabalho, será investigado qual o benefício do consumo do combustível, principalmente do álcool. Supondo que temos as seguintes características do novo motor, porém sobrealimentado seguindo os conceitos do *Downsizing*.

Tabela 10: Dados de entrada de simulação.

Diâmetro do cilindro (D)	61,01 mm
Curso do pistão (s)	86,04 mm
Comprimento da biela (L)	144,0 mm
Taxa de compressão	11
Cilindrada Total	1,006 L

Porém, para poder comparar com o motor 1.8 tradicional, deseja-se que a potência e o torque no novo motor 1.0 seja mantido. O parâmetro da força que a cabeça do pistão recebe durante a explosão, deve ser mantido para manter todos os dados de desempenho. Têm se:

$$F_{\text{pistão}} = P A_{\text{pistão}} \quad (24)$$

Sendo que a  $A_{\text{pistão}}$  é a área superior do pistão.

Sendo assim, testou-se para o novo motor, a quantidade de sobrealimentação para que o novo motor, mantivesse tal força. Concluiu-se que no caso da gasolina, a sobrealimentação no novo motor ficou perto de 76,3 %, enquanto que no caso do álcool, em torno de 85%. A vantagem da sobrealimentação, é que o motor pode trabalhar de uma forma mais próxima da estequiométrica principalmente no etanol, e supondo que a sobrealimentação é variável em cada tipo de combustível. Isso será benéfico para o consumo do combustível. A seguir, o gráfico da força sobre o pistão será demonstrado. Note que o gráfico deve ser aproximado para manter as condições de desempenho de potência e torque. A base de comparação é o motor 1.8 tradicional movido a gasolina. Supondo ainda, por hipótese, que o motor esteja em na condição de WOT e está a 5500 rpm, a mistura admitida é estequiométrica e o ar aspirado, se encontra a cerca de 300 K de temperatura.

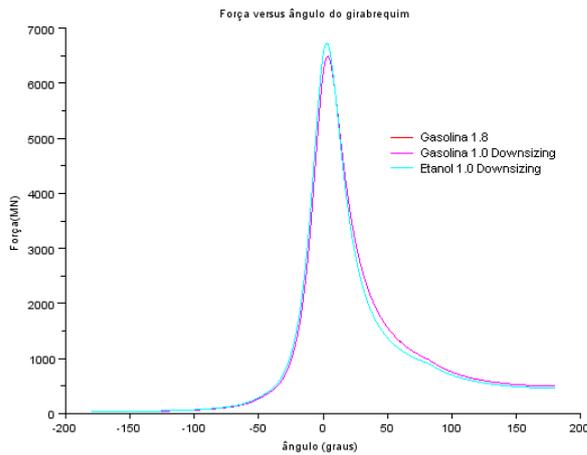


Gráfico 1: Força no pistão versus ângulo

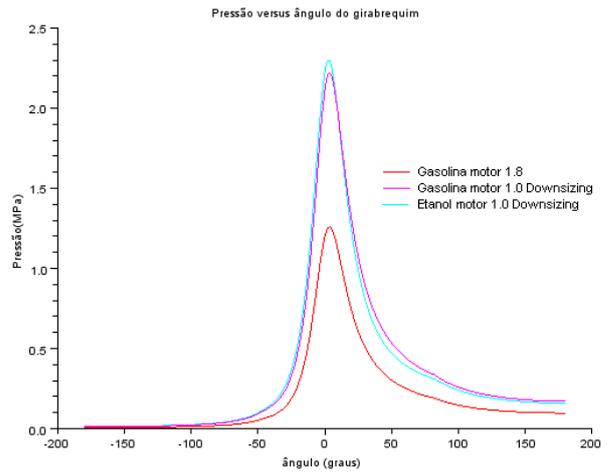


Gráfico 2: Pressão no pistão versus ângulo

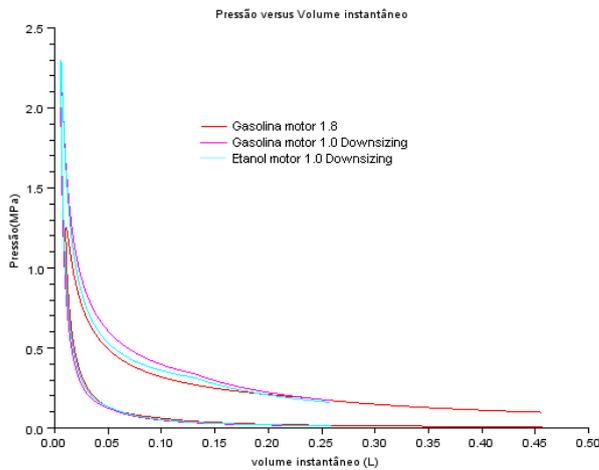


Gráfico 3: Pressão versus Volume

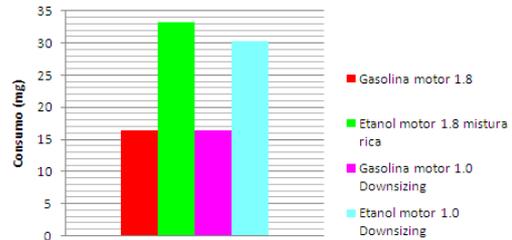


Gráfico 4: Consumo por combustão

Como se observa, o motor 1.0 Downsizing movido à etanol, é cerca de 1,5 mg mais econômico por combustão, se comparado com o motor 1.8 tradicional movido à etanol com uma mistura rica.

Além disso, motor que adotam a tecnologia *Downsizing*, como possuem cabeçotes menores, são no entanto, mais leves. Sendo assim, a economia de combustível será ainda maior do que apresentado acima.

Além disso tudo, como motores de baixa cilindrada sobrealimentados trabalham com um PME ( Pressão Média Efetiva) maior que motores tradicionais grandes, como foi demonstrada anteriormente, o consumo específico também será melhor, de acordo com a fórmula e a tabela.

$$PME = \frac{2P}{V_{deslocado}N} \quad (25)$$

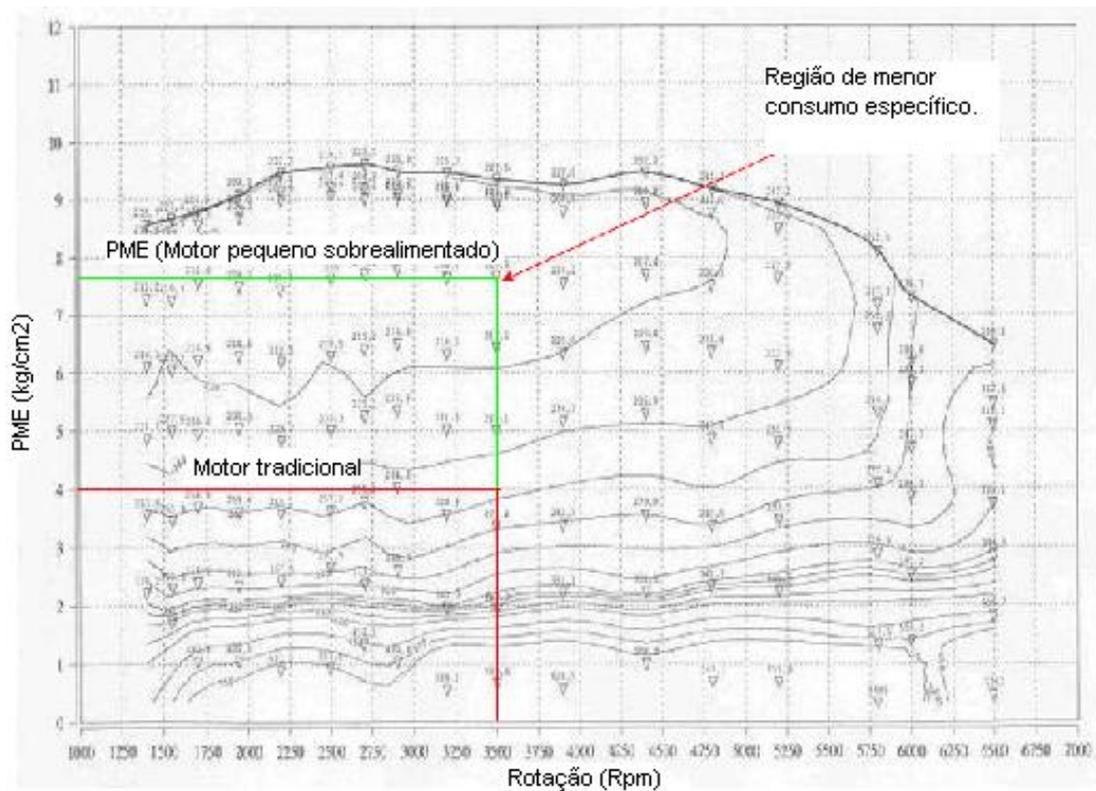


Gráfico 5: Mapa do consumo específico (Fonte: Fiat PowerTrain)

## 6. Agradecimentos

Agradeço o apoio do professor Marcos de Mattos Pimenta pela orientação do trabalho de formatura.

## 7. Referências

- [1] BARBOSA JUNIOR, Carlos Eduardo. *Modelagem unidimensional e simulação de um motor com ignição por centelha*. Dissertação(Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2009.
- [2] VEIGA, Márcio Ferreira . *Avaliação do efeito da variação da razão ar-combustível por cilindro em motores de combustão interna de ignição por centelha*. Dissertação(Mestrado profissionalizante) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2009.
- [3] NAKANO, Danillo Gabriel . *Estudo sobre instalação de um turbocompressor em automóvel nacional : análise de projeto e análise de caso*. Dissertação(Mestrado profissionalizante) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2007.
- [4] BRAMBILA, Jean Amadeo. *Estudo experimental e simulação termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com óleo diesel e etanol*. Dissertação(Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2006.
- [5] FERRAZ, Clayton Vinícius. *Sistemas controlados de propulsão de veículos automotores*. Dissertação(Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2004.
- [6] NAKANO, Danillo Gabriel. *Estudo sobre instalação de um turbocompressor em automóvel* . TCC - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2004.
- [7] NIGRO, Roberto Bueno. *Análise de um simulador de motor de combustão interna de motor de combustão interna de ignição por centelha*. TCC- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 1994.

- [8] GANTUS, Ricardo Adib . *Simulação de um motor de combustão interna utilizando o código CFD Kiva*. TCC- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2002.
- [9] GUTIERREZ Junior, Henedino. *Motor de ignição por centelha de alta compressão com limitação de pressão de combustão*. Tese(Doutorado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2001.
- [10] NEGRI, Jean Cesare. *Modelagem analítica multidimensional para simulação de câmaras de motores de combustão interna : estado da arte e utilização introdutória do método de elementos finitos*. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 1989.
- [11] MAURO, Bruno Ribeiro; CONTANI, Eduardo A. do Rosário. *Estudo da emissão de poluentes em motor bi-combustível álcool-gasolina*. TCC- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP 2004.
- [12] MELO, Tadeu Cavalcante Cordeiro, *Modelagem Termodinâmica de um motor do ciclo Otto tipo Flex-Fuel, funcionando com gasolina, álcool e gás natural*. Dissertação (Mestrado)- Escola de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ 2007.
- [13] HEYWOOD, JohnB. *Internal combustion engine fundamentals*.- New York MacGraw-Hill, 1988.
- [14] KREITH, Frank; *Princípios da Transmissão de Calor*. São Paulo Edgard Blucher, 1973.
- [15] MEDEIROS, João Irineu; RODRIGUES, Erlon; VENTURA, Jerônimo. *Motor Fire 1.4L T-Jet: A Introdução do conceito de downsizing no Brasil pela FPT- Powertrain Technologies*.

## 8. Direitos autorais

Eu, Humberto Yuki Higa, autorizo a reprodução do trabalho livremente desde que eu seja devidamente informado e citado.

## STUDY AND PROPOSAL FOR REDUCING CONSUMPTION FLEX-FUEL ENGINE.

**Humberto Yuki Higa**

humbertohiga@gmail.com

***Abstract.** Initially, this work made a historical that culminated in the creation of Flex-Fuel engine. Also a literature review was needed to better understand the problem of flex-fuel engines, or better understand why this type of engine to consume more. Also discussed were some technological issues such as the Lambda Sensor and some theoretical concepts were also discussed. We proposed a mathematical model of a combustion engine and the simulation was carried out with the program SCILAB. This simulation was performed with the proposal to use technology Downsizing. Finally, the analysis was made, and the results and the conclusion were obtained.*

***Keywords.** ICE Flex-Fuel, Income, Consumption, Ethanol, Downsizing.*