

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DIDÁTICO PARA ANÁLISE DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM MOTOR – OTTO.

Renan A. Silva – renan42alves@gmail.com

Nicholas S. Almeida – asakuranicholas@gmail.com

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Santa Cecília.

Rua Oswaldo Cruz, 277 – Boqueirão CEP: 11045-907 – Santos – SP

Resumo: O Laboratório de Motores de Combustão Interna do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília tinha um módulo didático desativado e obsoleto. Em função da necessidade de reativar o mesmo, busca aprimorar sua forma didática e fundamentar os conhecimentos relativos ao funcionamento dos motores de combustão, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um novo módulo didático para analisar as curvas características de um motor de combustão interna – ciclo Otto. Utilizou-se como base o projeto didático do Prof. Franco Brunetti composto por um dinamômetro com freio Foucault. Iniciou-se a execução do projeto com a manutenção nos equipamentos do módulo conforme as necessidades. O novo módulo didático é composto por um motor monocilíndrico ciclo Otto a quatro tempos, acoplado a um gerador elétrico ligado a um painel de resistências elétricas, um painel elétrico com voltímetro, uma bateria estacionária, um dinamômetro analógico, um tacômetro, uma coluna milimetrada, um tanque de combustível, um tanque estabilizador de ar, uma placa de orifício e a um manômetro diferencial de tubo em “U”. Deve-se também ressaltar que o módulo didático foi projetado conforme as algumas especificações de instalações de laboratórios acadêmicos, levando em consideração os parâmetros de segurança para o uso dos equipamentos, por serem classificados como rotativos. Finalizada a montagem do módulo didático, observa-se que o reprojeto do módulo foi bem sucedido, permitindo a realização dos ensaios em aulas da disciplina de Ciências Térmicas e também está sendo utilizado para o desenvolvimento de projetos de iniciação científica.

Palavras-chave: Curvas Características; Ciclo Otto; Motores; Módulo Didático.

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos estudos visando produzir de máquinas que forneçam energia mecânica sem o uso de combustíveis fósseis, ainda é forte e atual o uso dos motores de combustão interna. Com os avanços tecnológicos atuais o desenvolvimento dos motores de combustão interna utilizou-se de modelos termodinâmicos antigos como referência para fundamentar seu funcionamento que até hoje são utilizados empiricamente para aperfeiçoar e desenvolver novas máquinas e teorias que possam de alguma maneira influenciar melhorando a vida do homem. O desenvolvimento das tecnologias aplicadas para os motores de combustão interna, com o passar do tempo, propiciou resultados como aumento de potência específica, durabilidade do motor, redução de consumo específico de combustível, diminuição das emissões de poluentes e aumento da eficiência de conversão de combustível (SILVA, F.S. et.al., 2016).

Os laboratórios de Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília, em especial o laboratório de Motores, em função da necessidade de reativar o laboratório, aprimorar sua forma didática em fundamentar e estratificar os conhecimentos relativos ao funcionamento dos motores de combustão interna estabeleceu como objetivo o desenvolvimento de um módulo baseado no funcionamento de um Freio Foucault.

Em busca de avanços que levem o mundo a um crescimento sustentável e saudável ao meio ambiente utilizando energias renováveis, o motor de combustão interna, por ser grande poluente, vem sendo substituído pelos motores elétricos que, além de “limpos” mostraram ganhos expressivos em seu rendimento (cerca de 90%) contra os 35% dos motores de combustão. Contudo, os motores de combustão interna ainda são imprescindíveis ao uso nas indústrias automotivas para a produção de veículos, além do uso como motor estacionário.

1.1 Funcionamento de um Motor de Combustão Interna

Os quatro tempos de um motor ciclo Otto podem ser assim definidos:

- ✓ Admissão – Nessa etapa, a válvula de admissão permanece aberta e a de escapamento fechada. Caracteriza-se pela entrada da mistura ar combustível através da válvula de admissão provocada pelo movimento do pistão do PMS (ponto morto superior) ao PMI (ponto morto inferior);
- ✓ Compressão – com ambas as válvulas fechadas, o pistão comprime a mistura ao se mover do PMI ao PMS. Pouco antes de chegar ao PMS, uma vela de ignição promove uma centelha elétrica, que provocará o início da combustão da mistura admitida na fase anterior, com conseqüente elevação da pressão;
- ✓ Expansão – A elevação da pressão no cilindro provoca a queima da mistura. E assim ocorre o deslocamento do pistão para o PMI, realizando trabalho. Durante essa fase as válvulas permanecem fechadas. O tempo de expansão é denominado de tempo motor;
- ✓ Exaustão – Por fim, em um deslocamento do PMI ao PMS com a válvula de escapamento aberta, o pistão expulsa os gases queimados do cilindro para a atmosfera. Ao chegar ao PMS, um novo ciclo se processa, de forma que duas voltas completas do virabrequim são necessárias para completar um ciclo de trabalho (CÂMARA, J.C.C., 2006).

1.2 Freio dinamométrico ou dinamômetro

Neste tipo de freio a bobina gera um campo magnético que é concentrado nos “dentes do rotor”, durante o movimento, o rotor gera correntes parasitas nos anéis que se aquecem. O estator absorve o calor gerado e o remove através da água utilizada como fluido de arrefecimento. Além de simples, pode ser regulado pela intensidade de corrente que passa pela bobina, permitindo assim a construção de dinamômetros de grande porte (BRUNETTI, 2012).

A bobina gera um campo magnético que é concentrado nos “dentes do rotor”, durante o movimento, o rotor gera correntes parasitas nos anéis que se aquecem. O estator absorve o calor gerado e o remove através da água utilizada como fluido de arrefecimento. Além de simples, pode ser regulado pela intensidade de corrente que passa pela bobina, permitindo assim a construção de dinamômetros de grande porte. Os freios de Foucault permitem a realização de testes cíclicos e rápidos. São utilizados para o desenvolvimento de motores e componentes e para realização de testes com baixo custo de operação (MORITA, K. R., 1994).

Os freios de Foucault permitem a realização de testes cíclicos e rápidos. São utilizados para o desenvolvimento de motores e componentes e para realização de testes com baixo custo de operação (BRUNETTI, 2012).

1.3 Classificação dos ensaios de motores

Os ensaios de motores de combustão interna compreendem atividades específicas de qualificação dos motores ensaiados, quanto a suas características de desempenho e durabilidade.

O conceito de desempenho dos motores tende cada vez mais a englobar simultaneamente aspectos de sua capacidade em torque, potência, economia de combustível e de controle de emissões de poluentes. No controle de qualidade para detecção de defeitos de fabricação ou excessivo desgaste de componentes, também é necessária a avaliação de dados de desempenho, de uma forma completa ou simplificada. Seja na análise das características de desempenho, seja na análise das características de durabilidade, é preciso que se considere a finalidade básica do ensaio e das operações de qualificação, utilizada como critério para uma classificação dos ensaios relativos à:

- ✓ **Qualidade:** quando referentes a uma verificação geral da qualidade de fabricação. Engloba usualmente a medição de potência efetiva, pressão do óleo lubrificante, consumo de combustível, temperaturas do óleo e ar na admissão, em determinados pontos de operação, assim como verificações funcionais de termostatos, pressostatos, sistemas de partida, dispositivos de proteção, alarmes, etc.
- ✓ **Homologação:** quando se referem à verificação do cumprimento de requisitos da legislação, órgãos fiscalizadores e associações de fabricantes e usuários. Exigem normalmente a determinação das curvas de torque, potência efetiva, e do consumo específico de combustível em todo o campo operacional, com controle do índice de fumaça (motores Diesel), e de emissões de gases poluentes (conforme a legislação).
- ✓ **Pesquisa e desenvolvimento:** quando visam a determinação metódica de grandezas de desempenho, rendimentos do motor, características poluentes ou a obtenção de informações relevantes acerca de sua durabilidade. Devem ser considerados alternativas quanto ao uso de diferentes condições de regulagem, relação de compressão, tipos de câmara de combustão, sistema de alimentação de combustível, etc. (MORITA, K. R., 1994).

- **Torque e potência efetiva.**

É a potência medida no eixo do motor e pode ser relacionada pelo produto entre o torque e velocidade angular conforme equação 4;

$$T = F \cdot b \quad (1)$$

Onde, T (N.m) é o torque, F (N) é a força e b (m) é braço.

Sendo,

$$N_e = T \cdot \omega \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi \cdot n \quad (3)$$

Onde, ω é a velocidade angular do eixo (rad/s) e n é a rotação (rpm).

Tem-se N_e (cv) a potência efetiva calculada pelo produto da constante 2π , rotação, força e o braço da manivela.

$$N_e = 2\pi \cdot b \cdot F \cdot n \quad (4)$$

- **Consumo específico.**

O consumo específico C_e (kg/h.cv) é a relação entre o consumo de combustível (kg/s) e a potência efetiva.

$$C_e = \frac{\dot{m}_c}{N_e} \quad (5)$$

O consumo de combustível pode ser medido volumetricamente. Registra-se o tempo (s) necessário para consumir o combustível contido no volume (cm³) calibrado.

Logo,

$$\dot{V}_c = \frac{V_c}{t} \quad (6)$$

Onde, \dot{V}_c (cm³/s) é a vazão volumétrica, t (s) é o tempo e ρ_c (kg/m³) é a massa específica do combustível.

$$\dot{m}_c = \frac{\rho_c \cdot V_c}{t} \quad (7)$$

Sendo \dot{m}_c (kg/h) a vazão mássica do combustível.

- **Pressão média efetiva**

A definição da pressão média efetiva que é calculada pela equação 8. A máxima pressão média efetiva de um motor deve ser essencialmente constante para vários tamanhos de motores.

$$P_{m_e} = \frac{x \cdot N_e}{V \cdot n} \quad (8)$$

Onde, N_e é a potência efetiva, n é a rotação, x é o número de revoluções do motor para cada combustão do ciclo e V é a cilindrada (cm³) do mesmo.

1.4 Características dos motores

As curvas características são utilizadas para analisar o comportamento do torque, potência e consumo de combustível, pressão, temperatura em função da rotação dos motores ou das cargas parcialmente exigidas ou de ambas as situações juntas (BRUNETTI, 2012)

As curvas em geral podem ser analisadas conforme as necessidades do estudo que será desenvolvido, Plena carga (em função da rotação) ou em Cargas parciais (com rotação constante). A construção dos gráficos, com estes parâmetros podem ser realizadas de várias maneiras e dependendo de como os mesmos forem reproduzidos, as características das curvas deverão ser semelhantes ao padrão descrito na literatura conforme a leitura dos dados plotados, contudo apresentarão informações totalmente diferentes, conforme quadro 1.

Quadro 1 – Informações sobre as curvas.

<i>Curva de Torque, Consumo específico e Potência Efetiva x rpm (carga plena):</i>
O motor MCI apresentará uma curva de Consumo específico com valores mais desfavoráveis para as baixas rotações.
<i>Curva de Torque, Consumo específico e Potência Efetiva x cargas parciais (rotação constante):</i>
As curvas típicas de consumo específico e potência em função da carga são bastante desfavoráveis em pequenas cargas.

2. COMBUSTÍVEL GASOLINA

De modo geral denomina-se combustível qualquer substância cuja combinação química com outra seja exotérmica. A gasolina é uma mistura complexa composta de centenas de hidrocarbonetos. Sua característica e composição relativa sempre dependerão da natureza do petróleo que a originou. Esse derivado do petróleo é utilizado como combustível em motores de combustão interna e pode ser usado como solvente, em indústrias. Devido as seguintes características: alta energia de combustão, alta volatilidade e sua compressibilidade, a gasolina é considerada a melhor opção de combustível para o motor ciclo Otto. Por ser volátil, a gasolina mistura-se facilmente com o ar no carburador e a energia liberada na combustão deste combustível, que explode dentro cilindro é a responsável pela movimentação do motor (SCAFI, S. H. F., 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizando um módulo didático já existente na instituição projetado por Franco Brunetti, conforme figura 2, realizou-se a manutenção do mesmo, fazendo as devidas alterações buscando facilitar a realização do ensaio.



Figura 1 – Módulo didático projetado por Franco Brunetti.

Tal manutenção começou com a desmontagem, lixamento e limpeza dos equipamentos que constituem o módulo como motor, escapamento, bancada, tanque de ar e gerador, usando materiais e ferramentas como lixa, chaves combinadas, alicates, tintas, etc..



Figura 2 – Fases do módulo didático.

Para o desenvolvimento de um novo projeto de módulo didático, foi realizada a especificação e compra do um novo conjunto motor/gerador.



Figura 3 – Motor NAGANO NG3100E.

Concluída a montagem do reprojeto, foi escolhido realizar o ensaio de homologação e assim seria possível testar o funcionamento, gerando as curvas de torque, consumo específico, pressão média efetiva e potência efetiva em função das cargas parciais, pois os ensaios de com rotação constante, são comumente utilizados para análise de desempenho de motores estacionários, que acionam geradores.

Neste tipo de ensaio a variação das cargas aplicadas determinam pontos para a geração dos gráficos deste trabalho, ao passo que a rotação será mantida constante, e assim aplicar os conceitos literários na determinação das curvas através de um dinamômetro de Foucault didático.

Após ligar o motor, que inicialmente deve funcionar sem carga de resistência, ajusta-se o acelerador até atingir a rotação desejada no tacômetro, neste caso 3000 rpm, que se deve manter constante.

Para que se realizem as anotações dos valores das grandezas como da força no dinamômetro, tempo no cronômetro e pressão manométrica no tubo em “U” em função das cargas de resistências, trava-se o volume em intervalos de consumo de 10 cm³ utilizando a coluna. O combustível que analisado é a gasolina aditivada “premium”, pois os motores ciclo Otto, também podem analisar gasolina comum, etanol ou misturas que respeitem o padrão de

ignição por faísca. A cada consumo de cada 10 cm³ de gasolina aditivada deve-se ligar uma carga e refazer as anotações dos valores das mesmas grandezas citadas anteriormente.

O ensaio deve ser conduzido em várias etapas de valores de carga, sendo a última com carga de resistência total, utilizando combustível de postos de abastecimentos diferentes.

Inicia-se o experimento realizando as devidas verificações:

- ✓ Tanque de combustível cheio;
- ✓ Válvula da coluna cheia, aberta, e do tanque de combustível fechada;
- ✓ Resistências elétricas plugadas no painel elétrico desligadas;
- ✓ Multímetro do painel elétrico ligado em 220 volts;
- ✓ Entrada de ar do carburador aberta;
- ✓ Bateria conectada para partida elétrica.

Para o desenvolvimento dos ensaios deste trabalho, precisa-se dos seguintes equipamentos:

- Um cronômetro;
- Um módulo didático (Dinamômetro freio Foucault)

Este é composto por:

- Um motor monocilíndrico Otto;
- Um escapamento;
- Um gerador elétrico;
- Um tacômetro elétrico;
- Um painel de resistências elétricas;
- Uma bateria estacionária;
- Um dinamômetro analógico;
- Uma coluna milimetrada;
- Um tanque estabilizador;
- Um tanque de combustível;
- Uma placa de orifício;
- Um manômetro tubo em “U”.
- Painel elétrico com voltímetro acoplado.

4. RESULTADOS E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Após os processos de manutenção e adaptações necessárias, no módulo didático, tem-se o mesmo finalizado conforme a figura 4. E assim pôde-se realizar os ensaios a fim de plotar as curvas características, utilizando as equações de 1 a 8 da literatura e com as leituras dos valores das grandezas disponíveis durante os ensaios.



Figura 4 – Módulo didático finalizado.

Obtêm-se então os resultados da tabela 1 com as equações de 1 a 8. E assim têm-se as curvas da figura 8.

Tabela 1 - Parâmetros das curvas características gerada pelo combustível gasolina do posto B.

n	F	b	T	Ne	V	Δt	p_c	\dot{m}_c	Ce	Pme
(rpm)	(kgf)	(m)	(kgf.m)	(cv)	(cm ³)	(s)	(kg/m ³)	(kg/h)	(kg/h.cv)	(kgf/cm ²)
3200	0,75	0,202	0,151	0,677	10	44	720	0,589	0,870	1,399
3200	1	0,202	0,202	0,902	10	48	720	0,540	0,598	1,866
3200	1,3	0,202	0,262	1,173	10	38	720	0,682	0,581	2,426
3200	1,6	0,202	0,323	1,444	10	38	720	0,682	0,472	2,986
3200	1,8	0,202	0,363	1,624	10	32	720	0,810	0,498	3,359
3200	2,3	0,202	0,464	2,076	10	35	720	0,740	0,356	4,292
3200	2,7	0,202	0,545	2,437	10	31	720	0,836	0,343	5,039

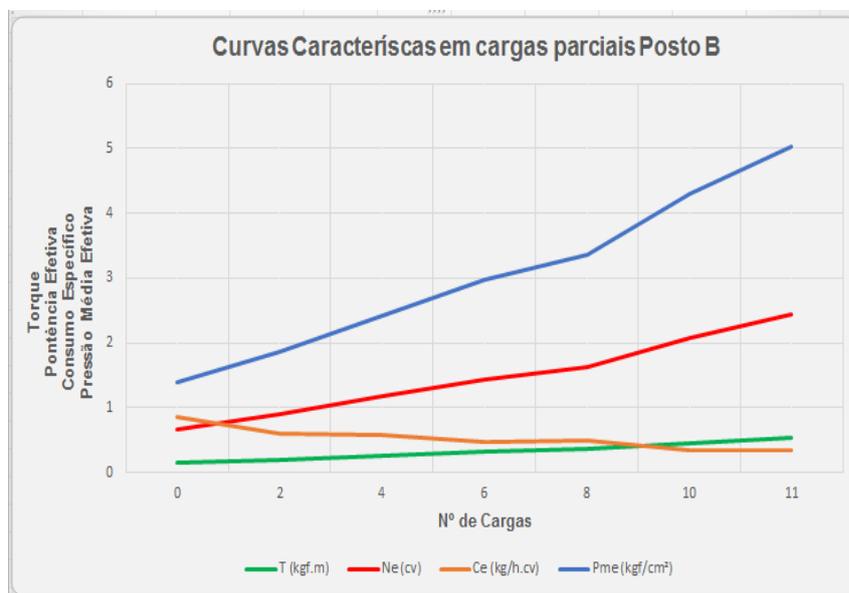


Figura 5 – Gráfico das curvas características com combustível gasolina do Posto B.

Concluída a primeira montagem do módulo didático após a manutenção, com aproveitamento dos equipamentos antigos, pode-se reativar o mesmo e assim desenvolver os ensaios testes para verificar seu desempenho quanto ao seu funcionamento. O módulo não produziu bons resultados quando ligadas as resistências elétricas, pois estas não ocasionaram a diminuição da rotação, assim como um freio, para que se pudessem gerar as curvas características de um motor Otto. As resistências elétricas eram novas e testadas no multímetro, e como apresentaram bom funcionamento foi necessário fazer o diagnóstico do funcionamento do gerador elétrico. Este demonstrou irregularidade em seu estator, que não conseguia produzir energia suficiente para seu funcionamento. Para que o módulo projetado pudesse atingir o objetivo do trabalho foi indispensável à especificação e compra de um novo conjunto motor/gerador.

Realizada a construção final do módulo com o novo conjunto, foram repetidos os ensaios de teste de funcionamento, desta vez com todos os equipamentos em perfeito estado.

As curvas características do motor desenvolvidas apresentadas na figura 5 foram semelhantes às curvas descritas na literatura, permitindo então, testar a capacidade didática do

módulo. As mesmas se demonstraram bem desenvolvidas ao serem ensaiadas por um grupo de alunos de iniciação científica da Universidade.

O objetivo do trabalho foi atingido, pois, os discentes do curso de engenharia mecânica conseguem ter melhor compreensão e visualização sobre os estudos de motores de combustão interna, nas disciplinas oferecidas no curso.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os motores de combustão interna ainda são imprescindíveis ao uso de determinadas aplicações nas indústrias e nos meios comuns de transporte, por terem menor custo e construção mais simples.

O projeto buscava ser economicamente viável e por isso iniciou-se seu desenvolvimento com equipamentos antigos sujeitos a manutenção. O módulo, por sua vez, assim que totalmente reprojeto produziu bons resultados quanto ao desenvolvimento dos ensaios realizados, segundo literatura.

Pode-se também ressaltar que o módulo se mostrou versátil, pois o mesmo pode ser utilizado para estudos de combustíveis, além de sua capacidade de dar apoio ao estudo de motores de combustão interna na disciplina Ciências Térmicas III.

Embora o módulo esteja finalizado e apto a ser utilizado em qualquer laboratório acadêmico, existem ainda algumas possibilidades de aperfeiçoamento dessa ferramenta, como a implantação de painéis digitais, sensores e controladores automatizados.

Agradecimentos

A Universidade Santa Cecília, seu corpo docente e direção, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e principalmente por todo o conhecimento e aprendizado adquirido durante o curso de engenharia mecânica.

Agradecemos, também, a indispensável colaboração dos Técnicos do laboratório da Universidade Santa Cecília, Sr. Irineu Penha Ressurreição e Sr. Sergio Giangiulio. Ao Prof. Ms. Alexandre Shozo Onuki, providenciar soluções e adaptações aos problemas técnicos elétricos encontrados no gerador.

Por fim, e em especial, ao Prof. Dr. Carlos Alberto Amaral Moino, pois, além de grande professor e coordenador da engenharia mecânica, é também, de fato, um grande motivador e personagem de imensa admiração e inspiração.

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**: Volume1/ Franco Brunetti. –São Paulo: Blucher, 2012.

CÂMARA, Júlio César Chaves. **Monitoramento eletrônico da mistura ar / combustível em motores de combustão interna ciclo Otto**. 2006. 169 f. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica). Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/23031/1/Monitoramento%20eletr%C3%B4nico%20da%20mistura%20ar%20combust%C3%ADvel%20em%20motores%20de%20combust%C3%A3o%20interna%20ciclo%20otto.pdf>>, acesso em: 02/07/2018.

MORITA, Ken Ragner. **Bancos de Ensaio de Motores de Combustão Interna: Uma Abordagem Multivariável para o Controle de Regime em Ensaios Dinâmicos**. 1994. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/76129/183722.pdf?sequence=1>>, acesso em: 02/07/2018.

NAGANO. (Manual Técnico do Fabricante) <<http://www.agrotama.com.br/produtos/gerador-de-energia-a-gasolina-3-kva-monofasico-partida-manual-110-220v-ng3000/nagano-NG3000,26,879/>>, acesso em: 24/11/2017.

SCAFI, Sérgio Henrique Frasson. **Sistema de Monitoramento em Tempo Real de Destilações de Petróleo e Derivados Empregando a Espectroscopia no Infravermelho Próximo**. 2005. 196 f. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas. Disponível em: <<http://biq.iqm.unicamp.br/arquivos/teses/vtls000378460.pdf>>, acesso em: 02/07/2018.

SILVA, Fernanda de Souza, et. al., **Análise da eficiência de um motor de combustão interna a partir da variação na regulagem das válvulas de admissão e exaustão**. 2016. (Artigo científico). Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial – CONEMI, Goiânia. Disponível em: <<http://conemi.org.br/xvi/certificados/anais-do-xvi-conemi/321-tt22-xvi-conemi-001-analise-da-eficiencia-de-um-motor-de-combustao-interna/file>>, acesso em: 02/07/2018.

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC MODULE FOR ANALYSIS OF CURRENT CHARACTERISTICS OF A MOTOR – OTTO.

Abstract: *The Laboratory of Internal Combustion Engines of the Mechanical Engineering Course of Santa Cecília University had a didactic module deactivated and obsolete. Due to the need to reactivate it, it seeks the development of its capacity and foundation for the combustion engines, this work the development of a new didactic module to analyze the characteristics of an internal combustion engine - Otto cycle. The didactic project of Prof. Franco Brunetti composed by a dynamometer with Foucault brake. Start too execute the project with a maintenance in the equipment of the module as needed. The new didactic module consists of a long cycle single cylinder motor coupled to an electric generator connected to a panel of electrical resistors, an electrical panel with voltmeter, a stationary battery, an analog dynamometer, a tachometer, a millimeter column, a tank fuel tank, an air stabilizer tank, an orifice plate and a U-tube differential. It was also important to highlight that the didactic module was so well related to some requirements of academic laboratory facilities, taking into account the safety parameters for the use of equipment, because they are classified as rotary. After completing an assembly of the didactic module, it is observed that the module redesign was successful, allowing the execution of tests in science classes and is also being used for the development of scientific initiation projects.*

Key-words: *Curves Characteristics; Otto cycle; Engines; Didactic Module.*