



OTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE MOTORES A EXPLOSÃO COM SISTEMA DE IGNIÇÃO CONVENCIONAL.

Polonskii M.M.

Universidade de Passo Fundo, FEAR, Departamento de Engenharia Elétrica,
Cx.P. 611 – 99001-970 – Passo Fundo, RS, Brasil

Resumo. *O presente trabalho trata-se de um projeto acadêmico, executado na Universidade de Passo Fundo, que resolve parcialmente o problema de funcionamento deficiente de sistemas de ignição convencionais. Foi desenvolvido um corretor digital de ignição de baixo custo e alta confiabilidade. Este módulo eletrônico é de fácil instalação, com um custo aproximado na faixa de US\$200. Várias simulações foram realizadas para avaliar o efeito do proposto algoritmo de ajuste do ângulo de avanço. Os resultados obtidos apontam para uma economia de combustível na faixa de 8 a 10% que foi comprovado através de uma série de testes com um protótipo do corretor de ignição.*

Palavras-chave: *Ignição eletrônica, Detonação, Otimização.*

1. SISTEMAS DE IGNIÇÃO CONVENCIONAIS.

Atualmente todos os carros saem da fábrica equipados com um sistema digital de injeção/ignição. Injeção digital, seja do tipo *multi-point* (MPFI - *multi-point fuel injection*) ou do tipo EFI (*electronic fuel injection*), reduz o consumo de combustível e os índices de poluição. A ignição eletrônica digital também contribui para redução do consumo de combustível e da poluição.

Por outro lado, existe uma frota de veículos automotores antigos, na sua maioria fabricados antes de 1993, que não foram dotados de um sistema de ignição/injeção digital, produzindo altos índices de poluição e consumo de combustível elevado. Esta frota, levando-se em consideração a realidade brasileira, poderá ser utilizada por mais um período de 5 a 10 anos. Instalar sistemas modernos de injeção/ignição digital nestes carros parece uma tarefa inviável, em virtude de alto custo desta instalação (na faixa de US\$3000).

Na Fig.1 é apresentado esquematicamente um sistema de ignição convencional. Este tipo de sistema foi instalado na maioria dos carros com motor a explosão por centelha (SI – *spark ignition*) fabricados até o ano 1993.

É de conhecimento que a queima de mistura ar/combustível nos cilindros do motor a explosão não é instantânea. A expansão da frente de chama leva um certo tempo que depende de vários fatores. Para que o rendimento do motor seja máximo, a faísca deve ser solta antes do ponto morto superior (PMS). Esta antecipação, conhecida como ângulo de avanço, no caso ideal, deve garantir que a maior pressão dentro do cilindro aconteça quando a árvore de manivelas estiver na posição 15° após o PMS para o cilindro em questão (Denton, 1995).

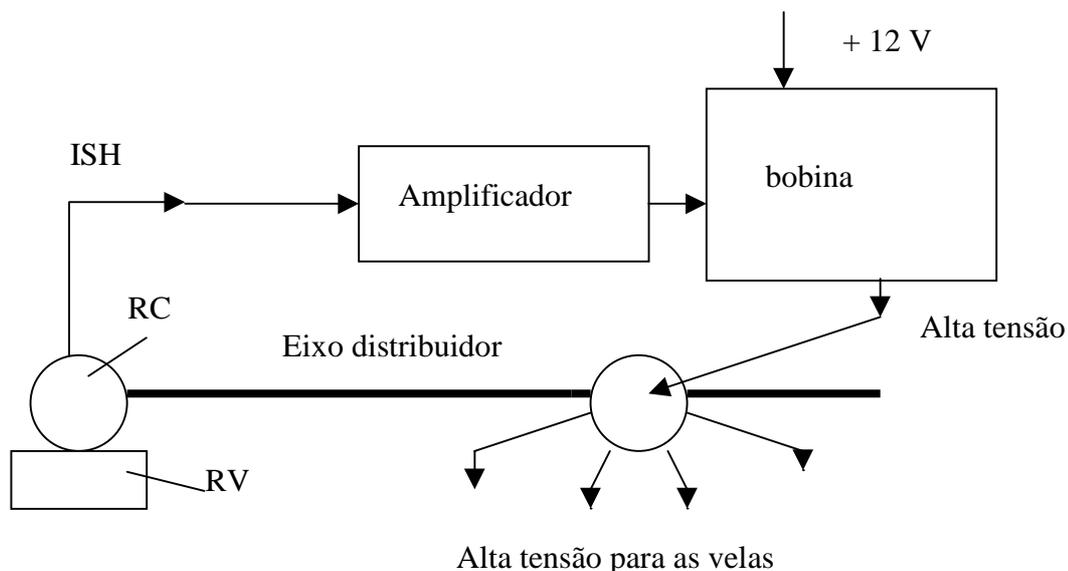


Figura-1 Sistema de ignição convencional, RV – regulador a vácuo, RC – regulador centrífugo, ISH – impulso do sensor Hall

Em sistemas de ignição convencionais, como mostrado na Fig.1, o ângulo e avanço é controlado através de regulador a vácuo e regulador centrífugo. As características destes reguladores não são ajustáveis, por isso a única possibilidade de ajustar o funcionamento do sistema de ignição convencional seria através do ângulo de avanço inicial, ou seja simplesmente variando a posição angular da carcaça de bloco distribuidor. Este ajuste não proporciona um ótimo rendimento do motor em todos os regimes. Se o ângulo de avanço inicial for muito grande, o motor certamente irá desenvolver detonação, um fenômeno muito negativo que diminui a vida útil do motor e reduz o rendimento do mesmo. Se o ângulo de avanço for menor do que necessário, o motor não irá desenvolver sua potência máxima.

Resumindo, para ter o rendimento máximo, o motor a explosão deve funcionar no limiar de detonação, mas não desenvolver uma detonação profunda (em inglês este último fenômeno é chamado de *hard knock*).

2. O CORRETOR DE IGNIÇÃO.

A proposição principal que foi utilizada como a base deste projeto é desenvolver um dispositivo eletrônico de baixo custo que corrija o ângulo de avanço de tal maneira que o motor quase sempre funcione no limiar de detonação (veja Fig.2)

A idéia foi utilizar ao máximo possível os componentes já existentes no sistema de ignição convencional, Fig.1, e minimizar ao máximo possível o número de componentes novos desde que isto não prejudique muito o desempenho. Por esta razão o corretor de ignição não foi dotado de um conjunto de sensores sofisticados que compõem qualquer moderno sistema EFI e/ou MPFI (Garrett, 1991). O algoritmo de funcionamento do corretor é o seguinte – ele recebe impulsos ISH gerados pelo sistema convencional e, com base na informação do sensor de detonação SD, corrige a posição temporal dos ISH, gerando impulsos ICorr. Se não há detonação, então o próximo impulso para correspondente cilindro será adiantado. Se há detonação, o impulso será atrasado. O algoritmo de ajuste de ângulos de avanço β é baseado, então, nas Eq.(1).

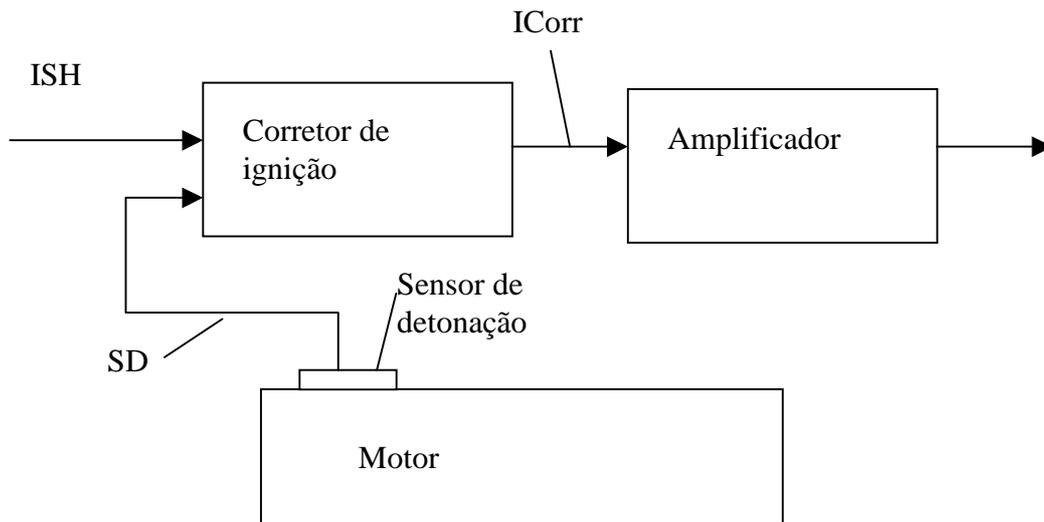


Figura-2 Instalação do corretor de ignição, ICorr – impulso corrigido, SD – sinal do sensor de detonação.

$$\begin{aligned} \beta_{n+1}^i &= \beta_n^i + \delta && \text{se não há detonação} \\ \beta_{n+1}^i &= \beta_n^i - b\delta && \text{se há detonação} \end{aligned} \quad (1)$$

Aqui o índice superior i representa o número de cilindro, o índice inferior n corresponde ao ciclo de controle anterior e o índice inferior $n+1$ corresponde ao atual ciclo de controle, δ é o acréscimo no ângulo de avanço, b é uma constante ($b = 5$ a 10).

A instalação de um tal corretor de ignição é bem simples – é preciso apenas “inserir” o corretor entre ISH e Amplificador, Fig.2, e instalar o sensor de detonação junto à carcaça do motor. É preciso ressaltar, que a posição certa do sensor de detonação na carcaça é da maior importância.

3. SIMULAÇÕES.

Na fase inicial do projeto, para avaliar a diminuição de consumo de combustível que poderia ser alcançada através de instalação do corretor de ignição, foi feita uma série de simulações. O modelo matemático utilizado (Polonskii, 1999) foi desenvolvido com base nas equações publicadas no trabalho Godbole, 1993. O modelo foi desenvolvido no ambiente do MATLAB-SIMULINK e é apresentado na Fig. 3.

O subsistema *Engine* representa a dinâmica do próprio motor. As entradas são: SI é o ângulo de avanço real, MTB é o ângulo de avanço do maior torque, α é a posição angular da borboleta, TE é torque externo. As saídas são: TEC é a taxa de combustível entrando no motor, Pm é a pressão no coletor de admissão (a carga do motor), $velocidade$ é a velocidade angular do motor.

O subsistema *ângulo de avanço* gera os valores de SI e MTB , usando como entradas velocidade do motor, Pm e SI . Para fins de avaliação do efeito de ajuste do SI , o MTB foi calculado através da Eq.(2):

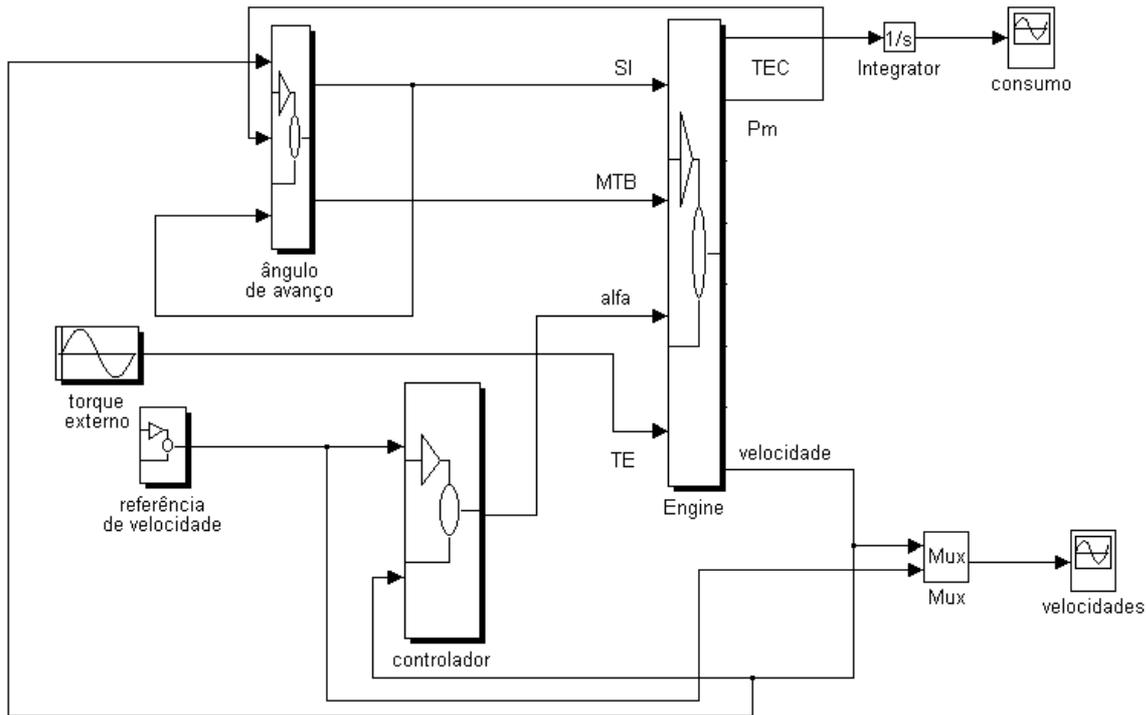


Figura-3 O modelo utilizado para simulações.

$$MTB = 0.1 + 0.6*(1 - e^{(-velocidade/120)})*(1 - 0.6*(Pm/110000)) \quad (2)$$

A fórmula Eq.(2) foi deduzida com base nos gráficos apresentados no Automotive Handbook, 1995.

O subsistema *torque externo* serve para aplicar torque externo variável ao motor. Para simulação era usado torque senoidal.

O subsistema *referência de velocidade* calcula o valor de referência que serve como entrada para o subsistema *controlador*. Este último é um controlador do tipo PI com anti wind-up. O subsistema *referência de velocidade* possibilita realizar perfis aleatórios de velocidade que correspondem a perfis de velocidade característicos na cidade ou na estrada.

Foram feitas várias simulações para obter a redução de consumo de combustível que corresponderiam a ciclos de movimento na cidade e na estrada. Para estes dois tipos de ciclos de movimento foram feitas várias simulações para um sistema de ignição ideal (o ângulo de avanço real sempre é igual ao ângulo ótimo) e para sistemas de ignição com uma diferença entre o ângulo real e o ótimo de 5, 10, 15 e 20%. Os resultados de simulação mostraram que poderia ser atingido um patamar de 11% da economia de combustível no caso de desajuste do ângulo de avanço real na faixa de 40%. No caso de desajuste de 20%, a economia atinge um valor de 5% a 6%.

4. O ALGORITMO DE FUNCIONAMENTO.

O corretor de ignição deve apenas corrigir o funcionamento do conjunto do regulador centrífugo e do a vácuo. A correção é feita separadamente para cada cilindro. Existem 4 casos

diferentes de funcionamento que foram considerados ao desenvolver o algoritmo de funcionamento.

Caso 1. O ângulo de correção do cilindro atual está atrasado e o do cilindro seguinte também encontra-se na mesma situação. Desta forma para um período do impulso ISH, temos apenas um pulso ICorr. O gráfico abaixo ilustra este caso (veja Fig.4).

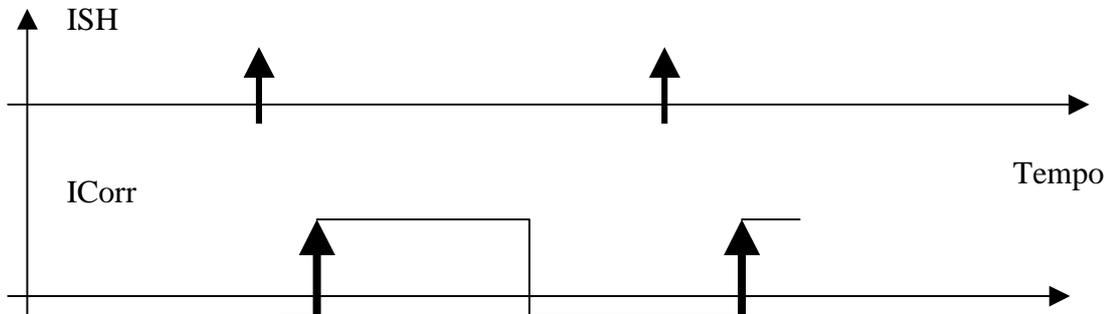


Figura-4 Relação temporal entre os sinais SH e ICorr. Caso 1.

Caso 2. O ângulo de correção do cilindro atual está atrasado e o do cilindro seguinte está avançado. Desta forma para um período do sinal ISH, temos dois pulsos de ignição. O gráfico abaixo ilustra este caso (veja Fig.5).

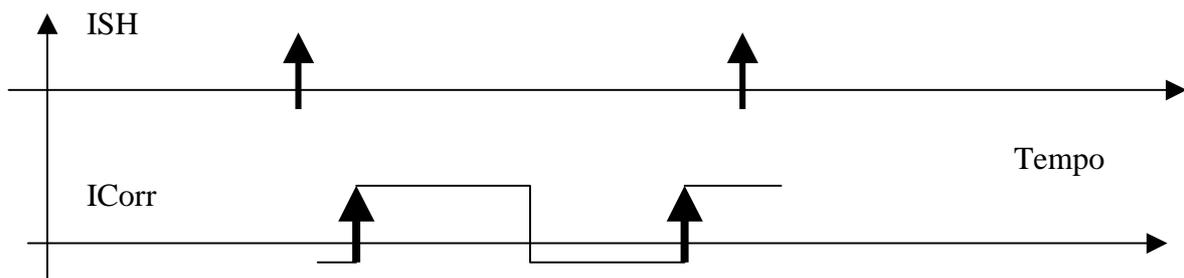


Figura-5 Relação temporal entre os sinais ISH e ICorr. Caso 2.

Caso 3. Para este caso, o ângulo de correção do cilindro atual está avançado e o do cilindro seguinte encontra-se atrasado. Desta forma para um período do SH, simplesmente não há pulso de ignição.

Caso 4. O caso 4 caracteriza-se pelo ângulo de correção do cilindro atual estar avançado e o do cilindro seguinte também encontra-se avançado. Desta forma para um período do SH, tem-se um pulso de ignição do cilindro futuro.

O algoritmo de funcionamento é cíclico e consiste em detecção de presença de detonação e cálculo de intervalos de tempo para o próximo cilindro. O corretor de ignição não conta com a presença de nenhum tipo de sensor de posição angular, por isso a correção de ângulo de avanço é feita com base no tempo a partir dos impulsos ISH. Para adiantar o sinal ICorr é preciso diminuir o intervalo de tempo, para atrasá-lo é preciso aumentar o intervalo de tempo. Na ausência de detonação o corretor de ignição adianta o ICorr em 1° por vez (na Eq.(1) $\delta = 1^\circ$), na presença de detonação o corretor atrasa o sinal ICorr em 10° (na Eq.(1) $b = 10$) O problema principal de realização deste tipo de controle é a detecção de detonação, ou seja como escolher o *threshold value* (SAE, 1996) certo para cada velocidade. Um *threshold* muito alto vai condicionar uma detonação profunda (*hard knock*), enquanto um *threshold*

muito baixo vai condicionar um funcionamento com ângulos de avanço correspondentes a potência do motor reduzida.

5. DIAGRAMA DE BLOCOS DO CORRETOR DE IGNIÇÃO.

O diagrama de blocos do corretor de ignição está mostrado na Fig. 6.

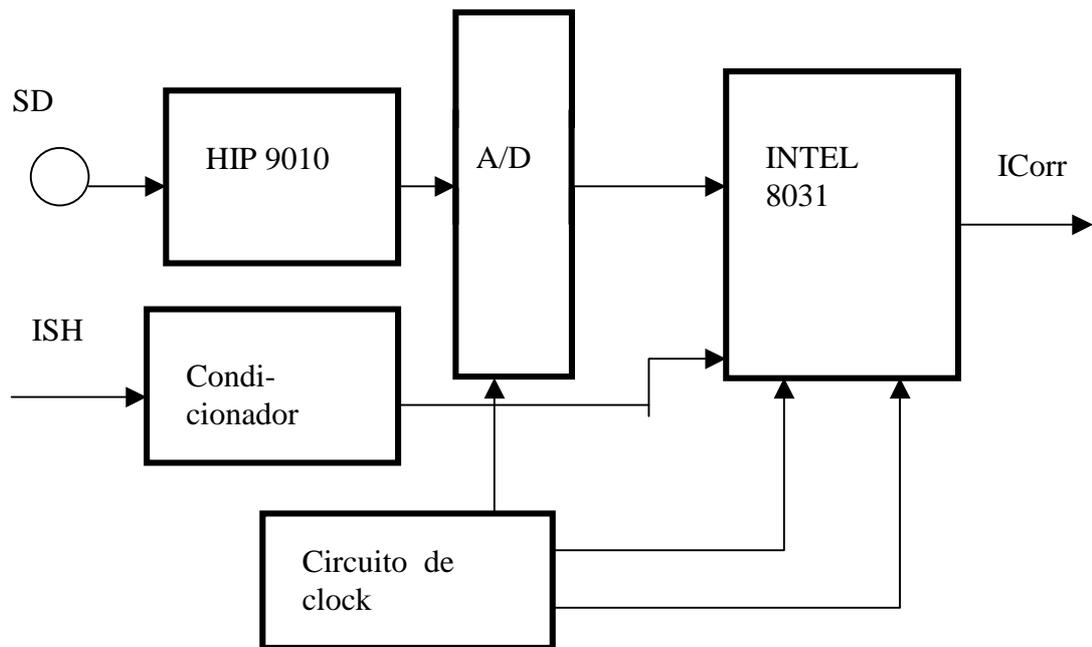


Figura-6 O diagrama de blocos do corretor de ignição.

O elemento principal é um microcontrolador de 8 bits INTEL 8031. O chip HIP 9010 da Harris é um circuito especializado para tratamento de sinais de sensores de detonação. Este chip contém um filtro passa faixa programável de 2ª ordem, um retificador de onda completa e um integrador com tempo de integração programável. O conversor A/D converte o sinal na saída do HIP 9010 para a forma digital. O condicionador serve para digitalizar o sinal ISH. O circuito de clock gera frequências necessárias para funcionamento do microcontrolador e do conversor A/D.

O método de detecção de detonação adotado, que consiste em filtragem passa-faixa com uma posterior retificação e integração, não é muito eficiente nas velocidades do motor acima de 4000 rpm, mas, geralmente, esta velocidade é a máxima para movimento na cidade. Os métodos mais avançados de detecção de detonação, como, por exemplo, publicado em Samimi & Rizzoni, 1994, exigem execução de um grande volume de cálculo e podem ser realizados em tempo real apenas por microprocessadores DSP (*Digital Signal Processor* – Processador Digital de Sinais) e não através de um microcontrolador de 8 bits que foi selecionado como base deste projeto.

6. TESTES.

O protótipo do corretor de ignição foi testado num carro de passeio Versailles 1.8 de ano 1991/92 da Ford. Para testar o funcionamento do corretor, o ângulo de avanço inicial havia sido diminuído e isto condicionou uma partida do motor mais facilitada. Os testes realizados revelaram uma boa confiabilidade do protótipo confeccionado. Os resultados estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Consumo de combustível.

Tipo de teste	Sem corretor	Com corretor
Na cidade	9 km/litro	10,5 km/litro
Na estrada	13 km/litro	14,5 km/litro

O carro testado foi abastecido sempre no mesmo posto de gasolina. Para calcular o consumo, o seu tanque foi abastecido por completo várias vezes e a cada 100 km após o último abastecimento. A quantidade de gasolina colocada no tanque foi anotada. Este procedimento se repetiu cinco vezes e o consumo foi calculado através da média aritmética.

7. CONCLUSÕES.

Foi projetado, confeccionado e testado um protótipo do corretor de ignição de baixo custo. Os testes feitos com o carro dotado deste corretor revelaram uma certa melhora no rendimento do motor. Os resultados obtidos coincidem quase que perfeitamente com os publicados no Automotive Handbook, 1995. As simulações feitas com base no modelo do motor a explosão mostraram a relação entre o desperdício de combustível e desajuste do ângulo de ignição real em comparação com o ideal.

O funcionamento do corretor de ignição pode ser aperfeiçoado através de escolha mais adequada do limiar (*threshold value*) de detonação para a toda faixa de velocidades do motor (900-6000 rpm), porém isto exige testes com o motor instalado numa bancada com dinamômetro (SAE, 1996) e com instrumentação adequada.

REFERÊNCIAS

- Automotive Handbook, 1993, BOSCH, 3^d edition.
Automotive Electric/Electronic Systems, 1995, BOSCH, 2^d edition.
Denton, T., 1995, Automobile Electric & Electronic Systems, SAE, Warrandale, PA.
Garrett, T.K., 1991, Automotive fuels and fuel systems. v. 1: Gasoline. SAE, Warrandale, PA.
Godbole, D., 1993, Automotive Demos for Xmath Automotive Suspension Design And Powertrain Speed Control. Tech. Report, Integrated Systems Inc., Santa Clara, CA..
Polonskii, M.M., 1999, Estabilização de velocidade da marcha lenta através de um controlador do tipo relê (em português). Applied Mechanics in the Americas, v.8, pp. 1217-1220.
SAE Publication N° 960496, 1996. Spark-ignition engine knock control and threshold value determination.
Samimi, B., Rizzoni G., 1994, Time-frequency analysis for improved detection of internal combustion engine knock, Proceedings of the IEEE International Symposium On Time-Frequency and Time-Scale Analysis, pp. 178-181.

OPTIMIZATION OF OPERATION OF THE INTERNAL COMBUSTION MOTORS EQUIPPED WITH CONVENTIONAL IGNITION SYSTEM.

***Abstract.** The research project executed at the University of Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brazil, is presented. This project aims at optimization of conventional ignition system operation. One cheap electronic module was developed to be added to the ignition system. A lot of simulations was realized to evaluate the benefit of the selected algorithm of spark time tuning. The economy about 8% to 10% had been calculated and this was confirmed by on-road tests with the prototype module.*

***Key words:** Electronic ignition, Knock, Optimization.*