

Detector de pré-ignição¹

Felipe Gabriel Kuhn Soares²

Marcos Zuccolotto³

Resumo

O presente artigo aborda o desenvolvimento do protótipo de um sistema detector de pré-ignição. A pré-ignição é uma combustão anormal que pode ocorrer em motores de alto desempenho e que acarreta a perfuração do êmbolo muito rapidamente. O detector de pré-ignição possibilita a percepção da ocorrência deste fenômeno, podendo ser empregado em testes laboratoriais em motores de competição com o intuito de evitar a quebra por pré-ignição. A proposta consiste no desenvolvimento de três etapas principais: o sensor de chama, o sensor de centelha e o discriminador de pré-ignição. Os resultados dos testes com o protótipo comprovam a viabilidade da proposta de solução. Os três estágios foram simulados isoladamente e integrados. Tiveram boa resposta em bancada e apresentaram imunidade ao ruído do sistema de ignição.

Palavras-chave: Pré-ignição. Motores de combustão interna. Sistema de ignição.

Abstract

The article is related to the development of a preignition detector prototype. Preignition is an abnormal combustion which can occur on high performance engines and can lead to piston erosion quickly. The preignition detector allows the phenomenon perception, and it can be applied in laboratory tests on racing engines with the purpose of avoid the failure by preignition. The proposal consists in three main stages development: a flame sensor, a spark sensor and a preignition discriminator. The test results with the stages demonstrate viability of proposed solution. All the three stages were simulated isolated and interconnected. The stages had a good response on the workbench and they had immunity to ignition system noise.

Keywords: Preignition. Internal combustion engines. Ignition system.

1 Introdução

Este projeto teve início a partir de uma visita ao laboratório de motores da Petrobras, na Refinaria Alberto Pasqualini, em Canoas. A pesquisa original versava sobre um sistema que percebesse a adulteração do combustível ven-

dido nos postos de abastecimento, mas ao consultar os engenheiros Dinarte Santos e Dócles Dalávia, a complexidade de se elaborar um dispositivo de análise de combustível ficou evidente. Um novo tema para a pesquisa surgiu desta visita, sugerido pelos especialistas: a detecção

¹ Projeto premiado na Intel ISEF 2009: 4º lugar na categoria Engenharia Elétrica e Mecânica.

² Aluno do Curso Técnico de Eletrônica da Fundação Liberato. <felipegks@gmail.com>

³ Mestre em Engenharia Elétrica – UFRGS. Professor do Curso Técnico de Eletrônica da Fundação Liberato. <zucco@liberato.com.br>

Recebido em 14/12/2009 e aceito em 11/05/2010.

da pré-ignição. A proposta foi aceita e desenvolvida com título Detector de Pré-ignição, cujos detalhes são apresentados neste artigo.

2 A Pré-ignição

A pré-ignição é um fenômeno que ocorre dentro da câmara de combustão de uma máquina de ignição por centelha. É um acendimento do motor antes do tempo correto, e pode acarretar a perfuração do êmbolo. Em casos extremos, gera a quebra do motor (TERAO, 2007). O surgimento da pré-ignição está associado intimamente com a temperatura dentro da câmara de combustão.

De acordo com John B. Heywood (1988), a pré-ignição é a mais destrutiva dentre os fenômenos de combustão anormal. Sua causa raiz são pontos quentes, localizados nas partes menos refrigeradas da câmara, onde depósitos de carbono podem se estabelecer. Exemplos comuns de pontos ignescentes são velas, válvulas e partes metálicas como cavidades ou os anéis do êmbolo. As consequências da pré-ignição podem ser o rompimento dos anéis, erosão da cabeça, derretimento, fusão ou quebra do êmbolo.

A pré-ignição é um fenômeno diferente da detonação. Detonação é a combustão da mistura ar-combustível depois da centelha da vela, que pode ser controlada com o retardo do ponto de ignição. Sua causa principal é a baixa octanagem do combustível. Pode ser percebida por um som de martelada em metal, popularmente conhecido como “batida de pino.” Já a pré-ignição é silenciosa, com efeitos muito mais violentos para o motor. Sabe-se que um motor pode conviver milhares de quilômetros com a detonação. Todavia, no caso de uma pré-ignição, a quebra é quase instantânea. Heywood (1988) aponta que em veículos comerciais a ocorrência da pré-ignição é bastante rara, mas quando se trata de máquinas preparadas para competição, ela é muito mais frequente.

Diócles Dalávia, engenheiro mecânico do Laboratório de Motores da Petrobras, em en-

trevista no dia 14/05/2008, disse que um sistema de detecção de pré-ignição “[...] é de funcionamento simples, mas ninguém construiu esse detector ainda. É o tipo de coisa que nós temos interesse em ajudar a fazer e é uma ferramenta que vai abrir uma frente de pesquisa que a gente está desenvolvendo [...]”.

Dinarte Santos, também engenheiro da Petrobras, afirmou que os efeitos da pré-ignição aparecem de acordo com o regime imposto ao motor. Um veículo em uma trajetória de subida, acelerado intensamente, por exemplo, tem uma suscetibilidade à pré-ignição muito maior que em outra situação em que exija menos do motor. No primeiro caso, o tempo entre a primeira pré-ignição e a quebra da máquina não passa de cinco minutos.

3 Motores de combustão interna

A figura 1 apresenta a imagem de uma câmara de combustão de uma máquina quatro tempos do ciclo Otto. De acordo com Pulkrabek (1997), o motor de ignição por centelha possui os seguintes ciclos: admissão, compressão, explosão e descarga. Na admissão, ocorre a entrada de ar-combustível. O êmbolo move-se do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), a válvula de admissão é aberta, e a de descarga fechada. É criado um vácuo na câmara que suga o ar durante a injeção da mistura. Na compressão, o êmbolo se desloca do PMI para o PMS com todas as válvulas fechadas, comprimindo a mistura. Ao fim da compressão, com o êmbolo em PMS, a vela de ignição é acionada e a combustão se inicia.

No ciclo de expansão, todas as válvulas estão fechadas. A alta pressão criada durante a combustão empurra violentamente o cilindro para PMS e se produz trabalho. Ao fim do ciclo de trabalho, a válvula de descarga é aberta. No ciclo de descarga, o quarto tempo, o êmbolo desloca-se do PMI ao PMS, expelindo os gases da combustão. Ao fim desse movimento, a válvula de descarga se fecha e a válvula de admissão se abre, e o ciclo se repete.

Diferentes métodos são utilizados para produzir a alta tensão necessária para causar a

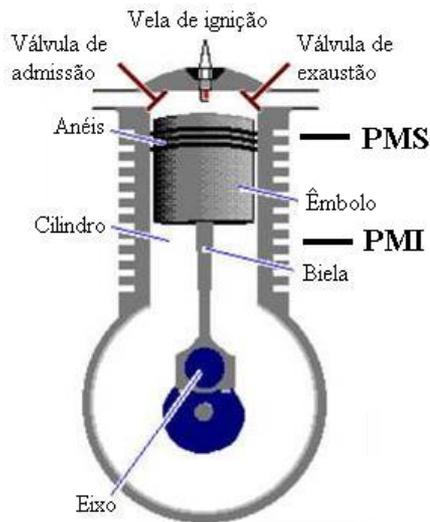


Figura 1: Motor Ciclo Otto
(Fonte: PULKRABEK, 1997, p.26)

descarga elétrica entre os eletrodos da vela de ignição (BAUMGARTEN, 2006). Um sistema comumente empregado é a combinação entre bateria e bobina. A baixa tensão da bateria é elevada pela bobina, a qual fornece um alto potencial para a vela de ignição. A bobina de ignição é na realidade um transformador que possui dois enrolamentos de fio de cobre num núcleo de ferro. O primeiro enrolamento, denominado primário, consiste em espiras de fio grosso, já que nele circula uma corrente intensa sob o regime de tensão da bateria. O enrolamento secundário, por sua vez, consiste em espiras de um fio muito fino. A bobina possui como função elevar os 12 volts da bateria para uma tensão em torno de 20.000 volts, que são transmitidos para as velas. Esta elevação é explicada pela relação entre o número de espiras no primário e no secundário, e a indução de alta tensão no secundário ocorrerá em função da comutação do primário.

O sistema de ignição deve fornecer tensão suficiente para a descarga entre os eletrodos e também para acender a mistura de combustível próxima da vela nas mais diversas condições de operação. Ele precisa criar essa centelha no tempo apropriado durante o ciclo de compressão. Ainda de acordo com Pulkrabek (1997), com uma relação adequada para ignição e com uma distribuição homogênea da mistura, energias de

centelha da ordem de 1mJ e duração de alguns micro segundos bastariam para iniciar a combustão. Todavia, o ar, o combustível e o gás exaurido não são distribuídos uniformemente entre os cilindros. Além disso, a mistura desses três componentes não é homogênea e a pressão, a temperatura e a densidade da mistura entre os eletrodos, no momento da centelha, afetam a tensão necessária para o centelhamento. O estado das velas também é um fator determinante, pois a erosão dos eletrodos aumenta o espaço (*gap*) entre eles. Com isso torna-se mais difícil romper a rigidez dielétrica do ar.

De acordo com Heywood (1988), as características principais de uma fonte de alta-tensão de ignição podem ser listadas como: (1) alta tensão para romper a rigidez dielétrica do ar entre os eletrodos; (2) fonte de baixa impedância; (3) grande capacidade de armazenamento de energia capaz de produzir a centelha; (4) duração suficiente do pulso de tensão para garantir a ignição.

A função da vela de ignição é iniciar a combustão da mistura vapor-combustível-ar na câmara. Seus três principais componentes são o isolador, os eletrodos e a carcaça. O material isolante deve ser adequado à temperatura, à elasticidade e à compressão. Possui baixa porosidade para limitar a absorção dos gases e alta resistência para prevenir perdas de tensão nas temperaturas ambiente e operacional.

Os eletrodos geralmente são feitos de ligas de níquel para suportar, com o mínimo de erosão, as altas tensões, as altas temperaturas e os gases corrosivos. A temperatura superficial do eletrodo central passa dos 600° C em operação normal. Existe uma larga variedade de geometria dos eletrodos.

As figuras 2 e 3 apresentam o comportamento normal do circuito primário em sistemas platinados e transistorizados. Conforme Schommer & Xavier (2006), o gráfico padrão do circuito primário divide-se em:

- Seção de centelha (A): Composta por oscilações primárias quase iguais em ambos os lados da linha zero, mostrando o início do disparo e representando a tensão induzida

no primário durante o centelhamento da vela de ignição;

- Seção intermediária (B): Apresenta uma série de oscilações que iniciam quando o arco na vela de ignição chega ao fim. Esta seção comumente tem 5 oscilações;

- Seção de permanência: Inicia-se ao fechar o platinado/transistor (nota-se uma linha para baixo decrescendo em direção à linha zero).

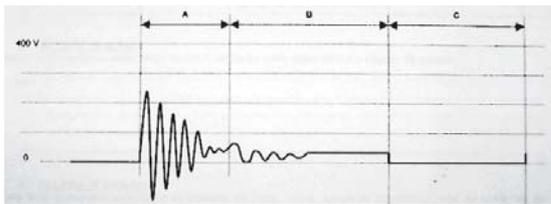


Figura 2: Gráfico do circuito primário de ignição platinado [V(t)] (Fonte: SCHOMMER e XAVIER, 2006, p.50)

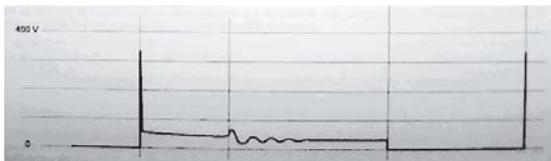


Figura 3: Gráfico do circuito primário de ignição eletrônico (inferior) [V(t)] (Fonte: SCHOMMER e XAVIER, 2006, p.50)

O comportamento do circuito secundário está expresso na figura 4:

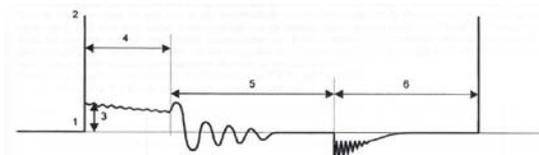


Figura 4: Gráfico da tensão no circuito secundário em função do tempo (Fonte: SCHOMMER e XAVIER, 2006, p. 61)

Ainda de acordo com Schommer & Xavier (2006), é possível interpretar a figura 4 da seguinte maneira:

- Momento de disparo da ignição (1);
- Pico de tensão/tensão de disparo (5 a 15kV) (2);
- Tensão de queima/de centelha (3kV) (3);
- Duração da centelha/tempo de queima (3ms) (4);
- Tensão residual do circuito (5);
- Novo tempo de carga da bobina/seção de permanência (6).

4 Fenômenos de combustão anormal

De acordo com Heywood (1988), dos vários processos de combustão anormal importantes na prática, os dois principais são a detonação e a ignição superficial. Esses fenômenos podem causar grande dano ao motor. Quando não tão severos são uma fonte de ruído.

Detonação é o nome dado ao som transmitido através da estrutura do motor quando ocorre a ignição espontânea de uma porção de mistura ainda não queimada. Quando esta combustão anormal acontece, há uma rápida liberação da energia, causando aumento localizado de pressão e propagação de ondas de pressão na câmara de combustão.

Ignição superficial é o acendimento da mistura ar-combustível por um aquecimento localizado nas paredes da câmara de combustão, como uma válvula ou vela quentes, ou uma sobra incandescente da combustão. Pode acontecer antes e depois da centelha (pré-ignição/auto-ignição e pós-ignição/detonação). Cada ignição superficial produz uma chama turbulenta no ponto onde se iniciou o fenômeno, a qual vai se propagando de maneira semelhante a uma ignição normal.

A ignição espontânea é regida pela temperatura e pelo histórico de pressão na câmara de combustão, e, por conseguinte, várias combinações da ignição superficial e da detonação podem ocorrer. Heywood (1988), em sua publicação *Internal Combustion Engines Fundamentals*, apresenta outros tipos de ignição superficial, como *spark knock*, *wild ping*, *rumble* e *run-on*.

Dentre todos os fenômenos de combustão anormal, a pré-ignição é potencialmente a mais destrutiva. As partes que podem causar a pré-ignição são as menos arrefecidas e onde pontos quentes podem surgir. Exemplos comuns são velas, válvulas e partes metálicas como cavidades ou os anéis do êmbolo. Sob condições normais, usando uma vela de ignição adequada, a pré-ignição pode ser iniciada por uma válvula coberta de depósitos provenientes do combustível e do lubrificante que penetram na câmara. A utilização de velas com maior poder

de dissipação e a redução no consumo de óleo podem aliviar esse problema. Os fundamentos que minimizam a pré-ignição são: vela com faixa nominal de temperatura adequada, remoção de sujeira e válvulas bem refrigeradas.

A detonação, em sua forma mais suave, ocorre em largos regimes de aceleração. Também restringe a eficiência do motor, limitando a razão de compressão do motor. A ocorrência e a gravidade do fenômeno dependem da resistência do combustível à queima, definida como octanagem. Um número maior de octanos também significa maior resistência a detonação. A octanagem da gasolina pode ser incrementada com a utilização de aditivos. Entretanto, o número de octanos está intimamente ligado ao tipo de aplicação do motor, seu projeto e suas condições de trabalho.

O impacto da detonação depende de sua intensidade e duração. Ele até pode não causar danos de durabilidade ou perdas de performance, assim como pode acarretar sérios problemas ao motor. No automobilismo, por exemplo, é feita uma distinção entre a detonação de aceleração e a de velocidade constante. A de aceleração possui curta duração e tem baixa probabilidade de causar danos. Já a de velocidade constante pode causar perdas mais sérias, especialmente porque não é possível ouvir os ruídos indicadores de problema em regimes elevados. Ainda de acordo com Heywood (1988), os problemas podem ser:

- Pré-ignição: depósitos presentes em pontos críticos da câmara podem provocar a pré-ignição;
- Knock descontrolado: o fenômeno vai acontecendo cada vez mais cedo no ciclo de compressão;
- Erosão gradual de peças da câmara de combustão.

O motor pode ser danificado por detonação de diferentes maneiras: quebra dos anéis do êmbolo, rompimento da vedação da cabeça e erosão da cabeça do êmbolo, derretimento, fusão e quebra do êmbolo. Quando a detonação é muito severa, caso da pré-ignição, uma

grande quantidade de calor é transferida para as paredes da câmara e para o êmbolo, acarretando a quebra do motor em minutos.

5 Metodologia

O projeto, destinado a testes laboratoriais em motores de competição que, por sua natureza, são submetidos a condições de temperatura que podem acarretar uma pré-ignição, possibilitará a identificação do auto-acendimento do motor, fenômeno que leva à perfuração do êmbolo. Deve possuir um dispositivo detector de chama, que identificará o momento da combustão. Além disso, o protótipo deve ser independente do sistema de injeção de combustível. Também deve ser capaz de realizar a detecção da pré-ignição nos diferentes regimes de rotação do motor.

A percepção da ocorrência de uma pré-ignição implica a utilização de um sensor de queima da mistura de ar-combustível. Aliado a este sensor está o discriminador de pré-ignição, responsável por comparar os sinais de chama e de centelha. Se a chama for detectada depois da centelha, o motor está em funcionamento normal. Já se o plasma vier antes da centelha, caracteriza-se uma pré-ignição. O diagrama da figura 5 apresenta esta idéia:

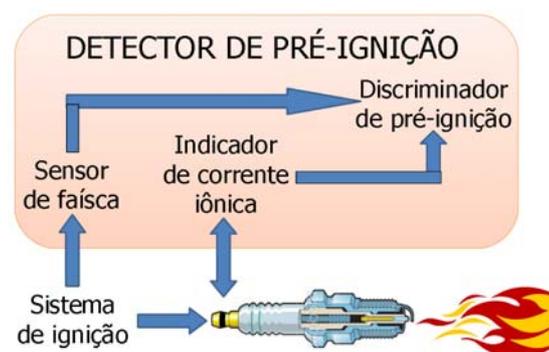


Figura 5: Proposta de solução

A proposta para o sensor de chama é a utilização da própria vela do cilindro como detector, pois assim não há a necessidade de alterações mecânicas no bloco do motor. Na ocorrência de combustão, há formação de íons na chama. A presença destes íons facilita a condução de corrente elétrica entre os eletrodos da vela. Quando não há chama, não há corrente

iônica, portanto, a detecção da combustão ocorre a partir da medição desta corrente elétrica.

A detecção da corrente iônica é feita a partir da aplicação de uma diferença de potencial na vela com amplitude tal que não produza a centelha na vela, mas suficiente para estabelecer um fluxo de íons entre os eletrodos na presença da chama, que será detectado através da medição da corrente elétrica deste circuito de excitação. O discriminador recebe um pulso toda vez que a corrente iônica é detectada pelo sensor.

O instante onde ocorre a centelha é medido, utilizando-se uma ponteira indutiva, anexada ao cabo de vela e conectada ao discriminador.

O discriminador de pré-ignição recebe dois sinais digitais, um de chama e outro de centelha, compara o tempo em que estes sinais ocorrem e, a partir do resultado, pode alertar uma pré-ignição. Quando o sinal de chama ocorre após o sinal de centelha, aponta a situação de funcionamento normal, mas quando o sinal de chama precede o sinal de centelha, é indicativo de pré-ignição.

6 Desenvolvimento do projeto

O primeiro teste realizado foi a medição da resistência da vela na presença da chama. Os eletrodos da vela foram postos em contato com uma chama de GLP e, através de um megôhmetro, foi aplicada alta tensão sobre a vela, de tal forma que pôde ser mensurada sua impedância. Foram obtidos valores de 300 M a 500 M Ω , conforme a posição da chama nos eletrodos.

Partiu-se então para o desenvolvimento do circuito sensor de chama. Utilizando um multiplicador de tensão diodo-capacitor como fonte de excitação, obteve-se 500 V DC para polarizar a vela de ignição, incluindo-se neste circuito um resistor de 1 M Ω para medição da corrente. Quando o plasma da chama atinge o eletrodo da vela a corrente iônica é percebida através da tensão neste resistor. Como o que interessa é a identificação da corrente e não sua amplitude, utiliza-se um amplificador operacional na configuração comparador de ten-

são, que atua como discriminador da presença de corrente no circuito.

Foi desenvolvida uma bancada com um sistema de ignição, apresentada na figura 5, com o intuito simular o protótipo. Na bancada também foi instalado o sensor de chama. Optou-se por um sistema de ignição a platinado, de um motor 4 cilindros, com bobina única e distribuidor, conforme o circuito da figura 7.



Figura 6: Bancada de testes

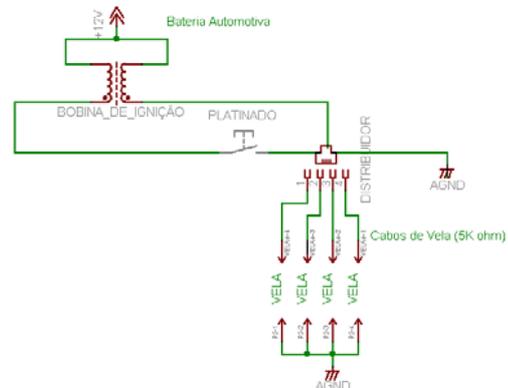


Figura 7: Distribuidor e velas

Para captação do sinal de centelha foi utilizada uma ponteira indutiva ALFATEST. O sinal produzido pela ponteira é condicionado por um circuito baseado em amplificadores operacionais e comparadores. A figura 8 apresenta a resposta do indicador de centelha:

Pode-se observar, na figura 8, a medição do sinal da ponteira indutiva no canal 1 (500mV/div, 2,5ms/div). Já o canal 2, na parte inferior da imagem, é a saída do segundo módulo do amplificador operacional (5V/div, 2,5ms/div). Percebe-se que o atraso na amplificação do sinal é bastante pequeno.

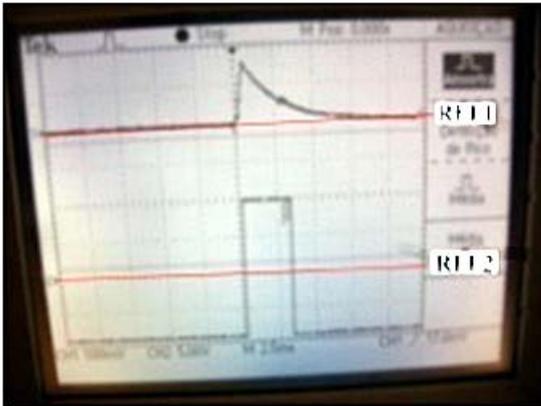


Figura 8: Resposta do sensor de centelha

Foi realizado um teste com os dois sensores desenvolvidos (figura 9), com o objetivo de testar a imunidade do sensor de chama ao centelhamento.

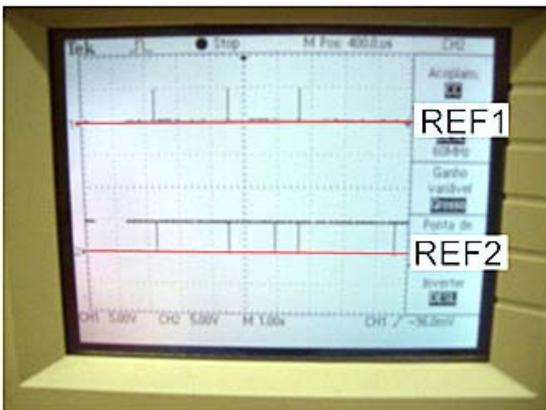


Figura 9: Sensor de chama e sensor de centelha (CH1: 5V/div, CH2: 5V/div, varredura horizontal: 1s)

O canal 1 é o sinal medido na saída do opto-acoplador do sensor de chama. Já o canal 2 está na saída do opto do sensor de ignição. Os picos verticais representam os momentos em que houve centelha. Percebe-se que o sensor de chama responde à presença das centelhas. Para filtrar esta informação, todo o sinal recebido pelo sensor de chama instantes antes da centelha é ignorado. Esta rotina é executada da seguinte forma: após a detecção da centelha, o *software* calcula o tempo transcorrido desde a centelha anterior, e assume este tempo como período de centelhamento. Os sinais recebidos em uma janela de tempo equivalente a 5% do período de centelhamento serão ignorados.

O discriminador de pré-ignição foi desenvolvido utilizando um PIC16F628A. A figura 10 apresenta o fluxograma simplificado do software do discriminador:

O teste do discriminador foi realizado com botões do tipo *push-bottom* simulando os sensores de chama e de centelha (figura 11). Ao pressionar o botão S2 uma interrupção por mudança de nível lógico era gerada no PIC, simulando o comportamento do sensor de centelha. Já o pressionamento de S1 equivalia a um sinal de chama.



Figura 10: Fluxograma do discriminador de pré-ignição.

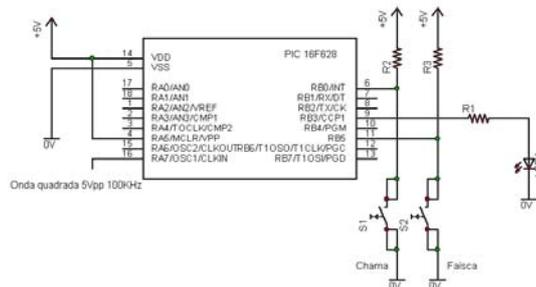


Figura 11: Teste com microcontrolador

Pressionando S2, era gerado um tempo entre centelhas dentro do programa. Logo depois de S2 era pressionado S1 para representar a chama. Se o acionamento de S1 viesse logo antes de S2, o *software* entendia como pré-ignição e ligava LED1. O alerta também era dado quando S1 ficava muito tempo pressionado. Esse teste comprovou o funcionamento da unidade de controle isolada dos demais circuitos.

Tão logo a ideia foi apresentada, Díocles Dalávia e Dinarte Santos destacaram a quantidade de ruído que o sistema de ignição gera. A consequência mais grave desse problema ocorre na etapa de controle, mais especificamente nos processadores, os quais podem ter a execução travada e/ou reinicializarem inesperadamente.

Aproveitando a montagem do PIC16F628A descrita anteriormente, foi feito um teste para verificar se a etapa não sofreria com a interferência produzida pelas velas de ignição.

No próprio código do microcontrolador foi adicionada uma rotina de chaveamento de um pino de saída, ora em nível alto, ora em baixo, e com um osciloscópio, monitora-se a ondulação quadrada no terminal. Ligando o sistema de ignição e gerando centelhas nas quatro velas, o mesmo sinal continuou sendo medido no ponto, sem congelamento da imagem ou alteração nos parâmetros, comprovando a imunidade ao ruído do discriminador.

O circuito final é a união do sensor de chama, do sensor de centelha, da etapa de acionamento da bobina e o discriminador de pré-ignição. Em paralelo com o resistor do sensor de chama, foram inseridos diodos 1N4148 para limitar a tensão de entrada do comparador, evitando a degradação deste componente na descarga da bobina. Foram inseridos diodos Zener de 4V7 nas entradas e na alimentação do microcontrolador, e um capacitor de 1000 μF x 10 V na sua alimentação.

Foi realizada uma simulação com o circuito final do protótipo. O distribuidor foi rotacionado manualmente, gerando centelhas nas velas. O detector estava conectado em uma das velas, e usando-se um isqueiro a chama foi inserida nos eletrodos desta vela, simulando a combustão do motor. Desta maneira, o LED conectado ao microcontrolador acendeu quando a chama foi aplicada antes da centelha. Depois da centelha, se o LED estivesse ligado, ele desligava. As figuras 12 e 13 remetem ao momento da simulação:



Figura 12: Simulação do protótipo

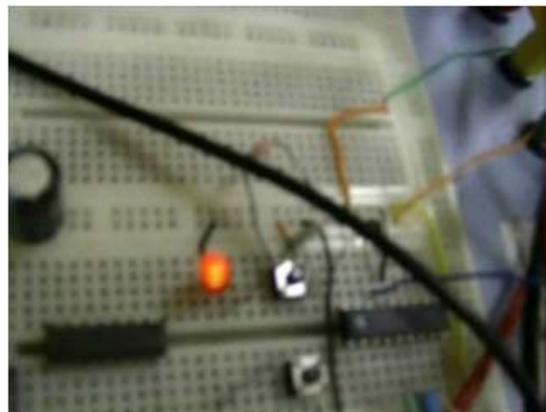


Figura 13: Sinalização de pré-ignição

7 Conclusão

O projeto Detector de pré-ignição provou que ainda é possível inovar num campo da ciência dominado por grandes corporações multinacionais e que está bastante desenvolvido: o automobilismo. É inegável a ocorrência da pré-ignição em motores de competição, e o presente trabalho teve o intuito de identificar a ocorrência deste fenômeno.

Foram desenvolvidas três etapas principais: o sensor de chama, o sensor de ignição e a unidade de controle. Dentre essas partes, a de maior destaque foi o sensor de chama, o qual aproveitou a própria vela de ignição para identificar o momento da combustão na câmara. Para perceber a ignição, foi empregada uma ponteira indutiva, já a unidade de controle esteve representada no microcontrolador.

Os resultados dos testes superaram as expectativas. O sensor de chama teve a propriedade de gerar pulsos na presença do plasma. A ponteira indutiva também apresentou bons resultados, produzindo uma tensão facilmente mensurável nos terminais de saída.

É importante ressaltar que os testes no sistema ainda não se esgotaram. Ainda é necessário unir as etapas e inseri-las em um motor. O objetivo não é gerar uma pré-ignição para avaliar se o sistema a percebe, mas sim testar a estabilidade da proposta em situação real. Um novo desafio seria implantar o sistema em um motor de competição, para então validar o detector de pré-ignição.

Retomando o depoimento de Dalávia, a pesquisa abre uma frente de pesquisa em mo-

tores de competição. Uma área muito fértil, devido à quantidade de campeonatos automobilísticos e ao dinheiro investido pelas empresas montadoras e equipes de competição em todo o mundo.

O sistema detector de pré-ignição possui as ferramentas necessárias para outro estudo inovador: a determinação do tempo de queima do motor 4 tempos. Ainda, de acordo com os engenheiros da Petrobras, o tempo de queima da mistura ar-combustível é uma incógnita complexa, dependente de inúmeros fatores, como a temperatura na câmara e a qualidade da mistura. Sendo assim, é possível comprovar o funcionamento do sistema detector de pré-ignição em bancada. Considerando que o microcontrolador apresentou imunidade contra os ruídos, a probabilidade de funcionamento das etapas em um motor real é alta. Por mais que o fenômeno ocorra em frações por segundo, o tempo de resposta dos componentes eletrônicos assegura medições corretas. Em uma futura continuidade do protótipo, é imprescindível a elaboração de um novo conjunto de testes. As simulações podem co-

meçar numa câmara de combustão de um automóvel simples, podendo chegar ao objetivo maior: motores de competição.

Referências

BAUMGARTEN, Carsten. **Mixture Formation in Internal Combustion Engines**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 294p.

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engines Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930p.

PULKRABEK, Willard W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 411p.

TERAO, Kunio. **Irreversible phenomena: ignitions, combustions and detonation waves**. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007. 409p.

SCHOMMER, Elói; XAVIER, Flavio. **Elói Training: Sistemas de ignição**. São Leopoldo, 2006. 84p.