



## SIMULAÇÃO DE UM DETECTOR DE DETONAÇÃO POR AMPLITUDE, PARA CONTROLE DE MOTORES DE CICLO OTTO

**Caio Glauco Sánchez**

**Wilson Gonçalves Júnior**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Depto. de Engenharia Térmica e de Fluidos, Cx. P. 6088, 13083-970, Campinas, SP

***Resumo:** Este trabalho apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento de um sistema alternativo de identificação de detonação para motores de ciclo Otto com ignição por centelha. Tendo-se como premissas a simplicidade e a utilização de componentes do sistema utilizado atualmente. Este novo detector está baseado no princípio de intensidade do sinal, para identificar a detonação, e não no princípio da integral. Sendo um sinal elétrico, a forma mais simples de identificar a detonação passa a ser através de um trigger, que é ativado apenas quando a janela de aquisição está aberta. Pela análise dos resultados verifica-se que este tipo de sistema de detecção de detonação pode ser aplicado em substituição aos sistemas atuais, porém carecendo de maiores estudos, tanto simulando-o para outras condições de operação do motor, como em outros motores, de forma a evitar as particularidades de cada um. Este sistema é versátil, pois pode-se aplicar a qualquer motor, somente mudando-se o limite de tensão de ruído de fundo.*

***Palavras chave:** detector de detonação, motor Otto, controle*

### 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de sistemas de controle aliado à intensa utilização de recursos eletrônicos para garantir respostas imediatas, consegue-se a utilização mais eficiente da potência e do torque disponível nos motores de ignição por centelha modernos. No caso da indústria brasileira, onde as tolerâncias construtivas dos motores ainda são grandes, há uma interferência direta destas na taxa de compressão e conseqüentemente nas faixas de avanço de ignição que permitirão o melhor desempenho para uma dada aplicação. A necessidade de diminuir custos justifica a pesquisa de sistemas de ignição mais simples, porém que garantam o funcionamento adequado dos motores, sem que se tenha de alterar as tolerâncias dimensionais.

## **2 PROCESSO DE COMBUSTÃO EM UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA**

Em um motor ciclo Otto de ignição por centelha (MIC), após comprimida a mistura, antes do pistão atingir o ponto morto superior (PMS), uma fagulha proveniente da vela de ignição provoca a combustão da mistura ar/combustível. Neste momento inicia-se uma primeira fase da combustão, onde um pequeno núcleo de chama se propaga através do restante da mistura não queimada. Porém, enquanto este núcleo não alcança dimensões da ordem de grandeza das dimensões lineares da câmara de combustão, não se consegue aumento da velocidade da frente da chama, existindo portanto um atraso temporal aproximadamente constante com relação ao movimento do pistão. Este atraso depende da temperatura, da pressão e da qualidade da mistura ar combustível. Ele atinge seu mínimo com mistura ligeiramente mais rica que a estequiométrica. Logo se inicia uma segunda fase da combustão, onde todo o restante do combustível é queimado, que termina após o pico de pressão, gerando expansão dos gases e trabalho positivo. Normalmente nos motores modernos o pico de pressão situa-se entre 5 e 20° depois do PMS. É portanto desejável que a combustão inicie antes do PMS, para uma melhor queima e melhor aproveitamento deste trabalho. Para se obter o máximo trabalho líquido (máxima pressão média efetiva, PME) deve-se ajustar o ponto de ignição. Para se conseguir o ponto de ignição adequado, introduz-se o conceito de mínimo avanço para o melhor equilíbrio (MBT, em inglês, Minimum Advance for Best Balance) onde o ponto de ignição é otimizado para se obter o maior torque possível em uma determinada condição de operação do motor.

Pode-se notar um crescimento da pressão com o aumento do ponto de ignição. O valor máximo de PME indica o MBT em graus de avanço em relação ao PMS. Porém um fenômeno indesejável, a pré-ignição em outro ponto da câmara, pode ocorrer devido as altas taxas de compressão (portanto PME mais altas) utilizadas nos motores atuais. Para uma melhor compreensão do fenômeno de detonação, pode-se imaginar a câmara de combustão como um sistema discreto. Com o início da combustão a partir da vela de ignição há gradientes de temperatura e pressão, normais à frente de chama, que evoluem nesta mesma direção. Quando, em pontos distante da vela, os valores de pressão e temperatura forem tais que a energia interna fique maior que a energia de ativação, deflagra-se outra frente de chama que, ao chocar-se com a frente principal, produz uma onda de choque que se propaga dentro da câmara de combustão. Estas ondas de choque provocam uma oscilação da pressão na câmara de combustão, cujas frequências fundamentais são determinadas pela geometria da câmara e pela velocidade de som nesse meio. Esta ressonância na câmara excita frequências naturais do bloco, audíveis como um tom metálico característico da detonação. Com a redução do ponto de ignição, isto é, com a redução do avanço, faz-se desaparecer tal ruído. Portanto define-se o *máximo avanço permitido para que não haja detonação no ciclo* (LDI) para cada regime de rotação, carga do cilindro e temperatura da câmara. Ao conjunto destes avanços chama-se de *border line*. Este fenômeno está associado a uma alta temperatura na câmara de combustão, tornando propício o surgimento do evento no ciclo subsequente. Por isso, além de reduzir-se o avanço, deve-se também enriquecer-se a mistura, pois a retirada de calor da câmara para vaporizar o combustível diminui esta temperatura. Deve-se lembrar que o efeito da oscilação de pressão e temperatura na câmara pode causar danos aos pistões (cavitação na cabeça do pistão) e danificar os casquilhos, bielas e o pino do pistão.

## **3 A DETECÇÃO DA DETONAÇÃO EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA**

A detonação em MIC pode ser detectada por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos utilizam-se de sensores de pressão na câmara de combustão, cujo sinal é depois

processado para avaliar se houve ou não detonação. O método indireto analisa as vibrações no bloco do motor.

### 3.1 Detecção de Detonação por Análise da Vibração no bloco.

Este método consiste em monitorar a vibração do bloco do motor com acelerômetro a fim de captar algumas frequências naturais deste, que são excitadas pelos harmônicos da oscilação da pressão na câmara de combustão. Para a calibração deste sistema é necessário encontrar no bloco do motor a posição do acelerômetro que forneça o sinal mais claro, ou seja que apresente as maiores amplitudes para as frequências de detonação estimadas durante a fase de projeto. Após localizado o sensor, pesquisa-se a frequência de detonação que mais se sobressai. Este sinal será amplificado e filtrado de forma a evitar que ruídos provenientes de outras formas de excitação sejam processados. Sabendo-se que a detonação só ocorre após o pico de pressão na câmara ( $5^\circ$  a  $20^\circ$  depois do PMS) defini-se uma janela de aquisição do sinal, evitando que ruídos de fechamento e de abertura das válvulas de admissão e exaustão sejam captados, pois estes ruídos de alta intensidade mascaram a detonação. Na Figura 1 tem-se um exemplo de aquisição do ruído do fechamento das válvulas em ciclos consecutivos. O fato deste ruído apresentar valores diferentes em ciclos consecutivos é devido a rotação da válvula em torno de seu eixo.

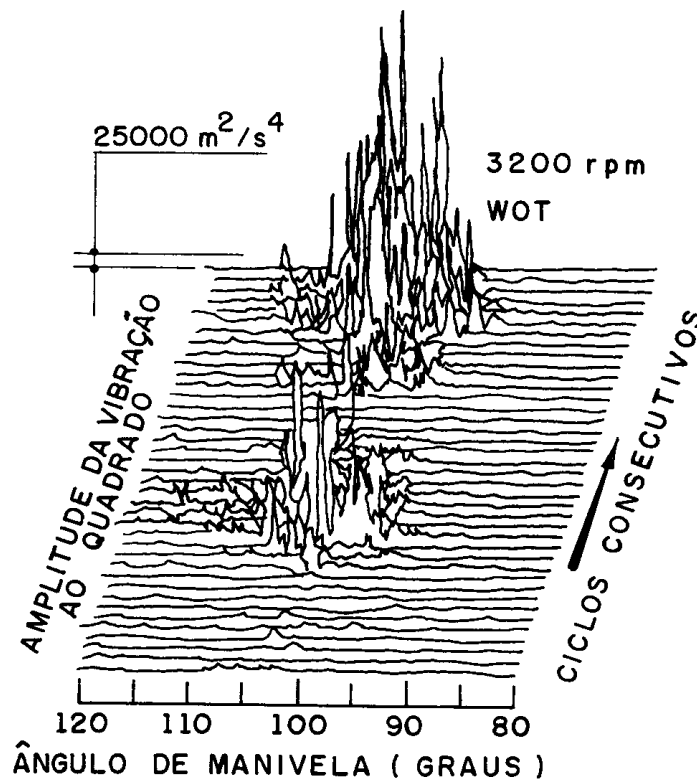


Figura 1. Sinal do ruído de válvulas em função do ângulo do eixo de manivelas para ciclos sucessivos.

Após aberta a janela de aquisição, o sinal proveniente do sensor é filtrado na frequência de detonação e é também retificado (obtendo-se o valor absoluto do sinal). Em alguns casos a retificação é substituída pela obtenção do sinal elevado ao quadrado (tornando o sinal também positivo). Isto permite a integração deste sinal. Na Figura 2 estão representadas as integrais do sinal elevado ao quadrado e do sinal retificado, para comparação. Com o objetivo de

identificar a detonação, o método da integral do sinal elevado ao quadrado se comporta melhor, devido à subida mais rápida da rampa da integral, de forma a se sobrepor significativamente à integral do ruído. No caso da integração do sinal retificado, a rampa da integral do sinal de detonação não se destaca da integral do ruído, podendo confundir ou mascarar os resultados.

Atualmente a maioria dos sistemas de controle utiliza a integral do sinal retificado por apresentar maior rapidez de processamento e baixo custo, necessitando apenas de um acelerômetro.

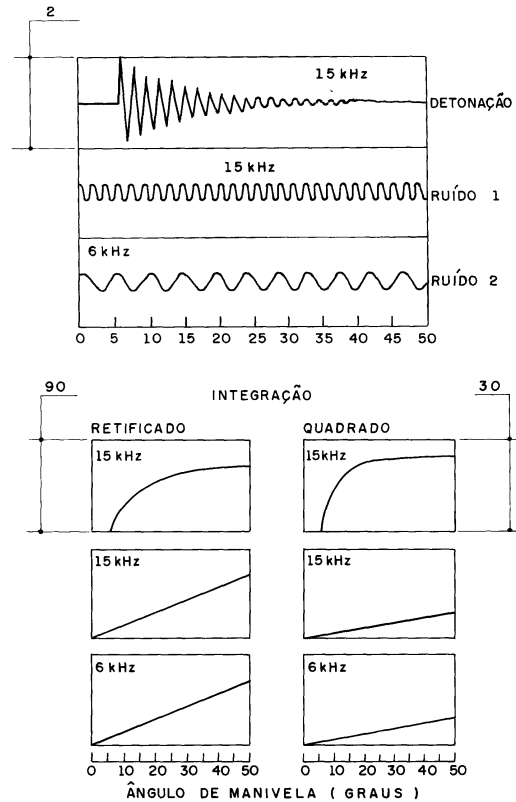


Figura 2. Ilustração das diferentes integrais obtidas quando da integração do sinal retificado ou da integração do sinal elevado ao quadrado.

#### 4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE IGNIÇÃO ELETRÔNICA

Nos sistemas de ignição eletrônica atuais, a posição do PMS do cilindro 1 é identificada por um sensor tipo "Hall", que analisa as informações de um disco ligado ao eixo de manivelas. Neste disco, o cilindro número 1 é identificado por uma janela de maior duração, conforme é mostrado na Figura 3. Conhecendo-se a seqüência de ignição, pode-se identificar a posição angular de todos os cilindros, fundamental para o controle do ponto de ignição.

Durante o funcionamento do motor coleta-se a pressão no coletor, a posição da borboleta de admissão, a rotação do motor, a temperatura do ar no coletor e a temperatura da água de arrefecimento no bloco do motor. Com estes parâmetros estabelece-se a quantidade de combustível a ser injetado em cada cilindro, havendo ainda a correção pelo sensor de oxigênio (sonda lambda). A partir destes dados o sistema de ignição eletrônica interpola em mapas pré calibrados o avanço a ser aplicado, partindo de um valor básico, corrigido em função dos parâmetros listados anteriormente.

Após a ignição, abre-se a janela de aquisição em determinado instante angular do cilindro. É feita a leitura do sensor de detonação e é calculada a integral deste sinal. Se o valor da integral for maior que o limite pré determinado, é detectada a detonação e para cada condição é retirado um pouco do avanço neste cilindro para evitar que o fenômeno se repita.

No caso do sistema aqui proposto, o sinal do sensor será filtrado e comparado com um nível de tensão pré calibrado. Será contado o número de vezes que o valor do sinal ultrapassa o nível, identificando se houve ou não detonação. Da mesma maneira os outros parâmetros são necessários para que se possa estabelecer quanto de avanço pode ser retirado.

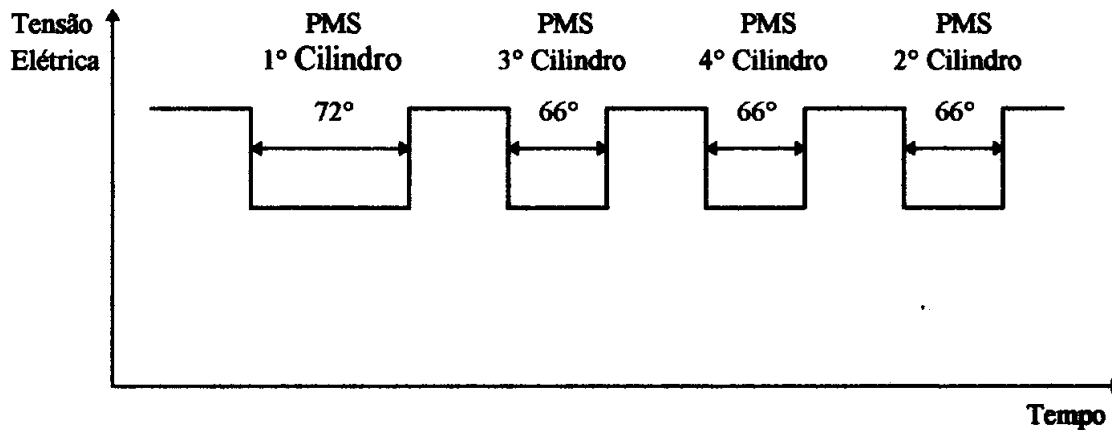


Figura 3. Sinal proveniente do sensor de fase. O sistema de controle do motor identifica o cilindro número 1 por uma janela de maior duração.

## 5 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE DETONAÇÃO POR INTENSIDADE DO SINAL.

O sistema original utiliza-se de um acelerômetro instalado no bloco do motor, o qual fornece o sinal, que é filtrado, sendo a banda de filtragem um parâmetro calibrado para cada tipo de bloco, fabricados por diferentes fundições. O sinal proveniente do acelerômetro é modulado e integrado gerando um valor proporcional à energia deste sinal em um certo tempo de aquisição, para cada cilindro. O sinal do acelerômetro corresponde à vibração do bloco excitado pela explosão, abertura e fechamento das válvulas e atrito entre as partes móveis do motor. A posição do acelerômetro no bloco do motor é portanto pesquisada de forma a transmitir com maior clareza o sinal da detonação. Isto é feito para cada tipo de motor.

O sistema aqui proposto pressupõe a substituição de parte do sistema original, logo após a filtragem do sinal, portanto sem modulação e sem integração. A identificação da detonação passa a ser feita por nível de tensão, determinado por um *trigger*. Este nível de tensão é um dos parâmetros calibráveis deste novo sistema, pois o aumento da rotação do motor aumenta o ruído. Desta forma deve-se aumentar o nível mínimo de tensão de identificação de modo a não confundir ruídos com detonações.

Após o *trigger*, um contador identifica o número de picos de tensão superior ao valor calibrado existentes durante o período de aquisição e compara este com um valor pré-determinado. Se este valor for superior ao valor calibrado, está identificada a detonação. Um sinal de detonação presente no cilindro *i* é retornado ao sistema de controle do motor, cabendo ao sistema de ignição eletrônica atuar de forma a retirar avanço de ignição se esta informação de detonação perdurar por alguns ciclos. No caso do contador ter um valor menor que o parâmetro calibrado, não será identificada a detonação. Justifica-se a colocação de um valor mínimo de picos de tensão superior ao calibrado para evitar que detonações momentâneas ou

problemas de interferência nos cabos gerem informação errônea e consequente queda de rendimento do motor. O contador de número de picos de tensão será zerado a cada nova abertura da janela, quando inicia-se a contagem. Se o valor da contagem for maior que o valor pré determinado, será enviado ao sistema o valor '1', identificador de que houve detonação. Caso contrário será enviado o valor '0'. Esta informação é processada conjuntamente com outros parâmetros, determinando as condições de funcionamento do próximo ciclo.

Para comprovar-se o funcionamento desta proposta, através da aquisição de ciclos detonantes, simulou-se este procedimento com o programa *PvSim*, para *Windows*. Neste, a programação é feita por blocos, cada qual já com uma função definida, permitindo visualizar o efeito em diagramas ou gráficos.

## 6 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO DA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO SINAL

Sendo um programa de simulação por blocos lógicos, não operando com sistemas eletrônicos reais, os sinais tiveram que ser submetidos a atrasos temporais para aproximar o modelo a um circuito eletrônico. O sinal de entrada, proveniente do acelerômetro, foi trocado inicialmente por um sinal senoidal, apenas para avaliar-se o funcionamento do contador. A frequência deste sinal foi adaptada ao tempo de análise da simulação, permitindo verificar, passo a passo, as mudanças de estado de cada componente. Por não tratar-se de um simulador de circuito eletrônico, alguns blocos lógicos tiveram que ser criados de forma a apresentarem o mesmo comportamento que os componentes eletrônicos. Por exemplo o detector de subida de sinal, onde este sinal deve ser avaliado, foi comparado com uma porta lógica *and* onde havia seu próprio sinal defasado e negado, conforme mostrado no esquema da Figura 4.

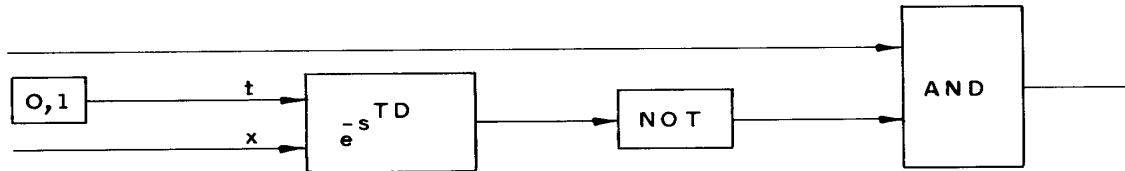


Figura 4. Diagrama do bloco lógico de subida do sinal.

Já o contador é um sistema de malha fechada, com atraso, que soma '1' à quantidade de subidas detectadas durante a abertura da janela de aquisição e este valor é comparado ao parâmetro calibrável, sendo este comparador o *flag* de detonação presente.

O diagrama de blocos lógicos completo da simulação é apresentado na Figura 5. As analogias utilizadas são:

-*Bloco senoidal*: fornece o sinal senoidal que será utilizado para análise. substitui o sinal proveniente do acelerômetro.

-*bloco arquivo dat*: arquivo de aquisição do sensor de detonação filtrado no canal '1', com janela de aquisição no canal '2'.

-*Bloco ">"*: compara o valor do sinal senoidal. É o *trigger*, que devolve ao sistema o valor '1' quando o sinal estiver com nível de tensão superior ao parâmetro calibrável, ou valor '0', quando o sinal estiver com nível de tensão inferior a este parâmetro. A entrada *l* recebe o sinal de entrada e a entrada *r* recebe o parâmetro calibrável.

-*Barra de rolagem*: conectada ao *trigger*, é o parâmetro calibrável de nível de tensão para detecção da detonação. Conectada ao comparador é a contagem do número de subidas do sinal do *trigger* necessários para disparar o *flag* de detonação.

-*Bloco S&H (Sample & Hold)*: funciona como um circuito *flip-flop* que grava o último estado, até haver uma mudança deste. A entrada "b" é o sinal que será devolvido como *buffer* e a entrada "x" é que autoriza a mudança de valor.

-*Bloco  $e^{-sTD}$* : é o *delay* que atrasa as informações. A entrada "x" é o sinal a ser atrasado pelo valor da entrada "t".

A vantagem deste simulador é a sua independência do tipo de sinal de entrada, que pode ser analógico ou digital, mantendo seu funcionamento sempre de acordo com as expectativas. A dificuldade surge na programação orientada por objetos de baixo nível, sendo necessária a construção de novos blocos lógicos ainda não disponíveis.

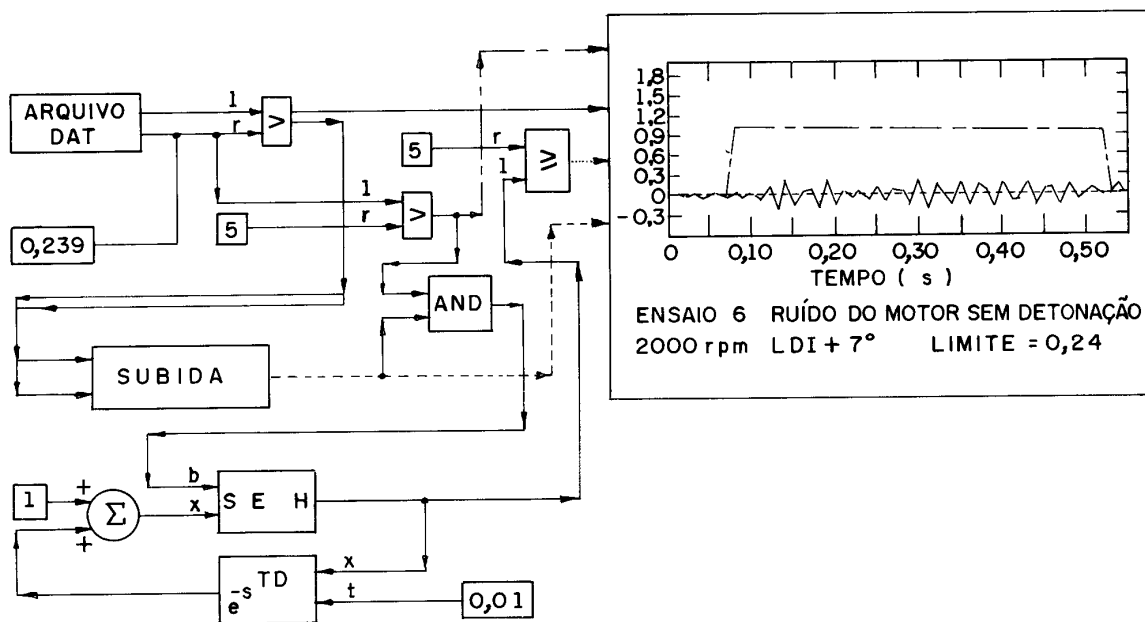


Figura 5. Diagrama de blocos lógicos utilizados para a simulação.

## 7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a aquisição do sinal a ser ensaiado na simulação, foi utilizado um motor 2.0L álcool, instalado em bancada dinamométrica na Laboratório de testes de Motores da Magneti Marelli do Brasil (LTM-MM), que forneceu os arquivos de sinais para sua análise por este novo sistema. Este motor, com curso do pistão longo, propicia grande quantidade de ruído, gerando sinais adequados para verificar a dinâmica da simulação. Sua frequência de detonação levantada previamente, está na faixa de 7,6 a 8,0 kHz e a posição do sensor de detonação, com faixa linear de operação entre 5 e 12 kHz, é a posição normal de produção, localizada entre o cilindro 2 e o 3, como mostrado na Figura 6.

Para a aquisição dos dados do sensor de detonação e da janela de aquisição, foi utilizado o programa *Global Lab*, com vários recursos que permitem a pré calibração dos instrumentos utilizados com grande facilidade. Logo após a aquisição, os dados foram convertidos para código ASCII, de forma a ser possível sua utilização no simulador.

Como a frequência de detonação está na faixa citada, o sinal proveniente do sensor foi filtrado com filtro passa-banda entre 7,9 e 8,0 kHz. O sinal da janela de aquisição foi retirado do sistema de controle do motor instalado na bancada, tendo-se a precaução de instalar-se

outro sensor de detonação em local diferente do normal de produção, para controlar o motor, evitando que o sistema altere as condições de operação.

A Janela de aquisição foi posicionada para abrir no PMS e fechar 30° após, em cada cilindro, fazendo a aquisição do sinal e marcando o PMS. A duração de 30° se mostrou suficiente para ler a detonação em seu instante de maior energia, sendo que depois é praticamente encoberto pelo ruído do motor. Nestas aquisições não houve a preocupação de se identificar o cilindro, pois o sistema de simulação não atuará sobre o motor.

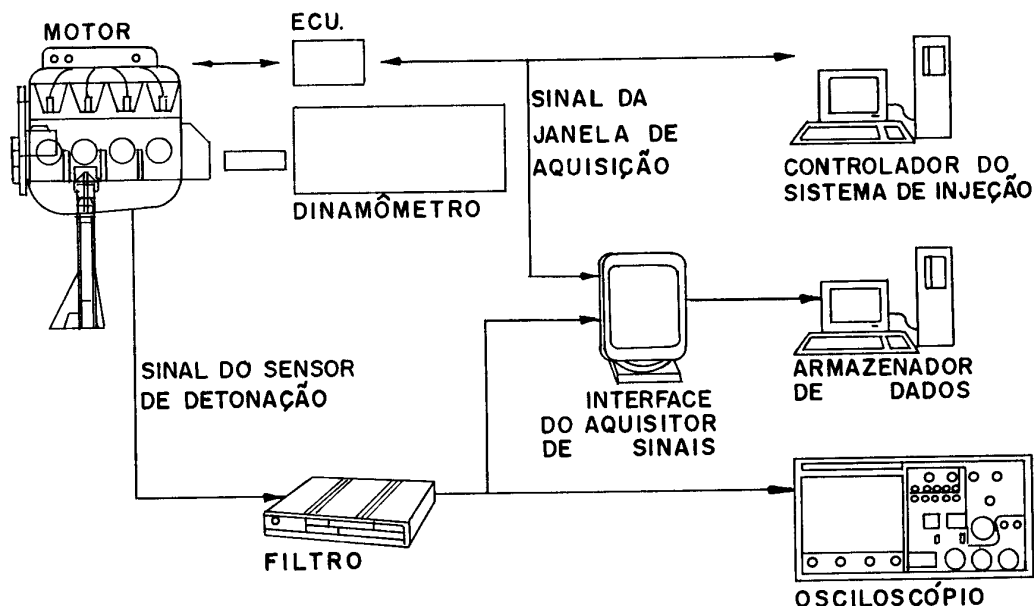


Figura 6. Esquema de montagem dos equipamentos utilizados para aquisição dos sinais.

Tabela 1: Condições de operação e a calibração dos instrumentos

Condição	teste 1	teste 2
Rotação, rpm	2000	2000
Pressão no coletor, mbar	942	942
Avanço aplicado, graus	17,5	25,5
Frequência aquisição, kHz	18	18
ganho do filtro, dB	10	10
Detonação	ausente	presente

O motor foi condicionado a 90°C de temperatura da água de resfriamento e o ar do coletor a 40°C. Os testes foram realizados a 2000 rpm WOT (plena carga), avaliando-se condições de médio nível de ruído. A plena carga, por propiciar maior enchimento da câmara de combustão, facilita o surgimento de detonação. Para esta condição de operação, foram coletados dados com e sem detonação. Os primeiros para calibrar o sistema simulador proposto e os segundos para avaliar seu desempenho. Para cada aquisição, foi acertado o ganho de entrada do filtro, permitindo a leitura dos dados com maior nitidez e amplificando eventuais ruídos nos cabos, facilitando sua identificação. Na Figura 6 mostra-se um esquema do sistema de aquisição de sinais. Na tabela 1 tem-se as condições de operação e a calibração dos instrumentos.



Para as aquisições com detonação (teste 2), foi utilizado 7° de avanço acima do LDI, para termos detonação intensa e frequente, disponibilizando maior quantidade de ciclos detonantes para posterior avaliação. Na calibração do sistema foi estabelecido um limite para o teste (teste 1), de forma a verificar se o sistema sem detonação não faz interpretações erradas. A aquisição, feita em tempo contínuo, foi recortada e cada ciclo analisado separadamente, pois na simulação o contador desenvolvido não podia ser zerado.

## 8 RESULTADOS ENCONTRADOS

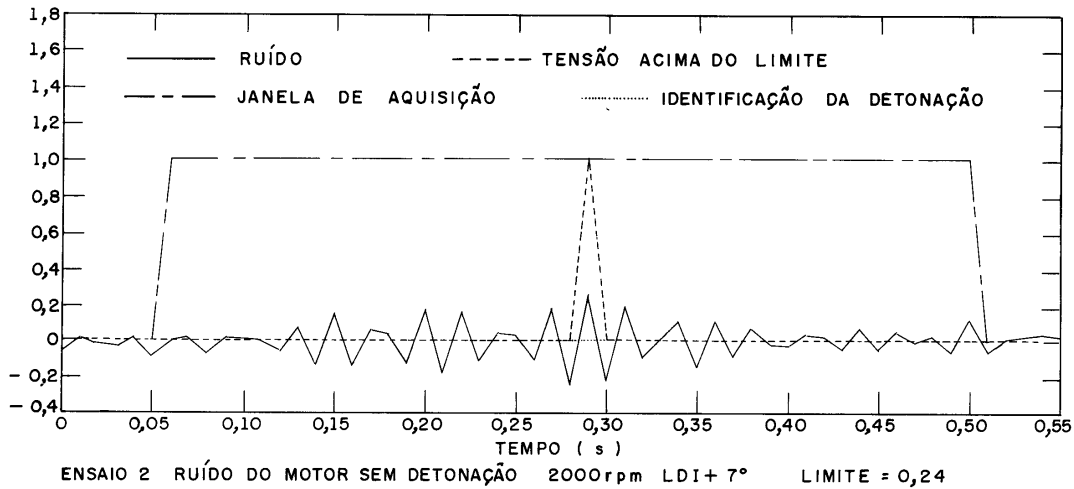


Figura 7. Ruído do motor em ensaio não detonante.

Os resultados dos dados coletados e processados no simulador podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. Nestas figuras a linha com forma de serra é o sinal filtrado do sensor de detonação e a outra linha representa a janela de aquisição. As linhas em forma de picos representam os picos de tensão que excedem o limite de tensão estabelecido e, caso seja em número maior que o valor mínimo, dispara a *flag* de detonação.

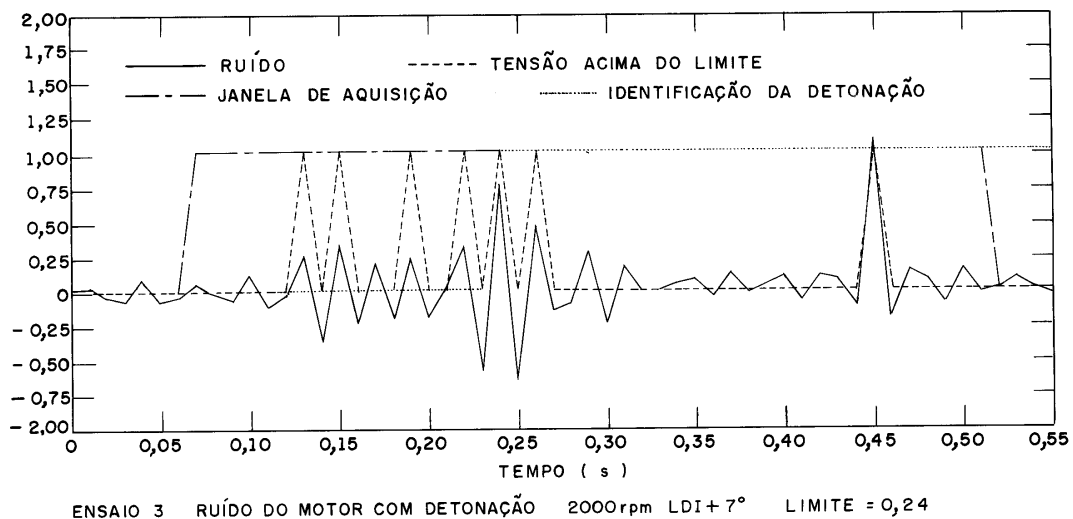


Figura 8. Ruído do motor em ensaio detonante.

Para as aquisições dos ciclos sem detonação, o limite de tensão verificado foi de 0,34 V, sendo que nestas aquisições, o limite de cinco picos com tensão superior a este se mostrou

satisfatório. Nota-se o ruído de válvulas como um aumento do sinal no centro da janela de aquisição (entre 0,2 e 0,3 segundos). Esta é a parte da análise mais crítica, pois coincide com a posição temporal da detonação (perceptível entre 5 e 45° depois do PMS). Entretanto devido a ser sua frequência característica diferente daquela da detonação, podemos diferenciá-los. Por este motivo selecionamos o número de picos em 5 e o valor de tensão mínima em 0,25 V, de forma a que o ruído das válvulas, embora nítidos não sejam emitidos durante tempo suficiente para serem identificados como detonação. A frequência de aquisição de 18 kHz mostrou-se adequada, sem apresentar falta de resolução.

## 9 CONCLUSÕES

Pela análise dos resultados verifica-se que este tipo de sistema de detecção de detonação pode ser aplicado em substituição aos sistemas atuais, porém carecendo de maiores estudos, tanto simulando-o para outras condições de operação do motor, como em outros motores, de forma a evitar as particularidades de cada um. Este sistema é versátil, pois pode-se aplicar a qualquer motor, somente mudando-se o limite de tensão de ruído de fundo.

Este método de identificação teria melhores resultados para um sensoramento de detonação que reduzisse a amplitude do ruído de fundo do motor, por exemplo, sensoramento de detonação com o sensor na água de arrefecimento do motor.

Para uma avaliação conclusiva seria necessário construir um circuito eletrônico para efetuar os testes em campo, ou seja, controlando um motor real.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem a todos os integrantes do setor de P&D da Magneti Marelli pelo todo empenho e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Bosch, R. Gmbh. Automotive Handbook - 3<sup>rd</sup> Ed. SAE International Pub., 1993.  
Stone, R. Introduction to Internal Combustion Engines - 2<sup>nd</sup> Ed. SAE International Pub., 1992.  
Schmillen, K. P., Amengual, A. C., Larruy, A. C. Motores de Combustion Interna, Fundamentos, 2<sup>nd</sup> Ed., Universidad Politécnica de Cataluña, 1993.  
Jóvaj, M. S. Motores de Automovil, 1<sup>a</sup> Ed., Editora Mir, Moscou, 1982.

## **SIMULATION OF A DETONATION DETECTOR, BASED ON THE INTENSITY OF THE SIGN PRINCIPLE, FOR CONTROL OF SPARK-IGNITION ENGINES.**

**Abstract:** *This work presents results from the development of an alternative system for detecting detonation on spark-ignited engines. This new detector uses components from the common system and is based on the intensity-of-sign principle, rather than on the integral principle. Because of the electric sign, the simplest way to detect the detonation is by a trigger, which is activated only when the acquisition windows is open. The results show that this detonation detection system can be used replacing the present ones. The system still needs more research, both for other operating conditions of the engine and for other engines, to avoid the singularities of each one. This system is particularly versatile, for it can be applied to any engine, by only changing the limit of tension on the signal noise.*

**Key-words:** *detonation detector, spark-engine, control.*