

# **AValiação DOS PROCESSOS DINâmICOS NOS COLETORES DE ESCAPAMENTO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

**João Nildo de Souza Vianna**

**Alessandro B. S. Oliveira**

**Lucio H. H. Oliveira**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica,  
CEP : 70910-900, Brasília, DF, E-mail : vianna@enm.unb.br

## **RESUMO**

Neste trabalho é realizada uma análise comparativa entre resultados experimentais e simulados numericamente de pressão dinâmica e velocidade dos gases nos coletores de escapamento, para um motor do ciclo Otto operando em ampla faixa de rotações. Para a aquisição de dados experimentais, fez-se uso de um coletor de descarga especial a fim de se eliminar a interferência do processo de descarga dos outros cilindros. Quanto ao método numérico aplicado aos coletores, empregou-se o modelo da ação das ondas, seguindo uma abordagem homoentrópica dos processos e que permite a avaliação espaço-temporal das propriedades dos gases no interior dos coletores.

**Palavras-chaves** : Motores de combustão interna, Simulação de coletores, Ondas de pressão.

## **1. INTRODUÇÃO**

As ondas de pressão geradas quando se abre a válvula de descarga dos motores, se propagam no coletor de escapamento com a velocidade local do som. Ao alcançarem a extremidade do duto de escapamento “entendem” a atmosfera como uma parede isobárica e se refletem, retornando em direção à válvula como uma onda de expansão. Dependendo do comprimento do duto esta onda de expansão pode encontrar a válvula aberta e interferir no processo de descarga e talvez no de admissão se coincidir com o momento de cruzamento das válvulas. Naturalmente estes efeitos dependem da geometria dos coletores de descarga e tem um papel importante no desempenho dos motores de combustão interna.

Na simulação global de motores de combustão interna os modelos que considerem a variação espaço-temporal das propriedades no interior dos coletores são fundamentais para o estudo e compreensão dos complexos processos dinâmicos associados às fases de admissão e de descarga. A formulação proposta por Winterbone (apud Benson, 1986) para modelagem do escoamento em coletores de admissão e descarga utilizando os modelos de ação das ondas permitiu que os programas simuladores apresentassem resultados de desempenho bem mais realistas que os que, até então, utilizavam os métodos quase-permanente e de enchimento-esvaziamento. A partir daí vários autores têm aperfeiçoado o método e o adaptado às suas necessidades específicas. Oliveira (1995) mostrou que a introdução dos modelos que consideram o efeito das ondas nos coletores representam um importante passo quando se pretende otimizar o desempenho de programas simuladores, além de contribuírem para estudos de compatibilização de turbocompressores pulsantes. Vianna et al. (1996) e

Bertoluzzi et al (1998) também apontam que a modelagem dos coletores de admissão e descarga pelo método da ação das ondas aporta uma significativa melhoria no desempenho de programas simuladores no que diz respeito à predição dos parâmetros de desempenho global do motor, incluindo inclusive a avaliação de emissões de poluentes, como apresentados por Onorati et al (1998) e por Oliveira et al. (1996).

Muito embora a simples introdução do modelo teórico de ação das ondas melhore consideravelmente a aderência dos resultados globais simulados aos resultados experimentais, quando o objetivo é avaliar a interação das ondas de compressão e expansão com a geometria dos coletores o ajuste preciso dos parâmetros experimentais do modelo torna-se indispensável. Neste caso, as vantagens do modelo de ação das ondas são de certa forma limitadas pelas dificuldades de seu ajuste experimental decorrente da alta frequência e temperatura com que os eventos ocorrem.

Este trabalho tem por objetivo colaborar para a compreensão dos processos dinâmicos que ocorrem nos coletores de descarga explicitando as limitações metrológicas da instrumentação e dando continuidade ao estudo numérico-experimental dos fenômenos associados à propagação de ondas de pressão nos coletores, desenvolvidos anteriormente. Isto é realizado através de um estudo comparativo entre resultados experimentais e simulados de pressão dinâmica e velocidade dos gases de exaustão no interior de um coletor de um motor ciclo Otto. Os resultados experimentais foram obtidos utilizando-se um sistema de anemometria de fio quente e um sensor de pressão piezométrico. Com respeito à simulação numérica, o método das características, seguindo uma abordagem homoentrópica, foi empregado para a caracterização dos processos dinâmicos no interior dos coletores.

## 2.0 MODELO TEÓRICO APLICADO AO CILINDRO

A modelagem dos processos interiores ao cilindro consistiu em se aplicar as equações clássicas de conservação de massa e energia e dos gases perfeitos, bem como outras provenientes do mecanismo biela-manivela e transferência de calor para determinar as condições instantâneas de pressão, temperatura, massa e volume, ao longo de um ciclo termodinâmico completo (Oliveira, 1995). Para os processos sem queima de combustível, a variação da energia interna dos gases no interior do cilindro é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} + h_e \left( \frac{dm}{dt} \right)_e + h_a \left( \frac{dm}{dt} \right)_a \quad (1)$$

onde os subíndices  $a$  e  $e$  correspondem às válvulas de admissão e escape.

Para o processo de combustão empregou-se um modelo onde a pressão final a cada instante é resultante da superposição de três efeitos simultâneos: variação do volume devido ao movimento do pistão, liberação de energia proveniente da queima de combustível e transferência de calor dos gases às paredes do motor (Campbell, 1979). Este modelo se baseia na integração temporal das equações diferenciais ordinárias de conservação de massa e energia, sendo esta última obtida a partir da Eq. (1), acrescentada do fluxo de calor liberado na queima do combustível. Oliveira (1994) mostra que esta forma de modelagem retrata satisfatoriamente os processos interiores ao cilindro.

## 3. A MODELAGEM DOS COLETORES

Para a modelagem dos coletores empregou-se a formulação homoentrópica proposta por Benson (1986) para o escoamento no interior dos coletores, fazendo-se uso do método das características como ferramenta numérica para solução das equações que descrevem este

escoamento e para cálculo das propriedades termodinâmicas do fluido. Este modelo considera um duto simples, sem interferência dos cilindros adjacentes. As equações que governam o escoamento homentrópico não-permanente são :

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

- Equação da conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

- Equação de conservação de energia

$$\left( \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} \right) - a^2 \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = 0 \quad (4)$$

A velocidade do som  $a$  é expressa em termos das propriedades termodinâmicas  $P$ ,  $\rho$ ,  $T$  e entropia  $S$  segundo a expressão:

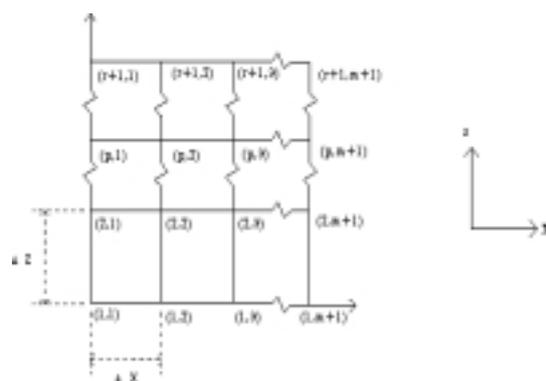
$$a^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s=cte} = \frac{dP}{d\rho} = \frac{kP}{\rho} = kRT \quad (5)$$

A equação da continuidade pode ser expressa em termos das velocidades  $a$  e  $u$  (Benson, 1986):

$$\frac{\partial a}{\partial t} + u \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{k-1}{2} a \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

E a equação da quantidade de movimento em termos de  $a$  e  $u$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{2}{k-1} a \frac{\partial a}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (7)$$



**Figura 1** - Malha espaço-temporal de cálculo para os dutos.

Obtém-se portanto um sistema com duas equações, Eq. (6) e Eq. (7), e duas variáveis,  $a$  e  $u$ . As equações 6 e 7 formam um conjunto de equações diferenciais parciais hiperbólicas quase-lineares. Exceto em alguns casos particulares, não há solução analítica e uma solução numérica deve ser empregada. Para obter-se esta solução, o método das características é utilizado.

Para se solucionar as equações características, utiliza-se o método de solução proposto por Benson (1986), onde os dutos de admissão e exaustão são discretizados sob a forma de uma malha espaço-temporal e os extremos dos dutos correspondem aos nós extremos da malha. Nesta malha, o incremento espacial  $X$  é fixo e o incremento temporal  $Z$  varia de acordo com o critério de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewis.

A figura 1 apresenta a malha de cálculo na qual pode-se observar  $m+1$  nós na direção  $X$  e  $r+1$  nós na direção  $Z$ .

Os cálculos são efetuados da seguinte forma: dadas as características iniciais  $\lambda_I$  e  $\lambda_{II}$  em todos os nós  $(1,s)$  calcula-se, para cada incremento de tempo  $Z$  - obtido segundo o critério de estabilidade já mencionado - as características  $\lambda_I$  e  $\lambda_{II}$  dos nós  $(p,s)$  a partir das condições conhecidas no instante anterior e das condições de contorno em  $(p,1)$  e  $(p,m+1)$ , sendo este cálculo realizado por interpolação linear.

Calcula-se então as condições termodinâmicas de cada nó  $(r+1,s)$  utilizando-se as expressões abaixo:

$$A = \frac{\lambda_I + \lambda_{II}}{2} \quad (8)$$

$$= \frac{\lambda_I - \lambda_{II}}{k-1} \quad (9)$$

$$P = \left( \frac{\lambda_I + \lambda_{II}}{2} \right)^{\frac{2k}{k-1}} \cdot P_{ref} \quad (10)$$

$$T = \left( \frac{\lambda_I + \lambda_{II}}{2} \right)^2 \cdot T_{ref} \quad (11)$$

Nestas equações, a velocidade do som local  $A$  e a velocidade do escoamento  $U$  correspondem às variáveis  $a$  e  $u$  adimensionalizadas.

#### 4. O PROGRAMA SIMULADOR

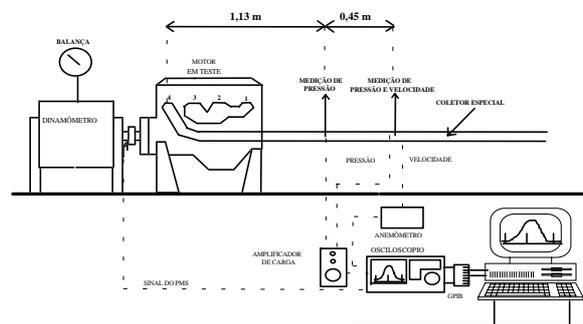
O programa simulador Otto versão 3.0 que resolve o sistema foi desenvolvido na linguagem Pascal. Suas principais características são a pouca dependência de dados experimentais e a sensibilidade a parâmetros geométricos e operacionais do motor em estudo. Com respeito a parâmetros de desempenho global, o programa fornece resultados de: consumo específico de combustível, potências efetiva, indicada e de atrito, rendimentos volumétrico e térmico, torque e pressão média efetiva. Também são calculadas as distribuições espaço-temporais de pressão dinâmica, temperatura e velocidade dos gases nos coletores. Para o caso do modelo de emissões que leva em conta a formação de 12 espécies, são apresentadas as concentrações em volume para  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $H$ ,  $NO$ ,  $OH$ ,  $O$ ,  $N$  e  $N_2O$ .

#### 5. METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

Para a avaliação dos modelos numéricos e para uma melhor compreensão dos processos associados à fase aberta do ciclo, realizou-se ensaios em bancada dinamométrica com um motor ciclo Otto de 4 cilindros, com  $1000 \text{ cm}^3$ , a gasolina. Os ensaios foram realizados com um coletor de descarga especial, com seção transversal constante, comprimento de 2,56m e

alimentado unicamente pelo quarto cilindro, a fim de se eliminar a interferência das ondas de pressão geradas pelos demais cilindros; manteve-se o coletor de admissão original, com comprimento igual a 0,12m e diâmetro de 0,027m. Para a medição de pressão utilizou-se um transdutor piezoelétrico Kistler com frequência natural de 150kHz e para a medida de velocidade um sistema de anemometria Disa equipado com uma sonda de fio quente de 9 $\mu$ m. Três metodologias de ensaio foram empregadas: a primeira teve por objetivo fornecer subsídios para a validação dos resultados numéricos; para tal realizou-se a medição de pressão dinâmica com o motor operando à plena carga e com o sensor de pressão piezoelétrico instalado no coletor especial a uma distância de 1,13m da válvula de escape. A segunda metodologia permitiu a investigação da influência do comprimento do coletor especial sobre o comportamento das ondas que se propagam em seu interior; isto compreendeu a variação do comprimento do coletor para 3,36m durante a execução dos ensaios. Por último, desejando-se avaliar de maneira preliminar a interação entre as propriedades dos gases de escape, realizou-se medições simultâneas de pressão dinâmica e velocidade, com a sonda de fio quente instalada no coletor a 1,58m da válvula de escape; estas medições foram realizadas inibindo-se a combustão no quarto cilindro tendo em vista as limitações de temperatura imposta à operação da sonda do anemômetro de fio quente.

A figura 2 apresenta esquematicamente a instrumentação empregada para a aquisição dos sinais de pressão dinâmica, velocidade e PMS no coletor especial. O registro do PMS foi realizado por meio de um diodo de foto-acoplamento, instalado na extremidade do eixo cardan do motor. Este dispositivo consiste em um disco furado fixado ao eixo cardan e que gira entre um emissor e um receptor óptico, permitindo o foto-acoplamento do seu furo quando tem-se ponto morto superior - PMS.



**Figura 2** - Aparato para aquisição dos sinais de pressão dinâmica, velocidade e PMS

Os transdutores piezoelétricos de pressão foram instalados no coletor através de adaptadores refrigerados a ar. A função de transferência do conjunto transdutor-adaptador foi levantada no Tubo de Choque e verificou-se que a linha pneumática do adaptador não interferia no ganho nem na fase do sistema, na faixa de frequência do escoamento em estudo. Os sinais provenientes do transdutor piezoelétrico e da sonda do anemômetro de fio quente foram então adquiridos por um sistema de aquisição e tratamento de dados, composto de um osciloscópio digital e microcomputador. A propagação de erro no sistema conduz a uma incerteza de medição padronizada de 2,4% para as medições de pressão.

## 6. RESULTADOS

A figura 3 apresenta resultados numéricos de pressão e velocidade em função da posição ao longo do coletor de exaustão e do ângulo do girabrequim. Os resultados simulados de

pressão e velocidade nos coletores são altamente desejáveis não só pela compreensão do processo físico mas também representam um grande auxílio à instrumentação, pois fornecem uma indicação para a melhor localização dos sensores. A simulação foi realizada para uma rotação de 2000 rpm e comprimento do coletor de escape igual a 2,56m, empregando-se uma discretização com uma resolução espacial de um nó a cada 10 mm para os coletores de admissão e escape. Adotou-se o PMS como referência do ângulo zero do girabrequim, sendo os ângulos de abertura e fechamento das válvulas:

- Válvula de escape

Abertura: 142 graus do girabrequim

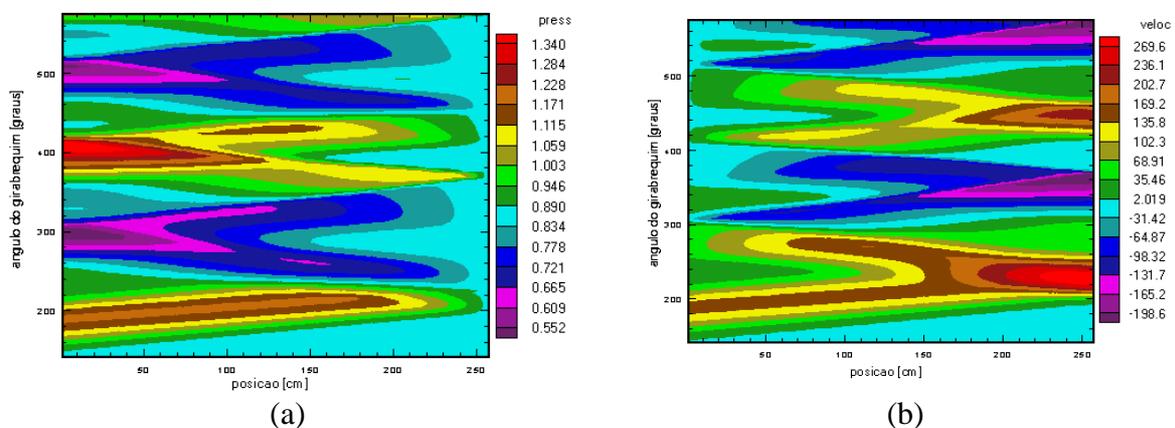
Fechamento: 366 graus do girabrequim

- Válvula de admissão

Abertura: 352 graus do girabrequim

Fechamento: 576 graus do girabrequim

Pode-se observar na figura 3 que o ângulo do girabrequim varia na faixa de 142 graus, abertura da válvula de descarga, até 576 graus, quando se dá o fechamento da válvula de admissão. Analisando-se a figura 3(a) pode-se observar que a abertura da válvula de escape propicia a propagação de uma onda de pressão ao longo do coletor de exaustão. Junto à válvula de escape, esta onda possui amplitude igual a 1,2 bar. À medida que a onda se propaga no coletor, sua amplitude decresce continuamente, o que é fisicamente consistente pois deve-se ter pressão ambiente na extremidade do duto que está aberta para a atmosfera. Esta onda se reflete na extremidade do coletor, cuja pressão é atmosférica, e se propaga em direção à válvula de escape - que ainda se encontra aberta - como uma onda de expansão. Esta onda se reflete novamente e retoma a direção do final do coletor, como uma onda de pressão, a partir de 400 graus do virabrequim. A partir deste momento, uma vez que não há mais fluxo de massa através da válvula, tem-se apenas ondas residuais se propagando no interior do coletor.



**Figura 3** - Diagramas espaço-temporais do escoamento no interior do coletor de exaustão, para 2000 rpm e a plena carga: (a) pressão [bar] e (b) velocidade [m/s]

Analisando-se a figura 3(b) pode-se observar que simultaneamente à diminuição da amplitude da onda de pressão que se propaga após a abertura da válvula de escape, tem-se um aumento da velocidade do escoamento dos gases no interior do coletor, chegando a um valor máximo de 270 m/s na extremidade do duto aberta para a atmosfera, num intervalo compreendido entre 220 e 240 graus do girabrequim.

Os resultados numéricos apresentados na figura 3 além de permitirem uma melhor compreensão dos fenômenos físicos associados à propagação de ondas de pressão nos coletores também indicaram pontos estratégicos para a localização dos sensores; optou-se pela instalação do sensor de pressão piezelétrico a 1,13 m da válvula de escape nos ensaios com combustão no quarto cilindro e pela instalação simultânea dos sensores de pressão e da sonda

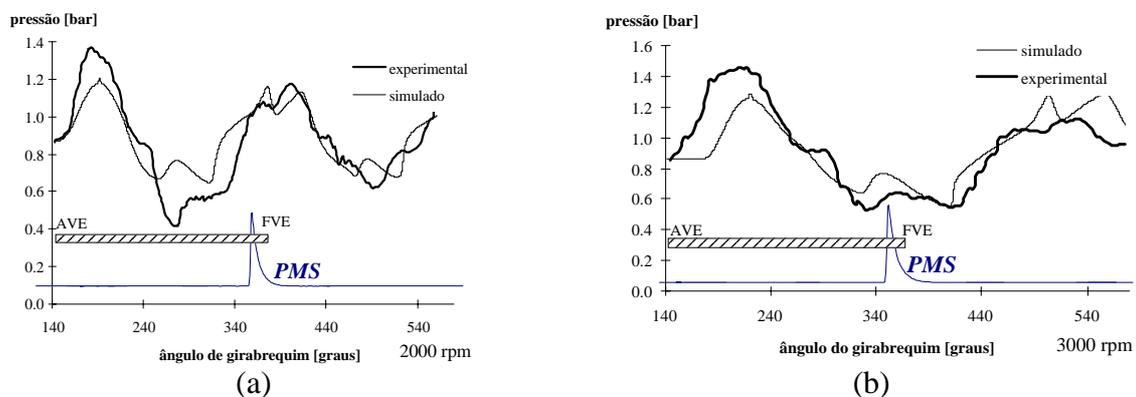
do anemômetro de fio quente a 1,58 m daquela válvula nos ensaios sem combustão no quarto cilindro.

As figuras 4(a) e (b) apresentam as curvas de pressão simuladas e experimentais em função do ângulo do girabrequim para rotações de 2000 e 3000, respectivamente. As condições de operação do motor são apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1:** Condições de operação do motor

Rotação [rpm]	2000	3000
Razão de equivalência	0,797	0,846
Relação ar-combustível	10,829	11,492
Avanço [graus girabrequim]	46	50
Pressão de entrada no coletor de admissão [bar]	0,872	0,863
Temperatura de entrada no coletor de admissão [ oC ]	9	8

Com respeito à amplitude das ondas, de pressão e expansão, os valores simulados apresentaram-se abaixo dos obtidos experimentalmente. Mais especificamente, a diferença entre os resultados experimental e simulado para a amplitude da onda de pressão gerada logo após a abertura da válvula de escape é de cerca de 0,2 bar, para as duas rotações avaliadas. Isto representa uma diferença de 14% entre os resultados experimental e simulado. Segundo Benson (1986), a pequena flutuação observada na curva de pressão simulada, a aproximadamente 180 graus do virabrequim, pode ser atribuída a instabilidades nas condições de contorno do método numérico. Isto porque, numericamente, verifica-se neste ponto a transição do regime sônico para subsônico da onda de pressão.



**Figura 4** - Curvas de pressão por ângulo simuladas e experimentais relativas ao quarto cilindro: (a) 2000 rpm e (b) 3000 rpm.

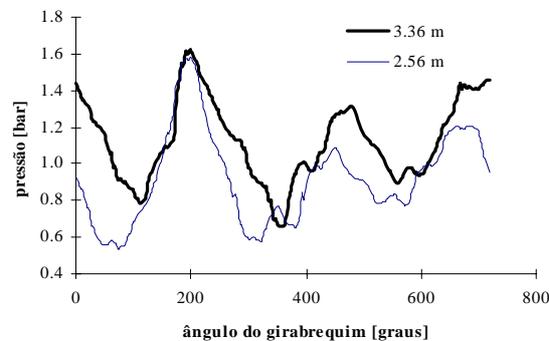
Para se avaliar a influência do comprimento do coletor de exaustão sobre o comportamento das ondas de pressão que se propagam em seu interior, foram realizados ensaios em bancada dinamométrica variando-se o comprimento do coletor de exaustão especial, mantendo-se a rotação do motor em 2500 rpm. Dois comprimentos foram avaliados: 2,56m e 3,36m. As condições de ensaio do motor são apresentadas na tabela 2.

Analisando-se a figura 5, pode-se observar que a onda de pressão que se propaga no coletor após a abertura da válvula de escape atinge o sensor de pressão em um ângulo de 200 graus do virabrequim, para os dois comprimentos. Comparando-se a onda de expansão que se forma após a reflexão da onda de pressão na extremidade do duto, percebe-se que há um atraso da ordem de 50 graus no caso do coletor de 3,36m. Uma vez que neste coletor as ondas devem percorrer uma distância adicional de 1,6m quando comparado ao coletor de 2,56m,

conclui-se que a velocidade de propagação da onda para a rotação de 2500 rpm é da ordem de 480 m/s, o que está de acordo com os resultados apresentados por Vianna et al. (1996), o qual obteve uma velocidade da ordem de 500 m/s para um motor semelhante ao empregado neste trabalho e para rotações de 2000 e 3000 rpm.

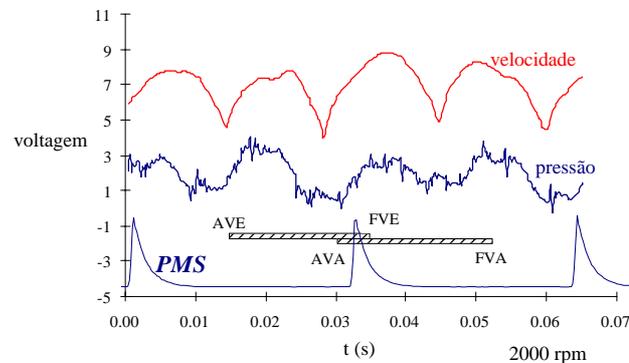
**Tabela 2:** Condições de operação do motor

Rotação [rpm]	2500	2500
Razão de equivalência	0,803	0,827
Relação ar-combustível	10,904	11,227
Avanço [graus girabrequim]	48	48
Pressão de entrada no coletor de admissão [bar]	0,863	0,859
Temperatura de entrada no coletor de admissão [ oC ]	7	9
Comprimento do coletor de exaustão[m]	2,56	4,16
Número de nós do coletor de exaustão	257	208



**Figura 5** - Sinais de pressão para dois diferentes comprimentos: 2,56m e 3,36m.

A figura 6 apresenta qualitativamente as curvas experimentais de pressão e velocidade obtidas a 2000 rpm, a 1,58m da válvula de escape e sem combustão no cilindro. Observa-se que após a abertura da válvula de escape - AVE - uma onda de pressão se propaga no coletor e traz consigo um escoamento induzido, sendo registada tanto pelo sensor de pressão quanto pelo anemômetro de fio quente através de uma elevação de voltagem. A partir daí o anemômetro de fio quente registra as demais ondas de pressão que se propagam no interior do coletor.



**Figura 6** - Sinais de pressão e velocidade para o motor a 2000 rpm

## 7. CONCLUSÕES

Este trabalho contribui para compreensão dos processos dinâmicos relacionados ao escoamento no interior de coletores de motores ciclo Otto e que estão relacionados com o desempenho global e com os níveis de emissões de motores de combustão interna.

Com respeito à simulação numérica, o programa Otto versão 3.0 mostrou-se capaz de descrever os processos dinâmico no interior do coletor, com uma boa aderência aos resultados experimentais. O modelo proposto, quando incorporado ao programa Otto, descreve as variações de pressão dinâmica e velocidade nos coletores, havendo uma boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos pela simulação numérica.

Pode-se concluir também que esta ferramenta numérica pode auxiliar não só a compreensão dos fenômenos físicos associados à fase aberta do ciclo mas também na estratégia dos ensaios e na definição das características da instrumentação a ser empregada na fase experimental da pesquisa. O transdutor de pressão e fio quente têm características de frequência e sensibilidade par o tipo de medição proposto, sendo que este último ainda tem problemas para correção da curva de calibração e avaliação das incertezas de medição, quando realiza medições a altas temperaturas.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BENSON, R. S. , “The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines”, Volume I, Clarendon Press, Oxford, 1986.

CAMPBELL, A.S., “Thermodynamic Analysis of Combustion Engines”, John Wiley & Sons, 1979.

OLIVEIRA, G.L. , “Simulação de Motores do Ciclo Otto com Modelo de Combustão Progressiva”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 1994.

OLIVEIRA, G.L. , “Simulação de Motores de Ignição por Centelha - Análise Teórica e Experimental dos Processos Termodinâmicos”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 1995.

VIANNA, J.N.S., OLIVEIRA, G.L., OLIVEIRA, L.H.H., “Modelagem dos Coletores de Admissão e Descarga pelo Método da Ação das Ondas e sua Influência sobre a Precisão dos Resultados do Programa Simulador de Motores de Combustão Interna”, Anais do VI ENCIT, pp.1051-1056, Florianópolis-SC, 1996.

OLIVEIRA, L.H.H., VIANNA, J.N.S. - Validação Experimental dos Níveis de Emissões Calculados por um Programa de Simulação de Motores de Combustão Interna - IX SIMEA - Simpósio de Engenharia Automotiva - S. Paulo, 1997.

BORTOLUZI, D., COSSALTER, V., DORIA, A. - The effect of Tunable Resonator on Volumetric Efficiency of a Engine – Transaction SAE 1998- Section 3, pp 2363-2372.

ONORATI, A., FERRARI, G. – Modeling of 1-D Unsteady Flows in I.C. Engine Pipe Systems: Numerical Methods and Transport Chemical Species - Transaction SAE 1998- Section 3, pp 1101-1114.