

# Motores de Combustão Interna

## Simulação



### □ Programa CARE (Cycle Analysis of Reciprocating Engine)

- Para a estimar o fluxo de calor através das paredes do cilindro, pistão e câmara de combustão é necessário um programa de simulação do motor para fornecer as condições dentro do cilindro que são determinantes da intensidade deste fluxo
- O programa CARE usa o modelo de tubos curtos e velocidade do gás integrada pela equação da conservação da quantidade de movimento

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

---

### □ Objetivos do programa

- Propor um ou mais modelos de motor de combustão interna para previsão de desempenho (torque, potência e consumo versus rotação e carga)
- Desenvolver um código computacional usando análise orientada a objetos (OOA)
- Dotar os Laboratórios de Motores do CEFET-MG, UFMG, CETEC-MG e PUC-MG de uma ferramenta de simulação associada aos equipamentos de ensaios

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

---

### □ Aplicações

- Projeto de novos motores
- Adaptação de motores às condições regionais (altitude, temperatura, umidade e combustível)
- Adaptação de motores para combustíveis alternativos (GNV, álcool, novas misturas álcool/gasolina)
- Casamento motor/turbocompressor ou sobrecarregador
- Conversão de motores automotivos para uso aeronáutico
- Instrumento didático em cursos de motores



# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Vantagens da OOA

- Relação direta com objetos físicos
- Modularidade dos objetos
- Encapsulamento de dados (atributos) e funções (operações ou métodos)
- Propriedades de herança e polimorfismo (modelo evolutivo)
- Padronização (linguagem UML)
- Compatibilidade com os sistemas operacionais modernos (Windows e Linux)



# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Modelo quase-dimensional de duas zonas

- Variáveis dependentes:

$$\mathbf{Y}^t = \begin{bmatrix} \rho_{ub} & V_{ub} & T_{ub} & P_{ub} \dots \\ \dots \rho_b & V_b & T_b & P_b & X_b & \omega & \theta & C_{iub} \dots & C_{ib} \dots \end{bmatrix}$$

onde, ub = gás não queimado

b = gás queimado

i = 1 .. n = No. espécies químicas consideradas

(11+2\*n) variáveis a serem integradas (p/ n = 9, 29 variáveis)

- Variável independente:

Tempo (t) ou Ângulo do Virabrequim ( $\theta$ )

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Modelo quase-dimensional de duas zonas - Equações

Conservação da massa

$$\frac{d\rho_{ub}}{dt} = \frac{1}{\mathcal{V}_{ub}} \left[ (\dot{m}_{ad} + \dot{m}_{ex} + \dot{m}_{bb})_{ub} + \dot{m}_{inj} - \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} - \rho_{ub} \frac{d\mathcal{V}_{ub}}{dt} \right]$$

$$\frac{d\rho_b}{dt} = \frac{1}{\mathcal{V}_b} \left[ (\dot{m}_{ad} + \dot{m}_{ex} + \dot{m}_{bb})_b + \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} - \rho_b \frac{d\mathcal{V}_b}{dt} \right]$$

Conservação das  
espécies químicas  
(2\*n equações)

$$\frac{dC_{iub}}{dt} = \frac{1}{\rho_{ub} \mathcal{V}_{ub}} \left[ (\dot{m}_{ad} C_{iad} + \dot{m}_{ex} C_{iex} + \dot{m}_{bb} C_{ibb})_{ub} + \dot{m}_{inj} C_{iinj} - \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} C_{iub} \right] + \frac{dC_{iub}}{dt} \Big|_{\text{reação}} \left[ - \frac{C_{iub}}{\rho_{ub}} \frac{d\rho_{ub}}{dt} - \frac{C_{iub}}{\mathcal{V}_{ub}} \frac{d\mathcal{V}_{ub}}{dt} \right]$$

$$\frac{dC_{ib}}{dt} = \frac{1}{\rho_b \mathcal{V}_b} \left[ (\dot{m}_{ad} C_{iad} + \dot{m}_{ex} C_{iex} + \dot{m}_{bb} C_{ibb})_b + \dot{m}_{inj} C_{iinj} + \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} C_{ib} \right] + \frac{dC_{ib}}{dt} \Big|_{\text{reação}} \left[ \frac{C_{ib}}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} - \frac{C_{ib}}{\mathcal{V}_b} \frac{d\mathcal{V}_b}{dt} \right]$$

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Modelo quase-dimENSIONAL de duas zonas - Equações

Conservação da  
quantidade  
de movimento  
(1D)

$$\frac{dV_{ub}}{dt} = \frac{1}{\rho_{ub} V_{ub}} \left[ -\frac{A_{pub}}{A_p} (M_p + M_{ba}) a_p - M_{ub} g + F_{\mu ub} + (\dot{m}_{ad} V_{ad} + \dot{m}_{ex} V_{ex} + \dot{m}_{bb} V_{bb})_{ub} - \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} V_{ub} + (P_{ub} - P_b) \frac{dA_{ch}}{dt} - \rho_{ub} V_{ub} \frac{dV_{ub}}{dt} - V_{ub} V_{ub} \frac{d\rho_{ub}}{dt} \right]$$

$$\frac{dV_b}{dt} = \frac{1}{\rho_b V_b} \left[ -\frac{A_{pb}}{A_p} (M_p + M_{ba}) a_p - M_b g + F_{\mu b} + (\dot{m}_{ad} V_{ad} + \dot{m}_{ex} V_{ex} + \dot{m}_{bb} V_{bb})_b + \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} \frac{\rho_{ub}}{\rho_b} (V_{ch} + V_{ub}) - \rho_b V_b \frac{dV_b}{dt} - V_b V_b \frac{d\rho_b}{dt} \right]$$

Equação de estado  
do gás ideal

$$\frac{dP_{ub}}{dt} = \frac{P_{ub}}{\rho_{ub}} \frac{d\rho_{ub}}{dt} + \frac{P_{ub}}{R_{ub}} \frac{dR_{ub}}{dt} + \frac{P_{ub}}{T_{ub}} \frac{dT_{ub}}{dt}$$

$$\frac{dP_b}{dt} = \frac{P_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} + \frac{P_b}{R_b} \frac{dR_b}{dt} + \frac{P_b}{T_b} \frac{dT_b}{dt}$$

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Modelo quase-dimENSIONAL de duas zonas - Equações

$$\frac{dT_{ub}}{dt} = \frac{(\gamma_{ub} - 1)}{\rho_{ub} \mathcal{V}_{ub} R_{ub}} \left\{ -\rho_{ub} \mathcal{V}_{ub} \left( \mathcal{V}_{ub} \frac{d\mathcal{V}_{ub}}{dt} \right) - \left( h_{ub} + \frac{\mathcal{V}_{ub}^2}{2} - \frac{P_{ub}}{\rho_{ub}} \right) \left( \mathcal{V}_{ub} \frac{d\rho_{ub}}{dt} + \rho_{ub} \frac{d\mathcal{V}_{ub}}{dt} \right) \right.$$

$$\left. - \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} \left( h_{ub} + \frac{\mathcal{V}_{ub}^2}{2} \right) - \rho_{ub} \mathcal{V}_{ub} \left( \sum_{i=1}^N u_i \frac{dC_i}{dt} \right)_{reação} \right|_{ub} + \frac{\delta Q_{\ell}}{dt} \Big|_{ub} - P_{ub} \frac{d\mathcal{V}_{ub}}{dt} - \frac{\delta W_{\mu}}{dt} \Big|_{ub}$$

$$+ \left[ \dot{m}_{ad} \left( h_{ad} + \frac{V_{ad}^2}{2} \right) + \dot{m}_{ex} \left( h_{ex} + \frac{V_{ex}^2}{2} \right) + \dot{m}_{bb} \left( h_{bb} + \frac{V_{bb}^2}{2} \right) \right]_{ub} + \dot{m}_{inj} h_f \Big\}$$

Conservação  
da energia

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{(\gamma_b - 1)}{\rho_b \mathcal{V}_b R_b} \left\{ -\rho_b \mathcal{V}_b \left( \mathcal{V}_b \frac{d\mathcal{V}_b}{dt} \right) - \left( h_b + \frac{\mathcal{V}_b^2}{2} - \frac{P_b}{\rho_b} \right) \left( \mathcal{V}_b \frac{d\rho_b}{dt} + \rho_b \frac{d\mathcal{V}_b}{dt} \right) \right.$$

$$\left. + \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} \left( h_{ub} + \frac{\mathcal{V}_{ub}^2}{2} \right) - \rho_{ub} V_{ch} A_{ch} (h_b - h_{ub}) - \rho_b \mathcal{V}_b \left[ \sum_{i=1}^N \left( h_b - \frac{P_b}{\rho_b} \right) \frac{dC_i}{dt} \right]_{reação} \right|_b + \frac{\delta Q_{\ell}}{dt} \Big|_b$$

$$\left. - P_b \frac{d\mathcal{V}_b}{dt} - \frac{\delta W_{\mu}}{dt} \Big|_b + \left[ \dot{m}_{ad} \left( h_{ad} + \frac{V_{ad}^2}{2} \right) + \dot{m}_{ex} \left( h_{ex} + \frac{V_{ex}^2}{2} \right) + \dot{m}_{bb} \left( h_{bb} + \frac{V_{bb}^2}{2} \right) \right] \Big\}$$

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Modelo quase-dimensional de duas zonas - Equações

Taxa de variação  
da fração queimada

$$\frac{dX_b}{dt} = \frac{1}{M} \left( \rho_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \frac{d\rho_b}{dt} \right)$$

Dinâmica de  
corpo rígido (rotação)

$$\frac{d\omega}{dt} = (\tau_g + \tau_{osc} - \tau_\mu - \tau_\ell) / (I_{vol} + I_{vb} + I_{bi})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

**Obs:** Os termos do lado direito das equações são avaliados através dos modelos dos componentes.

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

---

### □ Modelo quase-dimensional de duas zonas

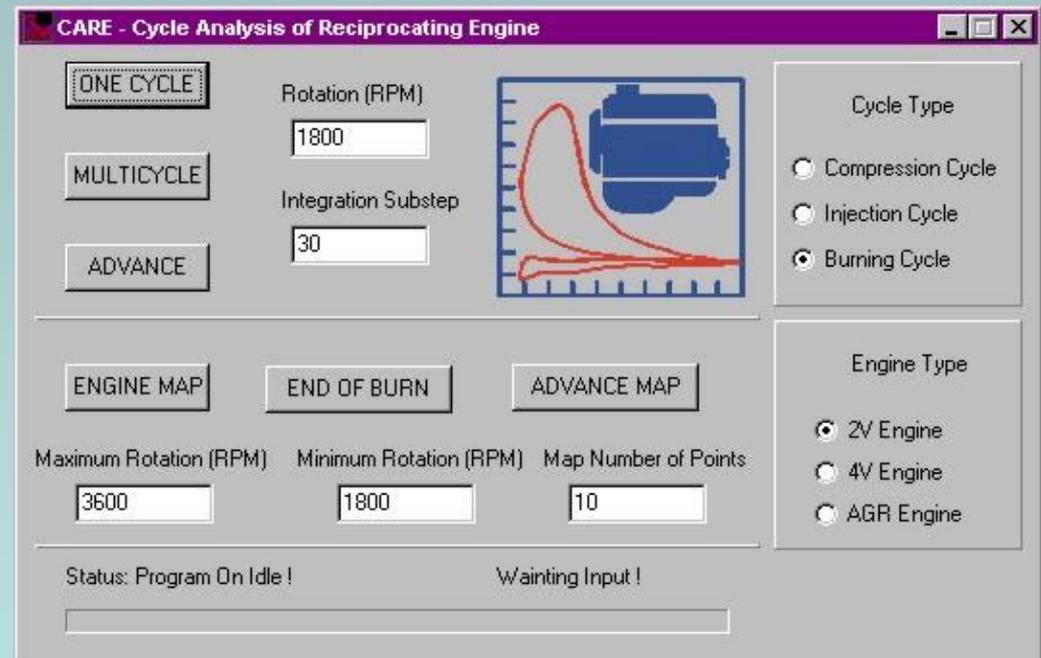
- Método de solução
  - Problema de valor inicial resolvido por integrador Runge-Kutta de 4º ordem
- Aspectos relevantes
  - Tempo de simulação longo (30 min por ciclo, Pentium III)
  - Gases com composição variável
  - O modelo de onda de combustão permite prever detonação
  - Desacoplamento do modelo de coletor do modelo de duas zonas dentro do cilindro
  - A velocidade de queima turbulenta do combustível segue uma lei empírica que exige conhecimento de dados experimentais

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Programa CARE

- Modelo quase-dimensional (câmara 3D)
- Linguagem Object Pascal (ambiente DELPHI)
- Orientação a objetos
- Sem recursos visuais (p/ garantir portabilidade)
- Arquivos de entrada e saída em ASCII



# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Programa CARE

- Modelos implementados
  - Coletores (modelo de Plenum)
  - Blow-by
  - Válvula borboleta (modelo de orifício corrigido por Cd)
  - Válvulas trompete (modelo de orifício corrigido por Cd)
  - Gás ideal (modelo com composição variável, propriedades de transporte e termodinâmicas variáveis, equilíbrio químico)
  - Sistema Pistão, Biela e Virabrequim (modelo de corpo rígido)
  - Atmosfera com altitude e umidade variável (modelo ISA)
  - Atrito mecânico (modelo variável com Re de admissão)

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Programa CARE

- Modelos implementados
  - Combustão ideal (modelo Otto)
  - Combustão de uma zona (modelo Wiebe)
  - Combustão de duas zonas (modelo Onda de Combustão)
  - Câmara de combustão (modelo 3D com onda esférica)
  - Cames (modelo analítico)
  - Cames (modelo com dados medidos)
  - Perda de calor (modelo de tubo curto)
  - Carburador (curva de mistura)

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Programa CARE

- **Dados de Entrada (Arquivos ASCII)**
  - **Dados da atmosfera local e das espécies químicas**
  - **Perdas no filtro de ar**
  - **Dimensões do coletor de admissão e de exaustão**
  - **Dimensões do cárter, cilindro, pistão, biela e virabrequim**
  - **Curvas da câmara de combustão com onda esférica**
  - **Temperatura do sistema de resfriamento**
  - **Elevação do came de admissão e de exaustão**
  - **Dimensões da válvula de admissão e de exaustão**
  - **Dimensões da saída do tubo de exaustão e de “blow-by”**
  - **Dimensões da válvula borboleta**
  - **Dados do combustível**
  - **Dados de mistura, ignição e avanço**
  - **Parâmetros do modelo de queima**

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### □ Programa CARE

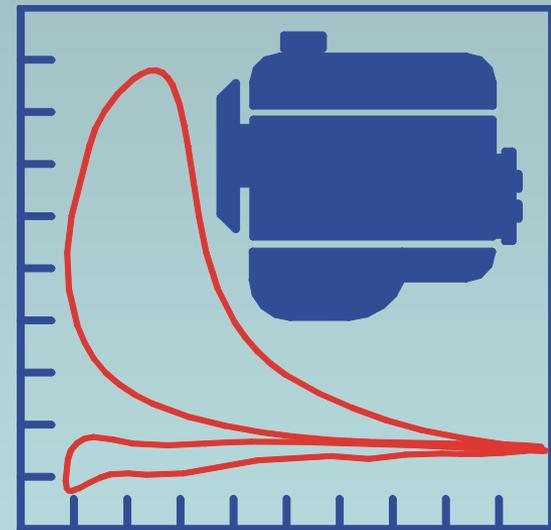
- Relatórios e Tabelas de Saída (Arquivos ASCII)
  - Para cada ciclo são gerados dois arquivos texto com:
    - Propriedades dentro do cilindro e coletores a cada 0,5 graus de rotação do virabrequim
      - P,T,V e Ci dos gases, Vazões mássicas, Entalpia, Disponibilidade, P,T,V e Ci nos Coletores, etc
    - Valores macroscópicos para o ciclo
      - Rotação, Vazões médias, Eficiências Volumétricas, Razões de Mistura, Pressões, Torque, Potência, Dados da Combustão, Eficiências Térmicas, Composição dos Gases de Exaustão, etc

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

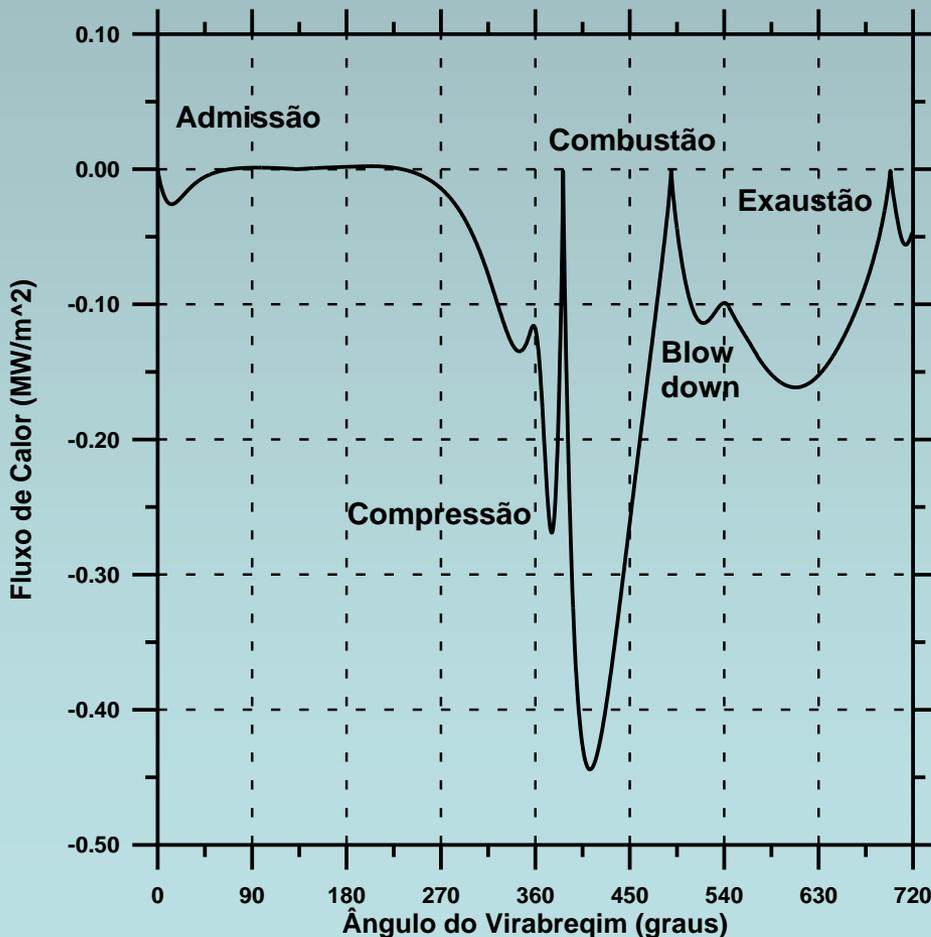
### □ Resultados

- Pós-processador esquemático
  - P, T, V, Pistão, Válvulas
  - Atmosfera, Admissão, Cilindro, Exaustão, Cárter
- Análise de Um Ciclo
  - Gasolina A
  - Gasolina C
  - Detonação



# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

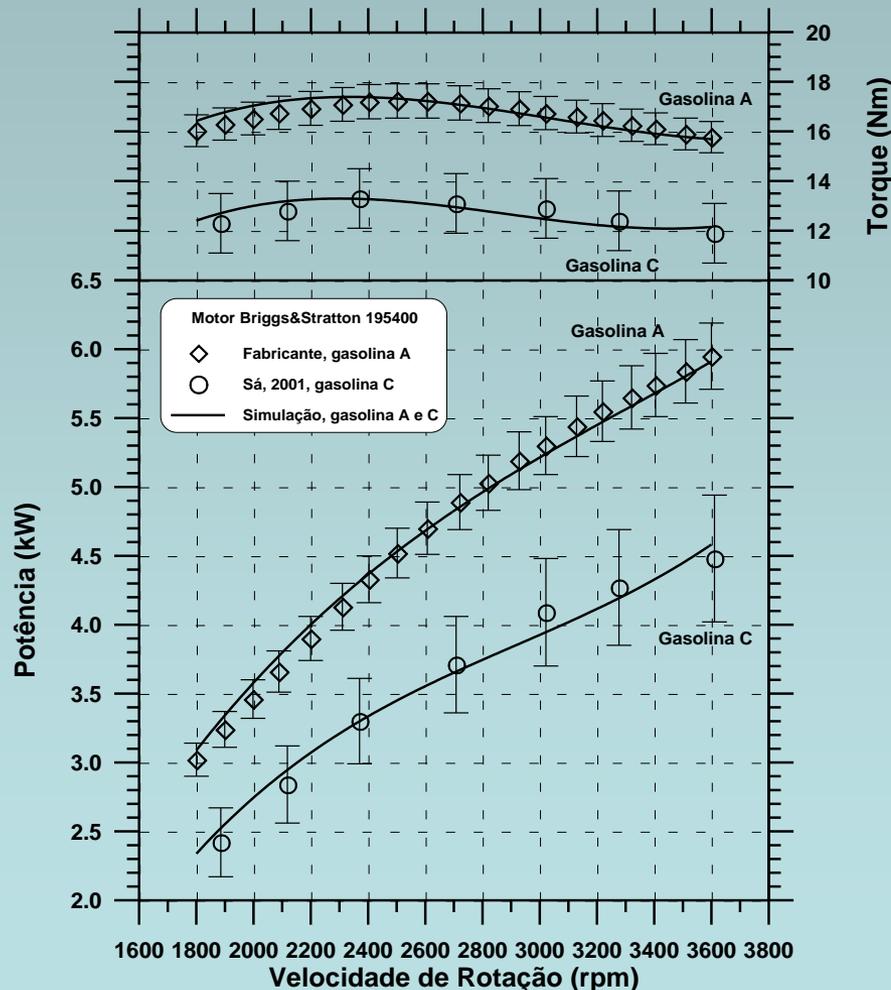


### ☐ Análise de fluxo de calor perdido

- Exemplo de fluxo de calor em um motor de combustão interna monocilindro, mistura rica (9:1) com gasolina C
- O sinal negativo indica calor transferido do gás para o sistema de resfriamento

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

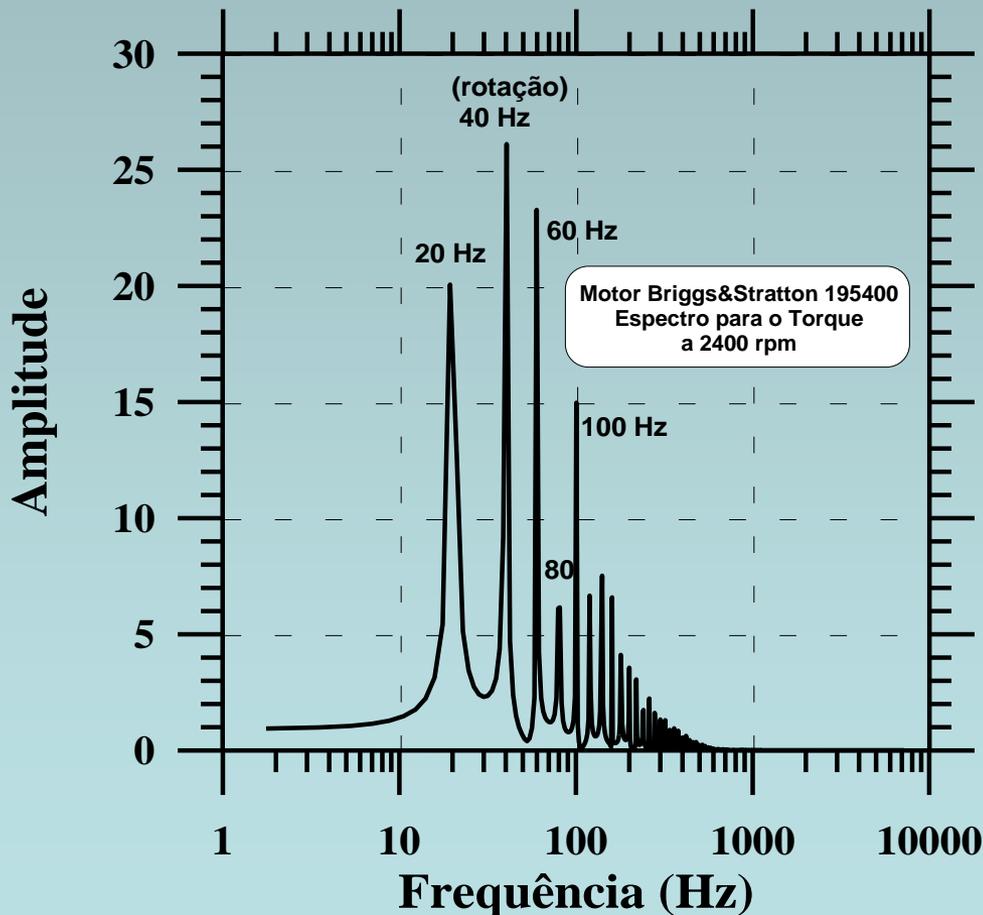


### □ Análise de Desempenho

- Plena carga
- Ao longo de toda a faixa de rotações
- Previsões com incerteza equivalente ao erro experimental
- Efeito de mudança de regime de chama plissada para flameletes a 2400rpm
- Efeito Venturi e Ram

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

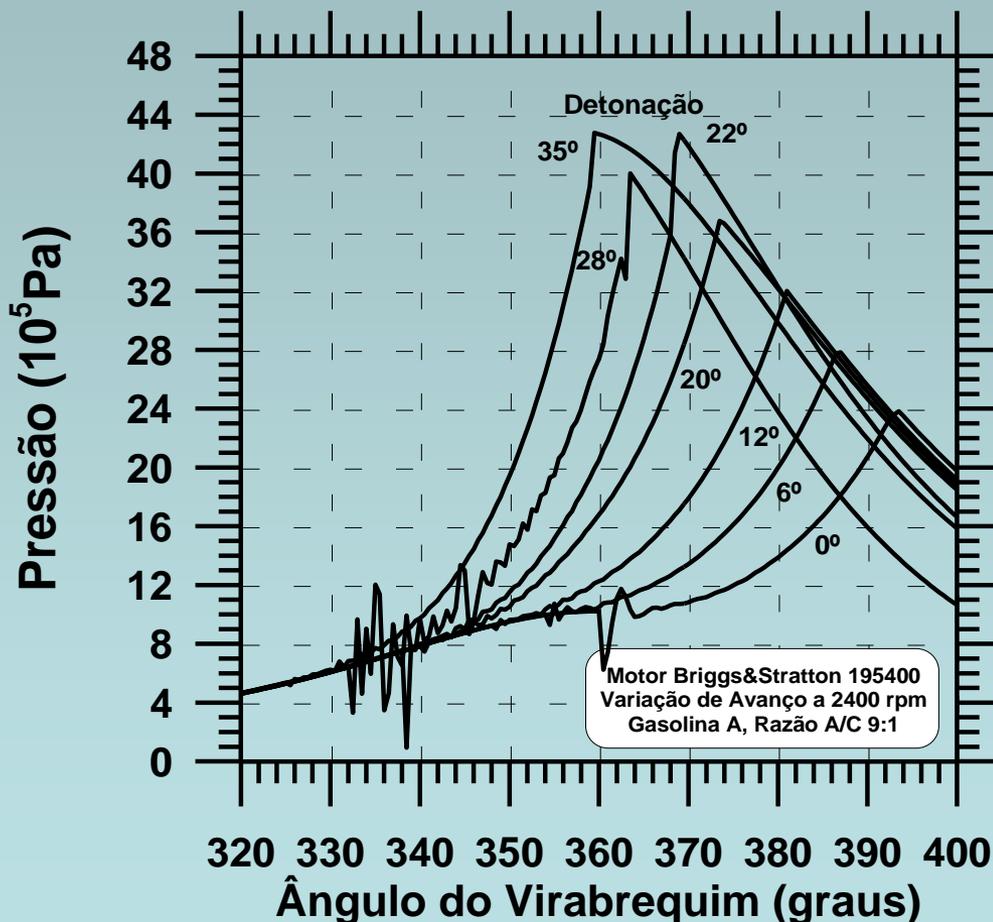


### ☐ Análise Multiciclo

- Os ciclos atingem um regime transiente estável
- O modelo prevê as frequências naturais  $1/2N$ ,  $1N$ ,  $1.5N$ ,  $2N$ ,  $2.5N$

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)



### ☐ Análise Avanço de Ignição

O modelo:

- captura a detonação
- calcula a força do primeiro choque sem alteração do equacionamento
- otimiza o avanço de ignição

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

---

### □ Programa CARE

- Possui um modelo quase-dimensional de duas zonas de motores de combustão interna, de ignição a centelha, para previsão de desempenho
- Possui as vantagens do uso da análise orientada a objetos na modelagem
- O programa foi considerado validado frente a resultados experimentais
- Foram propostas novas abordagens em vários modelos de componentes do motor
- Possui um modelo algébrico não-ideal para aplicações em tempo real

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

### ☐ CARE e Modelos na literatura (Quase-dimensionais)

GRUPO TECNOLÓGICO	Modelo enchimento e esvaziamento de coletores	Modelo 1D de coletores	Modelo de Blow-by	Modelo de válvulas trompete	Modelo de injeção de combustível	Modelo de equilíbrio químico	Modelo de cinética química	Modelo de uma zona (Lei de Wiebe)	Modelo 3D da câmara de combustão	Modelo de duas zonas (Pb=Pub)	Modelo de onda de combustão	Modelo de detonação	Modelo de fator de turbulência	Modelo de atmosfera	Modelo de efeito Venturi	Modelo de válvula borboleta	Modelo dinâmico pistão/biela	Modelo dinâmico de ciclo (Conservação da quantidade de movimento no cilindro)	Modelo de velocidade de Woschni	Modelo de turbocompressor
CARE																				
Escola Inglesa e Indiana																				
Escola Americana																				
Escola Germânica																				
Escola Latina																				

#### Inovações

Escola Inglesa: Benson, 1982, Blair, 1999, Horlock e Winterbone, 1986, Baruah, 1986, Sodré, 1998

Escola Indiana: Mohanan e Babu, 1991

Escola Americana: Heywood, 1988, Ferguson, 1986, Woodard, Johnson e Lott, 1989, Crawford, Celik e Lyons, 1993

Escola Germânica: Puscher, 1986

Escola Latina: Gallo, 1990, Pereira, 1995, Nigro, Ambroggi e Defranco, 1999, Hanriot, 2001

# Motores de Combustão Interna

## Simulação (CARE)

---

### □ Próximos desenvolvimentos

- Realizar medidas experimentais mais completas para estender a validação do modelo
- Introduzir um modelo 1D de coletores (em validação)
- Introduzir um modelo de cinética química para análise de emissões de  $\text{NO}_x$
- Introduzir um modelo de turbocompressores (implementado)
- Rodar casos de um motor multicilindro para obter o mapa de desempenho
- Estudar a velocidade de queima laminar dos combustíveis nacionais (gasolina C, álcool, misturas e GNV)

# Bibliografia

- Barros, J. E. M. *Estudo de motores de combustão interna aplicando análise orientada a objetos*. Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, UFMG, 2003.
- Ferguson, C.R. *Internal combustion engines, applied thermosciences*. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- Heywood, J. B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- Obert, E. F. *Motores de combustão interna*. Porto Alegre: Globo, 1971.
- Stone, R. *Introduction to internal combustion engines*. Warrendale: SAE, 1995.
- Taylor, C. F. *Análise dos motores de combustão interna*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, vol. 2, 1988.