

Parâmetros operacionais de motores alternativos

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Potência de atrito: \dot{W}_f
 - Potência consumida pelo próprio motor para seu funcionamento
 - Atrito em mancais, pistão-cilindro, gasto em acessórios (bomba de óleo, alternador, etc.), na aspiração, na exaustão, etc.
 - Pode ser medida em dinamômetro
 - P. ex.: aciona-se o motor desligado (por um motor elétrico) e mede-se a potência

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Potência indicada: \dot{W}_i
 - Potência desenvolvida pelos gases de combustão sobre o pistão
 - É a potência do ciclo ar-combustível
- Potência útil ou efetiva: \dot{W}_e
 - Potência obtida em dinamômetro no ensaio do motor
 - No caso de veículos é a potência disponível para a caixa de mudanças

$$\dot{W}_e = \dot{W}_i - \dot{W}_f$$

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Rendimento mecânico: η_m

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_e}{\dot{W}_i}$$

– Em geral, $0,65 \leq \eta_m \leq 0,85$

- Pressão média efetiva: (pme)

– Pressão teórica cte durante curso descendente, produzindo o mesmo trabalho líquido desenvolvido pelo ciclo

$$pme = \frac{\dot{W}_e}{\dot{V}_T}$$

- Onde \dot{V}_T é a taxa de variação do deslocado (de gás)

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- $V_d = V_{max} - V_{min} = \frac{\pi}{4} d^2 S$
- Também conhecido como cilindrada unitária
- V_T = volume deslocado (de gás). Em um ciclo $V_T = V_d \times i$ (i = N° total de cilindros)

$$\dot{V}_T = \frac{\pi}{4} d^2 S \cdot i \cdot \frac{N}{60x}$$

- x=1 para motores 2T
- X=2 para motores 4T
- Pressão média indicada: (pmi)

$$pmi = \frac{\dot{W}_i}{\dot{V}_T}$$

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Pressão média de atrito: p_{mf}

$$p_{mf} = \frac{\dot{W}_f}{\dot{V}_T}$$

- OBS: $p_{me} = p_{mi} - p_{mf}$

- Velocidade média do pistão: V_p

$$V_p = 2 \frac{N}{60} S$$

- Consumo específico de combustível: CEC e CECI
 - É uma medida da eficiência do motor
 - Quantos gramas de combustível são necessários para produzir 1 kW

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Consumo específico de combustível: CEC e CECI
 - É uma medida da eficiência do motor

$$CEC = \frac{\dot{m}_c}{\dot{W}_e}$$

$$CECI = \frac{\dot{m}_c}{\dot{W}_i}$$

- Eficiência Térmica: η_T

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_c PCI}$$

- É a razão da potência efetiva em relação à energia disponível da combustão.

– Ainda:

$$\eta_T = \frac{1}{CEC \cdot PCI}$$

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Rendimento indicado: η_i

$$\eta_i = \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}_c PCI}$$

– E assim:

$$\eta_T = \eta_i \cdot \eta_m$$

- Rendimento volumétrico: η_v

– Relação entre massa de ar admitida no motor \dot{m}_a e massa de ar que poderia caber no mesmo volume nas condições ambientes \dot{m}_{ae}

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{ae}}$$

- Onde $\dot{m}_{ae} = \rho_0 \dot{V}_T$ e $\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}$

Parâmetros operacionais de motores alternativos

- Se definirmos:

$$F = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a}$$

- Então:

$$\dot{W}_e = \rho_0 \dot{V}_T F \cdot PCI \cdot \eta_v \eta_i \eta_m$$

Variação de \dot{W}_e com a rotação

- Para $T =$ torque:

$$\dot{W}_e = T \frac{2\pi N}{60}$$

- E se

$$\rho_0, \dot{V}_T, x, F, \text{ e } PCI = \text{ctes}$$

- Então:

$$T = f(\eta_v, \eta_i, \eta_m)$$

- Logo, se os rendimentos se mantiverem ctes com a rotação:

$$\dot{W}_e \sim N$$

- A potência efetiva é diretamente proporcional à rotação

\dot{W}_e com rotação constante

- Quando $N = \text{cte}$:

$$\dot{W}_e = f(\dot{V}_T, F)$$

- se os rendimentos se mantiverem ctes
- Assim:
 - Motor ICE $\Rightarrow F = \text{cte}$: controle por estrangulamento do fluxo de ar
 - Acelerador atua no fluxo de ar (que traz combustível junto)
 - Motor ICO $\Rightarrow \dot{m}_a = \text{cte}$: controle no fluxo de combustível
 - Acelerador atua apenas no fluxo de combustível

Correção da potência

- Potência é função da densidade do ar
- Normas estabelecem condições padrão de T e P do ar para ensaio de motores
- Correções relacionam potência medida com a potência que seria medida se o motor fosse ensaiado a T e P padrão
- Normas estabelecem como isto deve ser feito
 - SAE
 - DIN
 - ABNT

Norma ABNT MB-392

- Para motores ICE

$$\dot{W}_{ec} = \dot{W}_e \frac{736}{P_{ens}} \sqrt{\frac{T_a + 273}{303}}$$

- Para motores ICO

$$\dot{W}_{ec} = \dot{W}_e \frac{736}{P_{ens}} \frac{T_a + 273}{303}$$

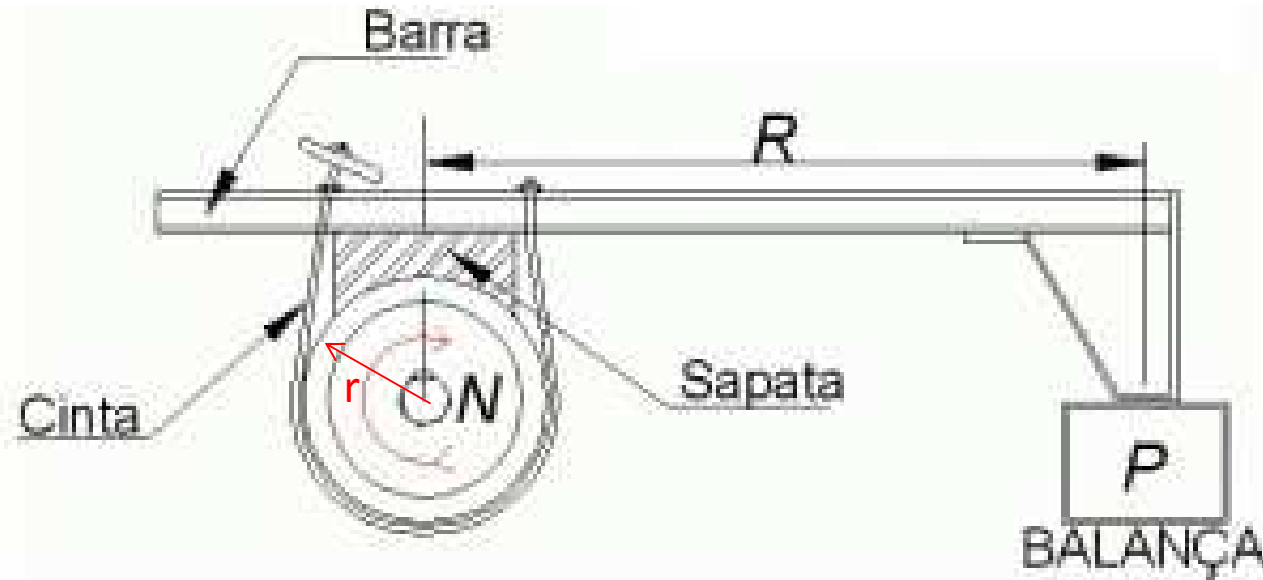
- Onde:

- \dot{W}_{ec} = potência corrigida p/ estado padrão
- \dot{W}_e = potência de eixo medida
- P_{ens} = pressão barométrica no ensaio (mmHg)
- T_a = temperatura ambiente no ensaio (°C)

Medidores de torque (dinamômetros)

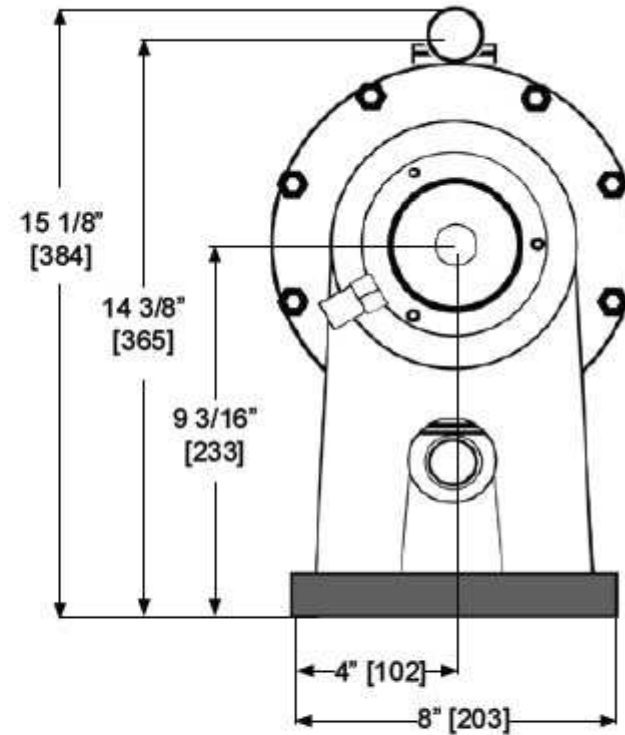
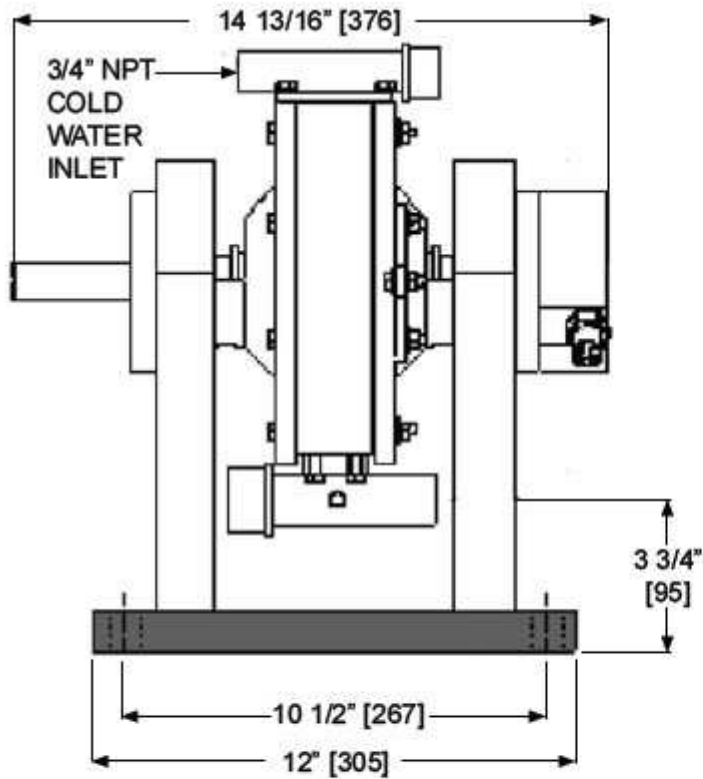
- O torque é medido em freios dinanométricos
- Utilizam-se dispositivos para dissipar a potência gerada pelo motor
 - Elétricos
 - Hidráulicos
 - Aerodinâmicos
 - Etc.

Freio de Prony



- $\dot{W}_{at} = (2\pi r \cdot f_{at}) \frac{n}{60}$ onde $n = \text{rpm}$
- Onde: $r \cdot f_{at} = P \cdot R$
- $\dot{W}_{at} = \frac{2\pi n}{60} P \cdot R$

Dinamômetro hidráulico



POWER: 50 hp (37 kw)
TORQUE: 68 ft. lbs. (92 Nm)
SPEED: 6000 RPM
WATER USE: 10 GPM (38 L/min) (No Cooling System)
SHIPPING WEIGHT: 150 lbs. (68 kg)

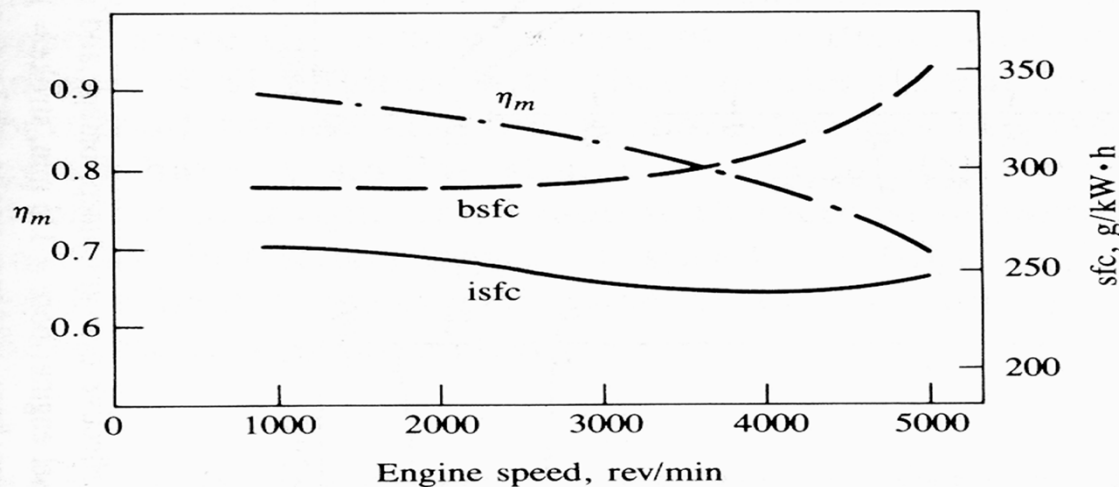
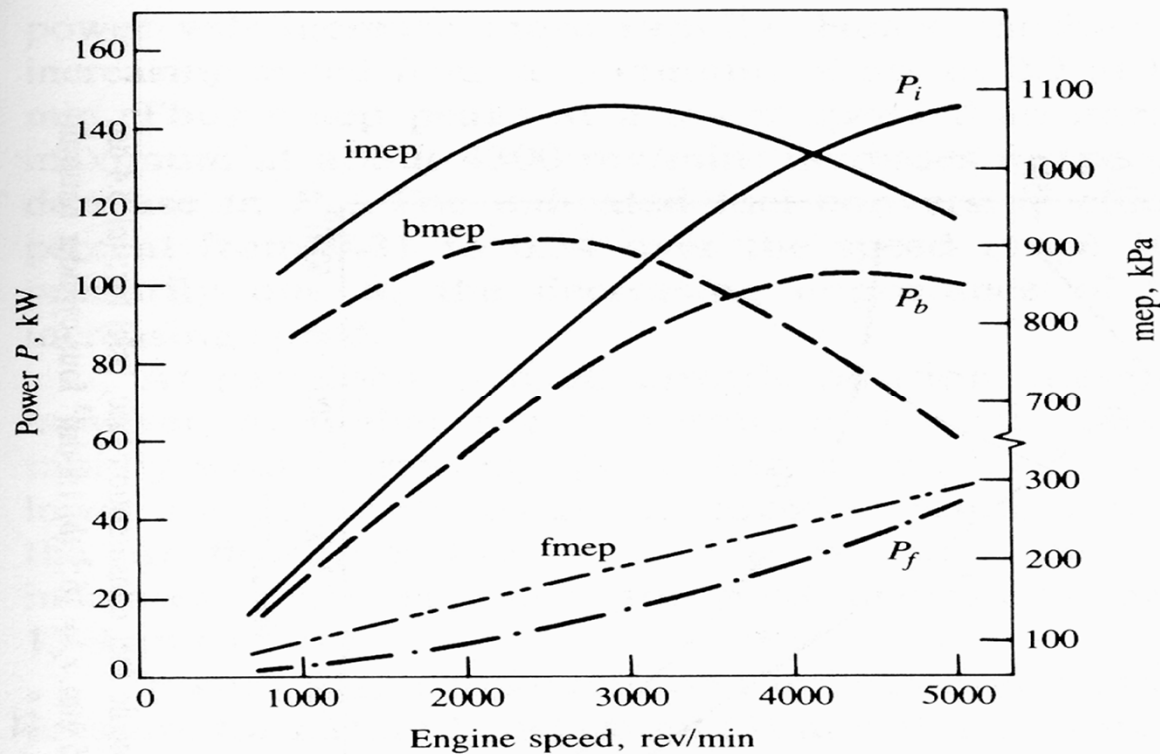


Figura 1 – Motor Cummins instalado em bancada dinamométrica no LMT

Pimentel, Belchior, Pereira, An. 5. Enc. Energ. Meio Rural 2004



<http://www.wilcoxengines.co.uk>



Motor de 6 cilindros, IC,
 $V_d = 3,8$ litros, $B = 96,8$ mm,
 $L = 86$ mm, $r_c = 8,6$

- P_i = potência indicada
- P_f = potência de atrito
- P_b = potência líquida = $P_i - P_f$
- $imep$ = pressão indicada média equivalente
- $bmep$ = pressão líquida média equivalente
- $fmep$ = pressão de atrito média equivalente
- η_m = eficiência mecânica
- $bsfc$ = consumo específico de combustível
- $isfc$ = consumo indicado de combustível

pme

- Muito utilizada na comparação de motores
- Quanto maior pme:
 - Mais potência por cilindrada
 - Condições de operação mais severas
 - Em geral, vida útil menor

pme

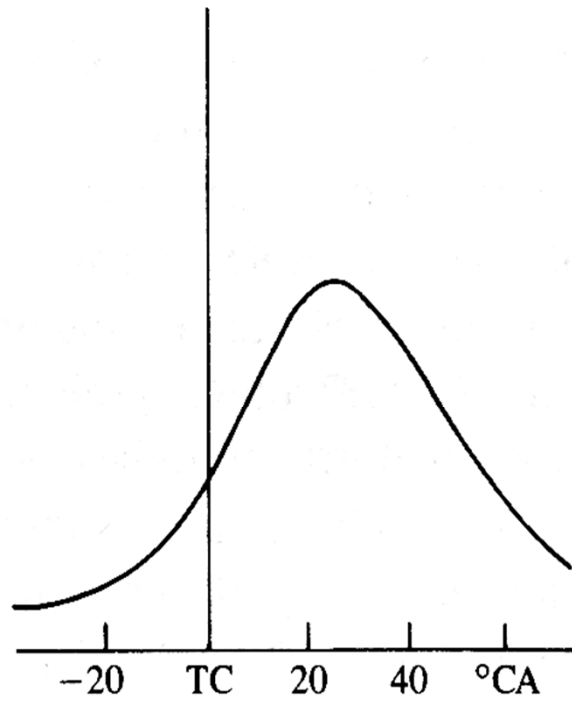
- Ejemplos (kgf/cm²):
 - Motor ICE 4T gasolina: de 8 a 9
 - Motor ICE 4T alcohol: de 9 a 10
 - Motor ICE 2T gasolina: de 5 a 7
 - Motor ICO 4T: de 8 a 9
 - Motor ICO 2T: de 6 a 7
 - Motor ICO 4T turbinado: de 10 a 12
 - Motor Fórmula 1: 32

	ICE	ICO
Pressão no fim da compressão Kgf/cm ²	8 a 15	40 a 50
Pressão máxima do ciclo Kgf/cm ²	45 a 55	60 a 75
Relação de ar teórico	0,70 a 1,15	1,15 a 3,5
Formação da mistura	no carburador	na câmara de combustão
Volatilidade de combustível	alta	baixa
Custo de fabricação	menor	maior
Rendimento térmico	menor	maior
Início da combustão	faísca elétrica	compressão do ar, ignição espontânea
Taxa de compressão (ar puro)	6 a 12	13 a 23
Relação Peso/Potência	menor	maior

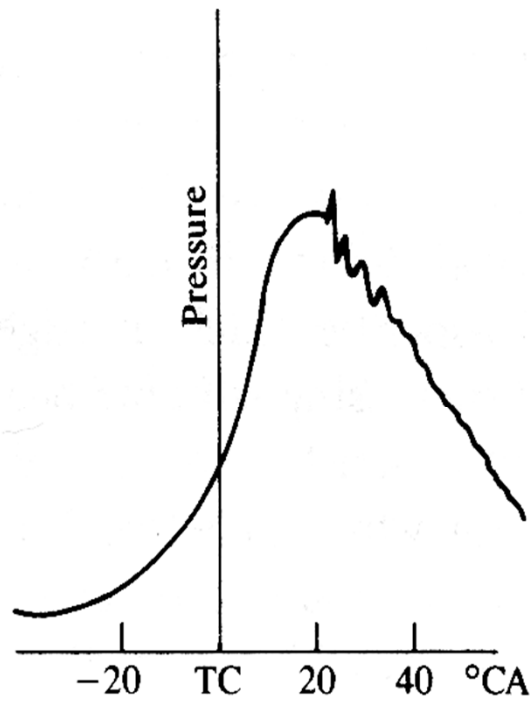
Detonação

- Também conhecida como “batida”
- Ignição espontânea na mistura antes do ponto ideal, isto é, é uma combustão anormal (adiantada)
 - Ondas de choque
 - Aumentos anormais e localizados de temperatura e pressão
 - Ruído excessivo

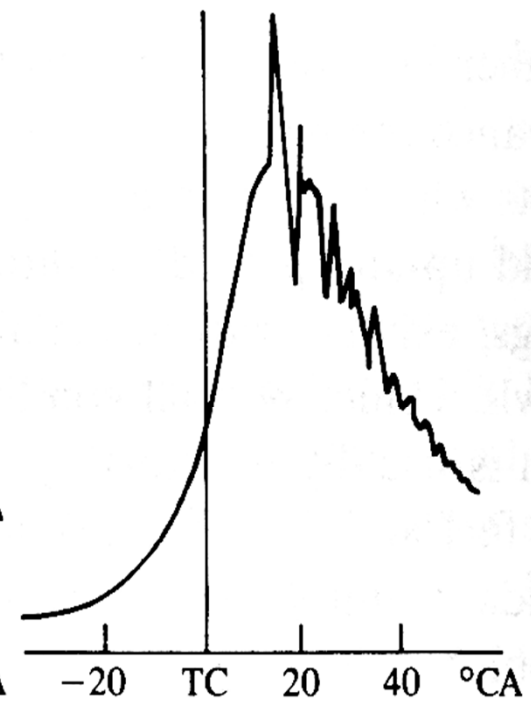
Detonação



(a) Normal combustion,
spark 28°BTC



(b) Slight knock,
spark 28°BTC



(c) Intense knock,
spark 32°BTC

Octanagem

A ocorrência de detonação no motor depende fundamentalmente do tipo de combustível, mas também das características do motor.

O *número de octanos* é uma medida da maior ou menor tendência do combustível de apresentar o fenômeno de detonação no motor.

Maior octanagem => maior resistência à detonação

A escala de octanagem *foi definida arbitrariamente*:

		Escala
n-heptano	$n-C_7H_{16}$	0
isooctano	C_8H_{18}	100

octanagem 90 significa resistência à detonação equivalente a uma mistura de 90% de isooctano e 10% de n-heptano

Determinação da octanagem de um combustível

É feita segundo dois tipos de procedimentos:

Norma ASTM D-2699 - método de pesquisa (motor em plena carga e alta rotação)

Norma ASTM D - 2700 - método do motor (motor com carga e baixa rotação)

Os valores obtidos são ligeiramente diferentes, sendo sempre menores aqueles referentes ao método do motor.

Exemplos:	pesquisa	motor
Gasolina	92-98	80-90
metano	120	120
propano	112	97
metanol	106	92
etanol	107	89

Cetanagem

- Combustíveis para motores ICO devem possuir energia de ativação baixa
 - Trabalham a elevadas taxas de compressão
 - Combustão deve ocorrer sem detonação
- Cetanagem: medida da resistência à detonação em motores ICO
 - Ao cetano se atribui cetanagem =100
 - Ao α -metil-naftaleno se atribui cetanagem =0
 - Um combustível com cetanagem =45 se comporta como mistura com 45% de cetano e 55% de α -metil-naftaleno

$$cetanagem = 60 - \frac{octanagem}{2}$$

Combustível	Fórmula	M	ρ kg / m ³	Calor Vapori- zação KJ/kg	C_p - líquido kJ/(kg K)	C_p - vapor kJ/kg K	Poder calorífico inferior MJ/kg	(A/F) _s	Octana- gem
Práticos									
Gasolina	$C_n H_{1,87n}(l)$	~110	720-780	305	2,4	~1,7	44,0	14,6	80-90
Diesel leve	$C_n H_{1,8n}(l)$	~170	840-880	270	2,2	~1,7	42,5	14,5	---
Diesel pesado	$C_n H_{1,7n}(l)$	~200	820-950	230	1,9	~1,7	41,4	14,4	---
Gás Natural	$C_n H_{3,8n} N_{0,1n}(g)$	~18	~0,79	---	---	~2	45	14,5	---
Hidrocarbonetos									
Metano	$CH_4(g)$	16,04	0,72	509	0,63	2,2	50,0	17,23	120
Propano	$C_3H_8(g)$	44,10	2,00	426	2,5	1,6	46,4	15,67	97
Isooctano	$C_8H_{18}(l)$	114,23	692	308	2,1	1,63	44,3	15,13	100
Cetano	$C_{16}H_{34}(l)$	226,44	773	358	---	1,6	44,0	14,82	---
Benzeno	$C_6H_6(l)$	78,11	879	433	1,72	1,1	40,2	13,27	115
Tolueno	$C_7H_8(l)$	92,14	867	412	1,68	1,1	40,6	13,50	109
Álcoois									
Metanol	$CH_4O(l)$	32,04	792	1103	2,6	1,72	20,0	6,47	92
Etanol	$C_2H_6O(l)$	46,07	785	840	2,5	1,93	26,9	9,00	89
Outros									
Carbono	$C(s)$	12,01	~2	---	---	---	33,8	11,51	
Monóxido de Carbono	$CO(g)$	28,01	1,25	---	---	1,05	10,1	2,467	
Hidrogênio	$H_2(g)$	2,015	0,090	---	---	1,44	120,0	34,3	

Densidade: a 0°C e 1 atm - Calor de vaporização a 1 atm e 25°C para combustíveis líquidos e 1 atm e temperatura de ebulição para os gasosos.

Fonte: J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc. Graw-Hill Books, 1988.

Combustíveis

- Na ausência de maiores informações, consideraremos:
 - Gasolina = C_8H_{18}
 - Etanol = C_2H_6O
 - Diesel = $C_{12}H_{26}$
 - Metanol = CH_4O
 - Butano = C_4H_{10}
 - Propano = C_3H_8
 - Metano = CH_4

Entalpia e energia interna de combustão

- Entalpia de combustão: é a variação de entalpia quando um componente sofre combustão completa a T e P constantes

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i$$

- h_{rp} pode ser determinada:
 - Pela eq. Acima
 - Por calorímetros ($= \dot{Q} / \dot{n}$)
- Da mesma forma:

$$\bar{u}_{RP} = \sum_P n_e \bar{u}_e - \sum_R n_i \bar{u}_i$$

Poder Calorífico

- À pressão constante (motor ICO) , em kJ/kg

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i = \frac{-PC}{n_f} \Rightarrow PC_p = \frac{-\left(\sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i\right)}{M_f}$$

- À volume constante (motor ICE), em kJ/kg

$$\bar{u}_{RP} = \sum_P n_e \bar{u}_e - \sum_R n_i \bar{u}_i = \frac{-PC}{n_f} \Rightarrow PC_v = \frac{-\left(\sum_P n_e \bar{u}_e - \sum_R n_i \bar{u}_i\right)}{M_f}$$

- OBS: em geral não se faz distinção entre PC_p e PC_v
 - Os valores são muito próximos
 - Utiliza-se PCI e PCS