

## 5

### **Modelo do regime transiente durante o aquecimento de um motor a combustão interna**

Descreve-se, a seguir, o modelo matemático do processo de aquecimento do motor (“warm-up”), o qual precede o regime permanente, considerado no capítulo anterior.

Segundo Bohacz (2007), o processo de aquecimento do motor é prejudicial para o seu funcionamento. Durante o arranque a frio o desgaste dos anéis do pistão pode atingir valores de até 1000 por cento superiores ao desgaste em condições normais de operação.

Devido às baixas temperaturas, faz-se necessário fornecer uma mistura ar-combustível mais rica, incrementando o consumo do motor, além das emissões de hidrocarbonetos não queimados na combustão.

Durante o arranque do motor, a quantidade de emissões produzidas é maior que em condições de funcionamento em regime permanente, originando, assim, maiores níveis de poluição (Favez et al., 2009).

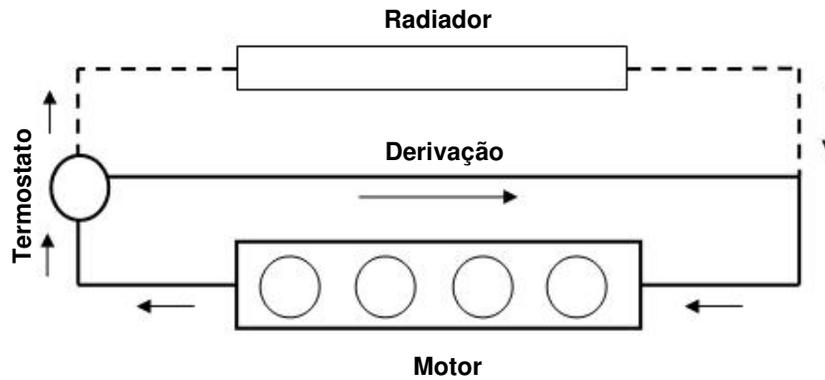
As duas motivações acima exigem do motor menores tempos de aquecimento. Espera-se que os nanofluidos, devido às suas melhores propriedades de troca de calor, permitam a diminuição destes tempos.

#### **5.1.**

##### **Descrição do sistema para o regime transiente**

Descreve-se, a seguir, o esquema do circuito analisado para o desenvolvimento do modelo do regime transiente. Na Figura 18 mostra-se, de maneira simplificada, o sistema a ser analisado.

Na Figura 18 observa-se, em linha cheia, o circuito de resfriamento com o termostato fechado. O calor rejeitado pelo bloco do motor é fornecido ao fluido de arrefecimento, obrigado a circular neste circuito (termostato fechado) até que o motor alcance a sua temperatura de operação.



**Figura 18 – Esquema do circuito usado para o modelo do regime transiente, mostrando o sistema ativado durante o aquecimento do motor (linha cheia), e o circuito utilizado durante a operação normal do motor (linha tracejada).**

Nestas condições o radiador não recebe nenhum escoamento do FDA, até que este alcance uma temperatura na qual o termostato abre a passagem para ele escoar através do radiador. Para a descrição do processo definem-se os seguintes termos:

1.  $\dot{Q}_{bc,nf}$ : é a taxa de troca de calor entre o bloco do motor e o fluido de arrefecimento.
2.  $\dot{Q}_{fonte}$ : é a taxa de transferência de calor do cilindro para o bloco do motor. Para fins de cálculo no presente trabalho é considerada fixa. É uma fração da potência do motor. O cilindro é, portanto, a fonte de calor para o bloco e para o FDA.

Podem-se considerar dois sistemas termodinâmicos simultaneamente:

1. Bloco do motor à temperatura  $T_{bc}(t)$ .
2. Massa de FDA à temperatura  $T_{nf}(t)$ .

sendo  $T$ , a temperatura e  $t$  o tempo.

## 5.2. Desenvolvimento do modelo do regime transiente

A equação de energia para um sistema estacionário (i.e., variações desprezíveis de energia cinética e potencial) é:

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \quad (5.1)$$

Adotam-se as seguintes hipóteses:

1. Despreza-se a contribuição da potência da bomba de circulação na variação da energia interna do FDA.
2. Despreza-se a perda de calor pelas paredes dos dutos, passagens e mangueiras (sistema adiabático).

### 5.2.1. Sistema: fluido de arrefecimento

Aplicando-se um balanço de energia no fluido de arrefecimento, tem-se que:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{bc,nf} \quad (5.2)$$

ou

$$m_{nf} c_{nf} \frac{dT_{nf}}{dt} = \dot{Q}_{bc,nf} \quad (5.3)$$

A taxa de troca de calor entre o nanofluido e o bloco é dada por:

$$\dot{Q}_{bc,nf} = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} \epsilon (T_{bc} - T_{nf}) \quad (5.4)$$

Das equações (5.4) e (5.3) pode-se obter a taxa de variação da temperatura do nanofluido:

$$\frac{dT_{nf}}{dt} = \frac{\dot{m}_{nf}}{m_{nf}} \varepsilon (T_{bc} - T_{nf}) \quad (5.5)$$

sendo  $\dot{m}_{nf}$  a vazão mássica do nanofluido,  $m_{nf}$  a quantidade de fluido de arrefecimento escoando no sistema,  $T_{bc}$ , a temperatura do bloco do motor;  $T_{nf}$ , a temperatura do nanofluido, e, finalmente,  $\varepsilon$ , a efetividade do sistema. Esta (troca de calor com um meio a temperatura constante,  $T_{bc}$ ) pode ser escrita como:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha_{nf, bc} A_{bc}}{\dot{m}_{nf} c_{p, nf}}\right) \quad (5.6)$$

Na eq. (5.6) o parâmetro  $\alpha_{nf, bc}$  é o coeficiente de troca de calor do nanofluido;  $A_{bc}$ , a área de troca de calor e;  $c_{p, nf}$ , o calor específico do nanofluido.

### 5.2.2. Sistema: bloco do motor

Aplicando um balanço de energia no bloco do motor tem-se que:

$$\frac{dT_{bc}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{fonte} - \dot{Q}_{bc, nf}}{m_{mo} c_{mo}} \quad (5.7)$$

Na eq. (5.7),  $m_{mo}$  é a massa do bloco do motor e  $c_{mo}$  é o seu calor específico. O coeficiente de película  $\alpha_{nf, bc}$  é calculado a partir das propriedades do nanofluido com a definição do número de Nusselt:

$$\alpha_{nf, bc} = \frac{Nu_{nf} k_{nf}}{D_{h, jack}} \quad (5.8)$$

Para o número de Nusselt foi usada a eq. (4.39) que leva em consideração a concentração volumétrica das nanopartículas.

O diâmetro hidráulico  $D_{h,jack}$ , dos canais por onde escoava o FDA, foi estimado como:

$$D_{h,jack} = \frac{2S_{pst}L_{jack}}{(L_{jack} + S_{pst})} \quad (5.9)$$

sendo  $S_{pst}$  o curso do pistão e  $L_{jack}$  o espaço entre a parede do cilindro e a camisa do motor, por onde escoava o FDA.

A área da seção transversal por onde escoava o nanofluido foi estimada como:

$$A_{ts,jack} = nS_{pst}L_{jack} \quad (5.10)$$

o fator  $n$  é usado para estimar o número de passagens por onde escoava o FDA, definido como sendo a metade do número de cilindros.