

3

Estado da arte do sistema de arrefecimento automotivo

A quantidade de calor que provem do processo da combustão, e que não foi aproveitado para a geração de potência, é rejeitada, primordialmente e em regime permanente, para os gases de exaustão, para o sistema de arrefecimento e para o óleo lubrificante (Crouse e Anglin, 1977).

Em condições não controladas de temperatura das partes metálicas do motor, elas podem sofrer sérios danos, fazendo-se imprescindível a previsão de um apropriado resfriamento das mesmas (Crouse e Anglin, 1977).

Assim, o sistema de arrefecimento de um motor a combustão interna é usado para manter condições térmicas estáveis no cilindro e pistão, nas condições de operação (Sen, 1980).

Segundo Bohacz (2007) há, basicamente, três razões que justificam a existência de um sistema de arrefecimento no motor:

1. Promover uma elevada eficiência volumétrica minimizando o fluxo de calor da estrutura do motor para o ar de ingresso.
2. Prevenir a detonação devido a elevadas temperaturas na câmara de combustão.
3. Evitar falhas mecânicas nos materiais devido às elevadas cargas térmicas que provêm de gradientes térmicos excessivos.

Descreve-se, a seguir, o funcionamento e os componentes mais importantes de um sistema de arrefecimento automotivo.

3.1.

Componentes e funcionamento de um sistema de arrefecimento automotivo

Existem dois tipos de sistemas de arrefecimento automotivo: sistemas de arrefecimento por água e por ar. Os sistemas que fazem uso da água podem ser abertos ou fechados, sendo estes últimos os que correspondem ao presente estudo.

O sistema de arrefecimento automotivo a água é formado pelos seguintes componentes principais:

1. Passagens de fluido no bloco de cilindros ou jaqueta do motor.
2. Radiador.
3. Bomba do líquido de arrefecimento.
4. Termostato.

Além destes componentes, também fazem parte do mesmo o ventilador e as mangueiras de conexão. A Figura 6 mostra um esquema do circuito do sistema de arrefecimento automotivo com as partes mencionadas.

O funcionamento do sistema de arrefecimento pode ser descrito da seguinte maneira:

1. O FDA (Fluido de Arrefecimento) é bombeado desde a parte inferior do radiador e forçado a circular ao redor das paredes e do cabeçote.
2. Depois de trocar calor com o bloco de cilindros, o FDA circula através da mangueira superior do radiador e chega até o tanque superior.
3. O FDA é resfriado pelo ar que atravessa a colméia do radiador e desce até a mangueira inferior do radiador.
4. Finalmente, o FDA a baixa temperatura circula da mangueira inferior à bomba para começar um novo ciclo.

Embora seja desejável retirar a maior quantidade de calor residual das partes do motor, com o propósito de melhorar a sua eficiência volumétrica, um excesso de resfriamento pode provocar uma inconveniente mistura de óleo e combustível não vaporizado (Newton e Steeds, 1966). Portanto, somente uma faixa apropriada de temperaturas pode permitir resultados satisfatórios à operação do motor.

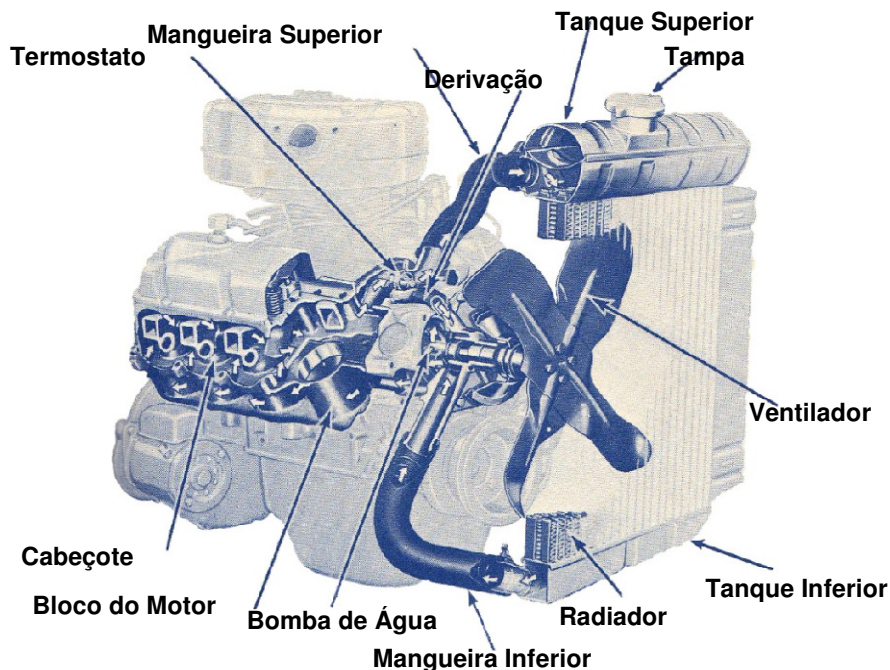


Figura 6 – Vista seccionada de um motor V-8, mostrando o sistema de arrefecimento. As setas brancas indicam o fluxo do FDA através da camisa do motor (Crouse e Anglin, 1977).

Quando o FDA é água, a faixa de temperatura usual está entre 75 °C e 90 °C, com o objetivo de evitar a vaporização do fluido. Com o uso de misturas água – etileno glicol essa faixa de temperaturas pode facilmente superar os 100 °C. Para sistemas pressurizados estes valores sobem.

3.2. O calor no sistema de arrefecimento automotivo

Uma descrição detalhada da distribuição da energia no motor a combustão interna é apresentada por Heywood (1988), mostrando a transformação da energia química do combustível nos diferentes processos de transferência de calor e de realização de trabalho. A Figura 7 apresenta essa distribuição da energia.

Pode-se apreciar que somente uma parte do total da energia da combustão é transferida diretamente ao eixo. Aproximadamente 75 % da energia do combustível são perdidos, sendo os restantes aproveitados na forma de trabalho (Bohacz, 2007).

3.2.1. Balanço de energia

Num balanço energético geral, levando em consideração um volume de controle envolvendo a superfície do motor, a primeira lei da termodinâmica para regime permanente apresenta a seguinte forma (Heywood, 1988):

$$P_b + \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{misc} + \dot{H}_{e,ic} + \dot{m}h_{e,s} = \dot{m}_f Q_{LHV} \quad (3.1)$$

sendo P_b , a potência ao eixo; $\dot{Q}_{cool}$, a taxa de transferência de calor ao FDA; $\dot{H}_{e,ic}$, o fluxo de entalpia nos gases de exaustão devido à combustão incompleta; $\dot{m}h_{e,s}$, o produto da vazão mássica pela entalpia de calor sensível dos gases de escape; $\dot{m}_f Q_{LHV}$, o produto da vazão mássica do combustível pelo poder calorífico inferior.

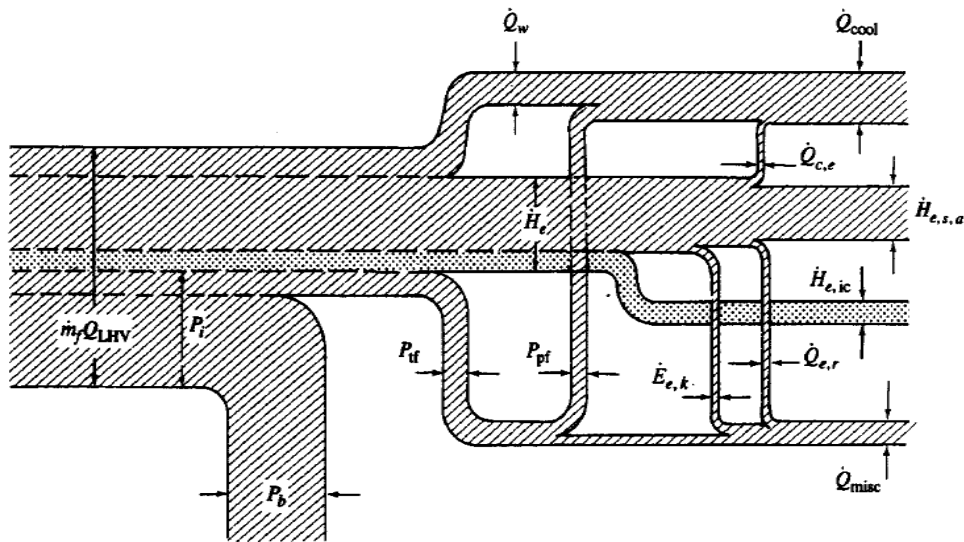


Figura 7 – Diagrama do fluxo de energia para um motor a combustão interna (Heywood, 1988).

Na figura 7 o parâmetro $\dot{m}_f Q_{LHV}$ é o produto da vazão mássica de combustível pelo poder calorífico inferior; $\dot{Q}_w$ é a taxa de transferência de calor às paredes da câmara de combustão; $\dot{H}_e$ é o fluxo de entalpia nos gases de exaustão; P_b é a potência no eixo; P_{tf} é a potência total de atrito; P_i é a potência indicada; P_{pf} é a potência de atrito

no pistão; $\dot{Q}_{cool}$ é a taxa de rejeição de calor ao FDA; $\dot{Q}_{c,e}$ é a taxa de rejeição de calor ao FDA na passagem de exaustão; $\dot{H}_{e,s,a}$ é o fluxo da entalpia de calor sensível dos gases de exaustão jogados na atmosfera; $\dot{H}_{e,i,c}$ é o fluxo na entalpia química dos gases de exaustão devido à combustão incompleta; $\dot{Q}_{e,r}$ é o fluxo de calor por radiação do sistema de escape; $\dot{E}_{e,k}$ é a taxa de variação da energia cinética dos gases de escape e; $\dot{Q}_{misc}$ é a soma das taxas de transferência de calor remanescentes.

3.2.2.

Mecanismos de transmissão de calor no motor a combustão interna

Os mecanismos conhecidos para a transmissão de calor entre dois corpos, entre os quais haja uma diferença de temperatura são: condução, convecção e radiação. Cada um deles ocorre durante a operação do motor, mas, dependendo da localização do processo de troca de calor no mesmo, um pode prevalecer sobre os outros.

A distribuição de temperaturas pode mudar de um ponto ao outro dentro dos componentes do motor, sobretudo nas vizinhanças da câmara de combustão. A Figura 8 mostra as linhas de temperatura constante obtidas por métodos de elementos finitos e um diagrama da porcentagem de fluxo de calor nas partes do pistão (Heywood, 1988).

A transferência de calor por condução pode acontecer em sólidos, líquidos e gases, e resulta da interação entre as partículas adjacentes da substância. Este tipo de transferência de calor ocorre predominantemente através das paredes do bloco de cilindros e dos tubos do radiador.

A transferência de calor por convecção acontece entre um sólido e um líquido escoando sobre a superfície. Este tipo de transferência de calor, no sistema de arrefecimento, se ocorre entre o fluido de arrefecimento, o gás da combustão (no lado da câmara de combustão) ou o ar (no lado do radiador), e as superfícies sólidas do motor.

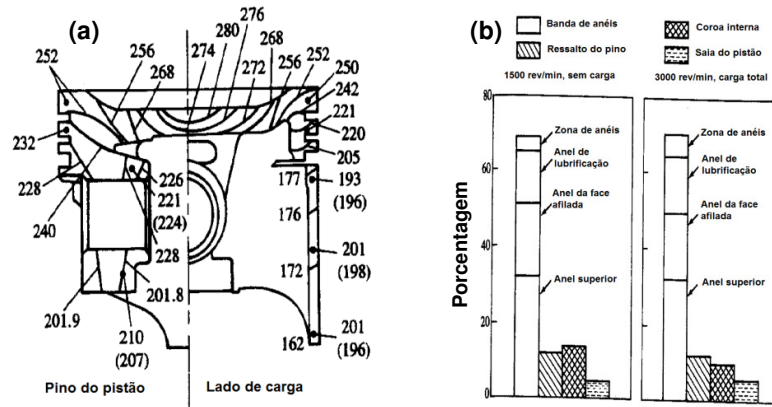


Figura 8 – (a) Distribuição de temperaturas medidas (pontos) e calculadas no pino e no lado de carga do pistão e; (b) Porcentagem do fluxo de calor em diferentes zonas do pistão (Heywood, 1988).

A taxa de transferência de calor, $\dot{Q}$, através da superfície de troca de calor, A , é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o líquido escoando por sobre ela. Segundo a lei de Newton do resfriamento, esta taxa de transferência de calor pode ser expressa como:

$$\dot{Q} = \alpha A (T_w - T_\infty) \quad (3.2)$$

sendo α o coeficiente de troca de calor por convecção, e T_w e T_∞ , as temperaturas da superfície e do fluido, respectivamente.

A radiação é a transmissão de energia em forma de ondas eletromagnéticas através do espaço sem um meio de transmissão. A taxa de transferência calor está relacionada às potências quartas das temperaturas envolvidas e pode ser expressa como (Holman, 1981):

$$\dot{Q} = F_G F_\epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.3)$$

sendo F_G uma função do fator geométrico; F_ϵ , uma função da emissividade; σ , a constante de Stefan – Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$); A , a área de troca de calor e T , a temperatura dos corpos que estão trocando calor.

Este tipo de transferência de calor ocorre através das fronteiras do sistema; mas, a maior quantidade de calor trocada entre o fluido de trabalho e as peças do motor é transmitida por convecção forçada (Taylor, 1971).

3.3.

A camisa de água do motor

As camisas do motor são espaços que circundam a câmara de combustão e às paredes do cilindro, e que permitem ao FDA retirar o excesso de calor do motor (Crouse e Anglin, 1977). Na Figura 9 mostra-se uma seção do bloco de cilindros com as camisas de água do motor.

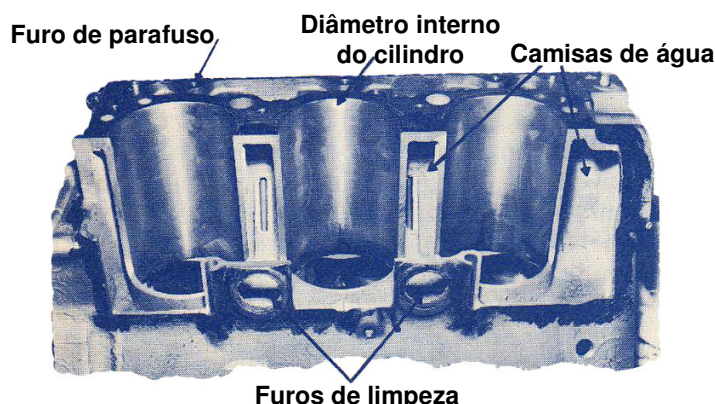


Figura 9 – Vista seccionada do bloco de cilindros de um motor V-6 mostrando as camisas do motor (Crouse e Anglin, 1977).

Um esquema de transferência de calor através das paredes da câmara de combustão é apresentado na Figura 10. A figura apresenta um perfil de temperaturas com $\bar{T}_g$ e $\bar{T}_c$ como as temperaturas médias do gás (no lado do pistão) e do FDA (no lado da camisa do motor). Durante o processo de troca de calor mecanismos de condução, radiação e convecção são considerados.

Durante cada ciclo de operação do motor a transferência de calor é desenvolvida em condições de pressão e temperatura variáveis. Estimativas destes parâmetros são de importância na avaliação do comportamento térmico do motor.

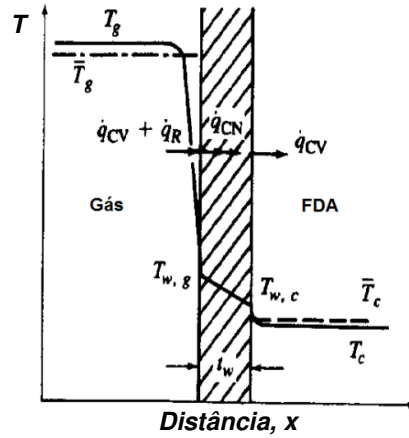


Figura 10 – Fluxo de calor através das paredes da câmara de combustão (Heywood, 1988).

A descrição da transferência de calor entre o gás na câmara de combustão e o FDA pode ser avaliada se for conhecido o coeficiente de troca de calor. Taylor (1971) descreve o coeficiente geral de troca de calor da seguinte maneira:

$$\frac{U_{bc} D_{pst}}{k_g} = 10,4 \left(\frac{G_g D_{pst}}{\mu_g} \right)^{0,75} \quad (3.4)$$

sendo U_{bc} , o coeficiente geral de troca de calor; k_g , a condutividade térmica do gás na câmara de combustão, avaliada a T_g (a temperatura média efetiva do gás); G_g , a velocidade mássica do gás; D_{pst} , o diâmetro do cilindro e; μ_g , a viscosidade do gás medida em T_g .

A eq. (3.4) não leva em consideração os efeitos da composição das misturas do líquido arrefecedor, que podem influenciar na correlação do coeficiente de transferência de calor do FDA. Baseados na equação anterior, Shayler et al. (1996) apresentaram uma correlação que leva em conta tais efeitos:

$$\dot{Q}_m = \frac{U^* (T_g - T_c)}{\left[\left(1 - \frac{\alpha_m}{\alpha_{ref}} \right) - \frac{U^*}{\alpha_m A} + 1 \right]} \quad (3.5)$$

Na eq. (3.5) o parâmetro $\dot{Q}_m$ é a taxa de rejeição de calor do motor considerando os efeitos da composição das misturas do FDA; α_m e α_{ref} são, respectivamente, os coeficientes de transferência de calor do médio arrefecedor misturado (por exemplo, água – etileno glicol) e do FDA de referência (água na correlação de Taylor) e U^* é o produto do coeficiente global de transferência de calor e a área de transferência de calor.

3.4. O radiador automotivo

O propósito dos radiadores automotivos é remover, através da troca de calor com o ar do ambiente, o calor absorvido no motor pelo líquido de arrefecimento (Bohacz, 2007). Geometrias típicas dos radiadores são apresentadas na Figura 11.

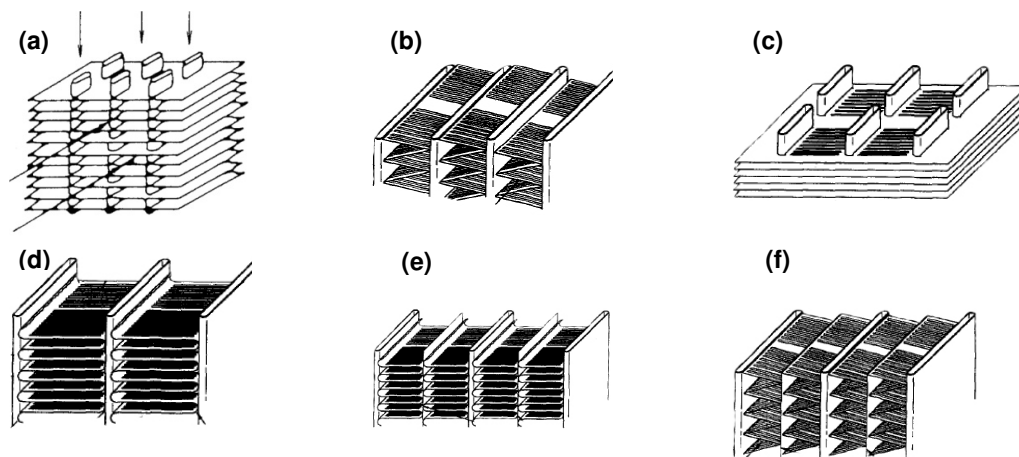


Figura 11 – Geometrias típicas de radiadores automotivos.

Mostram-se na Figura 11(c) os tubos de seção oval com as aletas tipo persiana. Geralmente o menor diâmetro dos tubos de seção “oval” está na faixa de 1,5 mm até 5 mm (Chang e Wang, 1997). Este tipo de tubos nos radiadores automotivos apresenta as seguintes vantagens (Webb e Jung, 1992):

1. O fluxo do ar é normal a todos os canais inclinados (persianas).
2. A esteira de ar, que se produz ao passar deste, na parte posterior dos tubos, não diminui a quantidade de calor trocado.

3. Contem dispositivos turbilhonadores que aumentam a eficiência das aletas.
4. Os tubos de seção “oval” apresentam um menor arrasto aerodinâmico quando comparados com os tubos de seção circular.

Segundo Cowell et al. (1995), os canais inclinados (persianas) nas aletas apresentam as vantagens de incrementar a transferência de calor na superfícies das aletas sem aumentos significativos na perda de carga. A Figura 12 mostra um esquema dos canais inclinados.

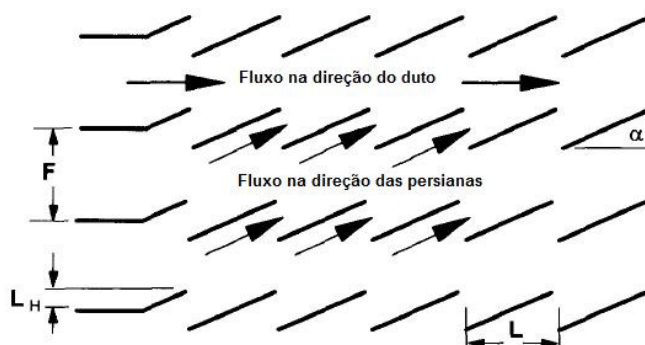


Figura 12 – Seção dos canais inclinados das aletas mostrando os dois tipos de fluxos do ar, através do duto e através dos canais inclinados (Cowell et al., 1995).

3.5.

A bomba do fluido de arrefecimento

A bomba do fluido de arrefecimento, geralmente do tipo centrífuga, faz circular o fluido através das camisas do motor garantindo um resfriamento uniforme (Sen, 1980).

Os componentes básicos de uma bomba são o impulsor e a carcaça. Na seleção destes equipamentos cumpre um papel importante a determinação da velocidade específica de sucção.

A velocidade específica de sucção é um índice usado para calcular a faixa operacional segura de capacidade para uma bomba (Bohacz, 2007). Na Figura 13 (a) mostra-se uma bomba típica de um sistema de arrefecimento automotivo.

Segundo Bohacz (2007), a eficiência de uma bomba é determinada pela quantidade de perdas internas que aumentam o trabalho de bombeamento. A eficiência é o resultado das seguintes perdas:

1. Perdas mecânicas: originadas pelo atrito nos rolamentos e na caixa de enchimento.
2. Atrito do impulsor: é a potência requerida para superar o torque de atrito do impulsor.
3. Vazamentos: entre os componentes móveis e estacionários, como o anel de desgaste, labirinto de selos, selos mecânicos, etc.
4. Perdas hidráulicas: entre o impulsor, a carcaça e o lado da sucção da bomba.

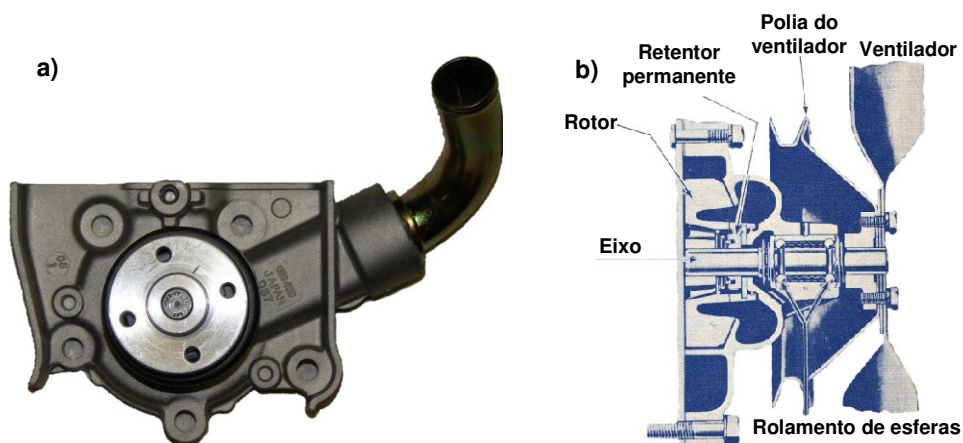


Figura 13 – Bomba do fluido de arrefecimento: (a) marca Daihatsu, 2009 e; (b) vista em seção mostrando o eixo e o rolamento de esferas de fileiras duplas (Crouse e Anglin, 1977).

3.6. O termostato

Como é mostrado na Figura 6, o termostato se posiciona no circuito do sistema de arrefecimento que vai do motor até o radiador, a montante da mangueira superior do radiador.

Segundo Zou et al. (1999), os termostatos automotivos, também conhecidos como válvulas de controle do fluido de arrefecimento, são dispositivos do sistema de arrefecimento que controlam a temperatura de operação do motor.

Um motor frio é prejudicial para o funcionamento normal do mesmo. Nestas condições desgasta-se mais rapidamente e opera de maneira ineficiente. Por isso, e para ter um controle do sistema de arrefecimento, o termostato é usado (Crouse e Anglin, 1977).

Quando a temperatura do FDA é baixa, indicando que o motor está frio, o termostato fecha a passagem até o radiador, permitindo o FDA circular somente no interior do motor. Por exemplo, durante o período inicial de aquecimento do motor “warm-up”, o FDA é mantido escoando somente no bloco de cilindros com o objetivo do motor aquecer mais rapidamente.

Os dois tipos de termostatos usados nos sistemas de arrefecimento automotivo são (Bohacz, 2007):

1. Aneróide: possui um bulbo metálico expansível parcialmente cheio de acetona, álcool ou outro líquido volátil. Quando o fluido atinge a temperatura de evaporação, o líquido no bulbo evapora e fecha a válvula.
2. Hidrostático: o controle da válvula é dado por um elemento carregado com uma substância de elevado coeficiente de expansão térmica. Nos sistemas modernos este tipo de termostato apresenta a vantagem de ser insensível às variações de pressão.

A Figura 14 mostra os tipos de termostatos mencionados: (a) aneróide com a válvula aberta e (b) hidrostático.

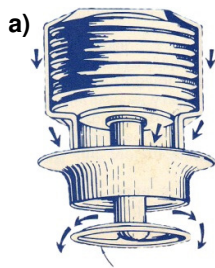


Figura 14 – Tipos de termostato.

3.7. Fluidos de arrefecimento

As temperaturas atingidas pelos gases de combustão (até 2482 °C), mesmo em velocidades moderadas de operação do automóvel, fazem com que as partes lubrificadas como o pistão alcancem temperaturas de pelo menos 93 °C, podendo superar com facilidade o ponto de ebulição da água (Lima e Otterman, 1989).

Segundo Taylor (1971), as contribuições de calor ao líquido de arrefecimento no MCI provêm de:

1. Calor transmitido pelo fluido de trabalho durante a compressão e expansão.
2. Do atrito do pistão com as paredes do cilindro.
3. O calor transmitido à estrutura do cilindro durante o processo de descarga.

Os fluidos envolvidos no processo de troca de calor durante o funcionamento do sistema de arrefecimento automotivo (SAA) são três:

1. Fluido de trabalho, que fornece a energia ao automóvel devido ao ciclo termodinâmico motor.
2. Fluido de arrefecimento (FDA), que retira o calor do bloco do motor e da cabeça dos cilindros, e o transfere até o radiador.
3. Ar, que resfria o FDA no radiador.

As características desejáveis dos fluidos de arrefecimento no sistema de arrefecimento são (Bohacz, 2007):

1. Possuir elevada condutividade térmica e calor específico, para aumentar a troca de calor e a capacidade de transporte de energia térmica.
2. Possuir baixa viscosidade, para diminuir o trabalho de bombeamento.
3. Apresentar baixo potencial para corrosão nas paredes do sistema.
4. Reter mínima quantidade de depósitos.

5. Oferecer lubrificação ao sistema.
6. Apresentar capacidade anticongelante em situações de baixa temperatura.

Segundo Lima e Otterman (1989), os problemas encontrados com o uso da água como fluido de arrefecimento são:

1. Elevada temperatura de congelamento ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$).
2. Baixa temperatura de ebulição ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$).
3. Geração de ferrugem nas partes metálicas do sistema de arrefecimento automotivo.

Soluções de água e etileno glicol são hoje comumente utilizados, com vistas a superar as deficiências acima descritas.

Sem levar em conta os problemas existentes quanto à eventual deposição das nanopartículas, os nanofluidos apresentam-se como uma nova alternativa como FDA, devido principalmente por apresentarem uma elevada condutividade térmica (Choi, 1995).

3.8.

Nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivos

Água, líquidos orgânicos (etileno glicol, trietileno glicol, refrigerantes, entre outros), óleos lubrificantes e soluções poliméricas têm sido utilizados como fluido-base dentro da ampla faixa de aplicação dos nanofluidos (Bandarra Filho et al., 2008).

Os nanofluidos poderiam ser empregados em sistemas de arrefecimento automotivos como fluidos de trabalho, isto é, fluidos de arrefecimento. Trabalhos recentes encontrados na literatura apontando para estas aplicações são descritos a seguir.

Vasu et al. (2008) realizaram uma análise térmica teórica de um radiador automotivo de tubos de seção oval e aletas planas, Figura 15, utilizando o nanofluido $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ como fluido de resfriamento.

O método ε -NTU foi empregado e a condutividade térmica calculada conforme Velagapudi et al. (2008). Comparando os resultados previstos para nanofluidos com os correspondentes à água (fluido convencional de resfriamento do motor) os autores observaram:

1. Um aumento na capacidade de resfriamento com a concentração volumétrica de nanopartículas;
2. Um aumento na queda pressão do lado do líquido com a concentração volumétrica de nanopartículas;
3. Uma melhora do coeficiente global de transferência de calor para maiores vazões do fluido de resfriamento e com o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas.

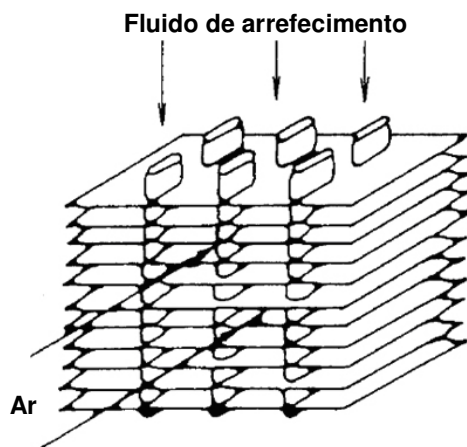


Figura 15 – Estrutura do trocador de calor compacto estudado por Vasu et al. (2008).

Kulkarni et al. (2006) trataram da perspectiva de utilização dos nanofluidos como fluidos de transferência de calor donde, aproveitando a maior condutividade térmica das nanopartículas metálicas, incrementa-se o desempenho térmico da solução, aumentando assim, a efetividade dos trocadores de calor.

Os autores desenvolveram um trabalho experimental sobre as propriedades reológicas resultantes de nanopartículas de óxido de cobre suspensas em uma mistura água – etileno glicol.

A faixa de temperatura dos testes (de -35°C até 50°C) mostra sua aplicabilidade a processos em baixas temperaturas. Durante o período dos testes

conduzidos com nanofluidos não foi observada deposição das nanopartículas nas superfícies.

Segundo os resultados dos trabalhos comentados anteriormente, os nanofluidos apresentam condições para seu uso em sistemas de arrefecimento automotivo, donde as temperaturas podem estar dentro de uma pequena faixa de operação, durante o regime permanente do motor, ou em temperaturas baixas, como as que acontecem durante o arranque do motor, sobretudo em regiões de clima frio.