

6

Métodos de solução

6.1.

Modelo para regime permanente

O conjunto de equações descritas no capítulo 4 forma um sistema não-linear de equações algébricas. Nesta seção descrevem-se a abordagem utilizada e a metodologia de solução do modelo matemático.

A plataforma computacional EES (*Engineering Equation Solver*), que utiliza o método de Newton – Raphson serviu como ferramenta para a simulação do sistema de arrefecimento automotivo proposto operando com nanofluidos como fluidos secundários.

Os objetivos da simulação, conhecidas as características dos componentes do ciclo e as condições nas quais opera, são: a determinação da geometria do trocador de calor, a queda de pressão no lado do FDA, e a potência de bombeamento do FDA.

6.1.1.

Dados de entrada

As variáveis prescritas foram ordenadas em função de seu uso no programa. Assim, têm-se dados de entrada gerais para o programa e dados utilizados para simular cada componente do sistema.

6.1.1.1.

Dados de entrada gerais no programa

1. Seleção do nanofluido.
2. Diâmetro da nanopartícula.
3. Fração volumétrica das nanopartículas.

Enumeram-se, a seguir, os dados de entrada para cada um dos componentes do sistema de arrefecimento automotivo.

6.1.1.2.

Camisa do motor

Diâmetro do pistão, D_{pst} ;
 Curso do pistão, S_{pst} ;
 Número de cilindros, N_{cil} ;
 Potência no eixo do motor, \dot{W} ;
 Rugosidade absoluta das paredes, C_{rg} ;
 Comprimento das tubulações de FDA, L_{tb} ;
 Diâmetro das tubulações, D_{tb}

6.1.1.3.

Radiador

Comprimento do radiador, L_{rd} ;
 Espessura do radiador, D_{rd} ;
 Diâmetro hidráulico no lado do ar, $D_{h,ar}$;
 Diâmetro hidráulico nos tubos de seção oval, $D_{h,nf}$;
 Razão entre a área de troca de calor do ar e o volume total, β_{ar} ;
 Razão entre a área de troca de calor do fluido de arrefecimento e o volume total, β_{nf} ;
 Razão entre a área de fluxo livre-mínima do ar e a área frontal, σ_{ar} ;
 Razão entre a área aletada e a área total de troca de calor para o ar, γ_{ar} ;
 Passo das aletas, F_p ;
 Espessura das aletas, F_{th} ;
 Passo dos tubos de seção oval, T_p ;
 Comprimento dos tubos no sentido do fluxo do ar, T_d ;
 Comprimento dos tubos de seção oval, T_w ;
 Espessura da parede dos tubos de seção oval, T_{th} ;
 Número de tubos de seção oval, N_{tb} ;
 Número de fileiras de tubos, N_{row} ;
 Velocidade de ingresso do ar, u_{fr} ;

Temperatura de ingresso do ar, $T_{ar,i}$;

Pressão do ar, P_{ar} ;

Temperatura de ingresso do fluido arrefecedor, T_q ;

Temperatura de saída do fluido arrefecedor, T_f ;

Pressão do fluido arrefecedor, P_{co} ;

6.1.1.4.

Bomba do fluido de arrefecimento

Eficiência da bomba, η_{bo} ;

6.1.2.

Dados de saída

O programa soluciona o sistema de equações, calculando os seguintes parâmetros:

6.1.2.1.

Camisa do motor

Queda de pressão do fluido de arrefecimento, $\Delta P_{co,bc}$;

Coeficiente de atrito do fluido de arrefecimento, $f_{co,bc}$;

6.1.2.2.

Radiador

Altura do radiador, H_{rd} ;

Área de troca de calor no lado do fluido de arrefecimento, A_{nf} ;

Queda de pressão no fluido de arrefecimento, $\Delta P_{nf,rd}$;

Queda de pressão do ar, ΔP_{ar} ;

Temperatura de saída do ar, $T_{ar,o}$;

Fator de Colburn, j_{ar} ;

Coeficiente de troca de calor do ar, α_{ar} ;

Coeficiente de troca de calor do fluido de arrefecimento, $\alpha_{nf,rd}$;

Número de Reynolds do ar, Re_{ar} ;

Número de Reynolds do fluido de arrefecimento, Re_{nf} ;

Número de unidades de transferência de calor, NTU ;

Efetividade do radiador, ε_{rd} ;

Coeficiente geral de troca de calor, U_{rd} ;

Fator de atrito do ar, f_{ar} ;

Fator de atrito do fluido de arrefecimento, $f_{nf,rd}$;

6.1.2.3.

Bomba do fluido de arrefecimento

Potência de bombeamento do fluido de arrefecimento, \dot{W}_{bo} ;

6.1.3.

Plataforma computacional

Para garantir a solução das equações propostas para a caracterização do nanofluido como fluido secundário, utilizou-se a plataforma computacional EES (Klein, 2004), capaz de resolver sistemas de equações algébricas não-lineares.

Entre as principais características que o EES possui podem-se enumerar:

1. Identificação automática e agrupamento de equações que devem ser solucionadas simultaneamente;
2. Disponibilidade de bibliotecas embutidas para o cálculo de propriedades termofísicas, de grande ajuda na resolução de problemas da área térmica.
3. Possibilidade de interação com o REFPROP (Lemmon et al., 2007) desenvolvido no NIST (National Institute of Standards and Technology), dispositivo não acionado no presente trabalho;
4. Procedimentos, funções e sub-rotinas podem ser escritas de forma similar a plataformas de programação de alto nível, tais como Pascal e FORTRAN. Em princípio, códigos escritos nestas linguagens de alto nível poderiam ser adaptados ao EES.

O software EES utiliza, para a solução de sistemas de equações não lineares, o método de Newton – Raphson para múltiplas variáveis. Este método constitui um caso particular do método de iteração linear.

O método de Newton – Raphson para uma variável é representado matematicamente pelas eq. (5.11) e (5.12). Observa-se que o procedimento é iterativo, ou seja, obtém-se uma fórmula recursiva que calcula uma aproximação, aperfeiçoada a partir da aproximação precedente.

Os valores das derivadas nestes pontos são utilizados para produzir uma sequência de pontos que convergem para a raiz desejada.

$$\varphi(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (5.11)$$

A fórmula recursiva do método de Newton – Raphson é:

$$x_{n+1} = \varphi(x_n) \quad (5.12)$$

A convergência do processo iterativo nem sempre está garantida por este método, sendo necessário o cumprimento das seguintes condições para a convergência do mesmo:

1. Existência de apenas uma raiz no intervalo [a, b] onde se deseja obter a raiz;
2. Que a primeira e segunda derivadas sejam não-nulas e preservem o sinal no intervalo [a, b];
3. Que a derivada da função no ponto x_n seja diferente de zero.

A Figura 19 apresenta a interpretação geométrica do Método de Newton – Raphson.

6.1.4. Desenvolvimento do código

O programa desenvolvido no presente trabalho adota uma forma modular, com módulos dedicados à jaqueta de cilindros, radiador, bomba do fluido de arrefecimento, e termostato, respectivamente. Assim, cada componente pode ser

avaliado individualmente de acordo com o modelo matemático selecionado na literatura para descrevê-lo.

Utilizando o programa EES foram determinados, simultaneamente, os dados intermediários que interconectam dois componentes sucessivos. Portanto, qualquer mudança em um dos componentes influencia o desempenho do ciclo assim como o resto dos componentes.

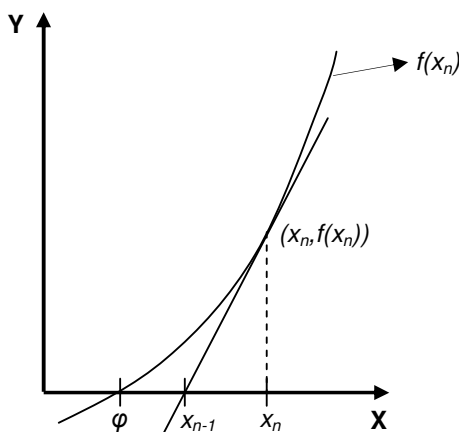


Figura 19 – Interpretação gráfica do método de Newton – Raphson (Kelley, 2003).

6.1.5. Estrutura do programa

O programa principal foi organizado seguindo uma ordem sequencial, com a execução evoluindo na medida em que o sistema de arrefecimento vai sendo resolvido. Assim, a ordem geral que segue o programa é:

1. Jaqueta do motor;
2. Radiador;
3. Bomba do fluido de arrefecimento.

Os comandos de cálculo de cada componente estão organizados da seguinte forma:

1. Entrada das condições de operação;
2. Cálculo das propriedades termodinâmicas;

3. Execução das equações como parte do modelo matemático do componente;
4. Produção de resultados (intermediários ou finais).

6.2.

Solução numérica do modelo do regime transiente

Considera-se uma condição inicial de partida a frio pela qual: $T_{bc} = T_{nf} = T_0$. Utilizou-se o método de Euler para as equações (5.5) e (5.7). O método de Euler permite aproximar uma equação diferencial ordinária a partir de somas algébricas na seguinte forma:

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} \quad (5.13)$$

Os valores das derivadas são obtidos a partir de incrementos sucessivos a partir de uma condição inicial dada. Na Figura 20 mostra-se o esquema gráfico do processo de solução do método numérico de Euler.

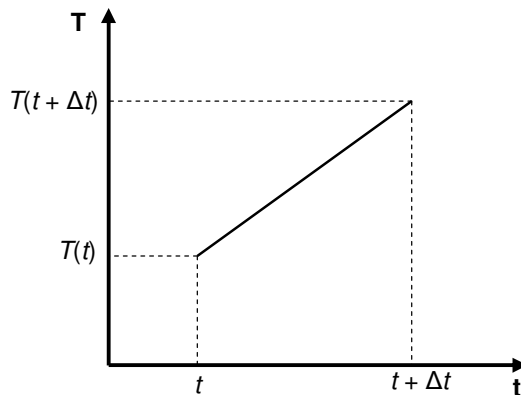


Figura 20 – Esquema do processo de cálculo pelo método de Euler.

Utilizou-se no presente estudo, um incremento de 1s. A mesma plataforma computacional, EES, foi utilizada.