



Edwin Ronald Valderrama Campos

**Modelagem do Uso de Nanofluidos no Sistema de
Arrefecimento de Motores a Combustão Interna**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Alberto dos Reis Parise
Co-Orientador: Dr. Frank Chaviano Pruzaesky



Edwin Ronald Valderrama Campos

Modelagem do Uso de Nanofluidos no Sistema de Arrefecimento de Motores a Combustão Interna

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Frank Chaviano Pruzaesky

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Carlos Eduardo Leme Nóbrega

CEFET/RJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de outubro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Edwin Ronald Valderrama Campos

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Dpto. De Engenharia Mecânica da UNT (Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo – Perú) em 2006.

Ficha Catalográfica

Campos, Edwin Ronald Valderrama

Modelagem do uso de nanofluidos no sistema de arrefecimento de motores a combustão interna / Edwin Ronald Valderrama Campos; orientadores: José Alberto dos Reis Parise, Frank Chaviano Pruzaesky. – 2009.

97 f.: il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Nanofluidos. 3. Motor de combustão interna. 4. Fluido de arrefecimento. 5. Radiador automotivo. 6. Arrefecimento de motor. 7. Bomba de líquido. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Pruzaesky, Frank Chaviano. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, e aos meus amigos Jose e Sara.

Agradecimentos

A Deus por cada novo dia.

Aos meus orientadores, Professor José Alberto dos Reis Parise, e Doutor Frank Chaviano Pruzaesky, por sua dedicação, confiança e amizade concedida ao longo do curso.

Ao Professor Sergio Libanio do CEFET-RJ pelo seu apoio durante a realização do presente trabalho.

Ao colega Juan Carlos Valdez Loaiza pela ajuda na elaboração do documento final.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pelos ensinamentos que contribuíram à minha formação.

Aos colegas e funcionários pela hospitalidade e apoio.

A todos os amigos que, com seu apoio e amizade, contribuíram para que minha permanência no Brasil seja muito agradável.

Finalmente, minha gratidão ao CNPq e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Campos, Edwin Ronald Valderrama; Parise, José Alberto dos Reis; Pruzaesky, Frank Chaviano. **Modelagem do Uso de Nanofluidos no Sistema de Arrefecimento de Motores a Combustão Interna**. Rio de Janeiro, 2009. 97p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estudou-se a aplicação de nanofluidos no sistema de arrefecimento de motores a combustão interna. Nanofluidos são suspensões de partículas de diâmetro menor que 100 nm em fluidos convencionais de troca de calor, tais como água, óleo, etileno glicol, entre outros. Devido às suas características favoráveis de transferência de calor, em função da suspensão de partículas, metálicas ou não metálicas, com elevada condutividade térmica, nanofluidos têm sido considerados para atuar como fluidos térmicos em diferentes aplicações. Desenvolveram-se modelos matemáticos para operação em regime permanente, na avaliação do efeito das características térmicas e hidráulicas do escoamento do nanofluido nos componentes do sistema de arrefecimento; e em regime transiente, na avaliação do processo de aquecimento do motor. Fez-se uso do pacote EES para a simulação e consideraram-se os seguintes componentes do sistema de arrefecimento automotivo: radiador, camisas do bloco de cilindros, termostato e bomba do líquido de arrefecimento. Foram empregados o método dos parâmetros concentrados e o método ϵ -NTU para a modelagem global do sistema monofásico. Diferentes tipos de nanofluidos, com variações na concentração volumétrica de nanopartículas, foram considerados na avaliação desta alternativa em fluidos térmicos visando aplicações automotivas.

Palavras-chave

Nanofluidos; Motor de Combustão Interna; Fluido de Arrefecimento; Radiador Automotivo; Arrefecimento do Motor; Bomba de Líquido.

Abstract

Campos, Edwin Ronald Valderrama; Parise, José Alberto dos Reis (Advisor); Pruzaesky, Frank Chaviano. **Modeling of the use of nanofluids in internal combustion engines cooling systems.** Rio de Janeiro, 2009. 97p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The application of nanofluids in cooling systems of internal combustion engines was studied. Nanofluids consist of nanoparticles (with dimension below 100 μm) suspended in traditional heat transfer fluids, such as water or ethylene glycol. Given their favourable heat transfer characteristics, because of the suspension of high thermal conductivity particles, metallic or non-metallic, nanofluids have been considered as potential substitutes for conventional heat transfer fluids. Mathematical models were developed for steady-state operation, for the evaluation of thermal and hydraulic behavior of the cooling system, and for transient regime, for the assessment of the engine start-up process. The EES software was employed for the simulation. The following components of the cooling system were considered: radiator, engine cooling jackets, thermostat and coolant pump. Lumped parameter analysis and the effectiveness-NTU method were used for the single-phase system simulation. Different types of nanofluids, with variation on the volume fraction, were considered in this study.

Keywords

Nanofluids; Internal Combustion Engine; Coolant; Automotive Radiator; Engine Cooling; Coolant Pump.

Sumário

Lista de Símbolos	15
1 Introdução	19
1.1. Objetivo	19
1.2. Justificativa	19
1.3. Contribuição do presente trabalho	21
1.4. Conteúdo do trabalho	21
2 Uma breve revisão sobre nanofluidos	22
2.1. Produção de nanopartículas e nanofluidos	23
2.2. Propriedades dos nanofluidos	27
2.2.1. Condutividade térmica efetiva	27
2.2.2. Viscosidade dinâmica	30
2.2.3. Densidade e calor específico	32
3 Estado da arte do sistema de arrefecimento automotivo	33
3.1. Componentes e funcionamento de um sistema de arrefecimento automotivo	34
3.2. O calor no sistema de arrefecimento automotivo	35
3.2.1. Balanço de energia	36
3.2.2. Mecanismos de transmissão de calor no motor a combustão interna	37
3.3. A camisa de água do motor	39
3.4. O radiador automotivo	41
3.5. A bomba do fluido de arrefecimento	42
3.6. O termostato	43
3.7. Fluidos de arrefecimento	45
3.8. Nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivos	46
4 Modelo matemático do sistema de arrefecimento de um motor a	

combustão interna	49
4.1. Descrição do sistema proposto	49
4.2. Equações de conservação	50
4.2.1. Jaqueta do motor	51
4.2.2. Radiador	52
4.2.3. Bomba do fluido de arrefecimento	53
4.3. Modelo matemático das jaquetas do motor	53
4.4. Modelo matemático do radiador	54
4.4.1. Taxa de transferência de calor	55
4.4.2. Coeficiente convectivo de troca de calor do ar	57
4.4.3. Coeficiente convectivo de troca de calor do fluido de resfriamento	59
4.4.4. Queda de pressão no lado do ar	62
4.4.5. Queda de pressão no lado do fluido de resfriamento	62
4.4.6. Potência de bombeamento do fluido de resfriamento	63
5 Modelo do regime transiente durante o aquecimento de um motor a combustão interna	64
5.1. Descrição do sistema para o regime transiente	64
5.2. Desenvolvimento do modelo do regime transiente	66
5.2.1. Sistema: fluido de arrefecimento	66
5.2.2. Sistema: bloco do motor	67
6 Métodos de solução	69
6.1. Modelo para regime permanente	69
6.1.1. Dados de entrada	69
6.1.2. Dados de saída	71
6.1.3. Plataforma computacional	72
6.1.4. Desenvolvimento do código	73
6.1.5. Estrutura do programa	74
6.2. Solução numérica do modelo do regime transiente	75
7 Resultados do modelo do sistema de arrefecimento do motor de combustão interna	76

7.1. Propriedades termofísicas	79
7.1.1. Densidade efetiva	79
7.1.2. Calor específico efetivo	79
7.1.3. Viscosidade dinâmica	80
7.1.4. Condutividade térmica efetiva	82
7.2. Resultados para o radiador	82
7.2.1. Número de Nusselt do nanofluido	83
7.2.2. Coeficiente de troca de calor	83
7.2.3. Área requerida de transferência de calor	85
7.2.4. Altura do radiador	86
7.3. Bomba do fluido de arrefecimento	86
7.3.1. Queda de pressão	87
7.3.2. Potência de bombeamento	87
7.4. Resultados do modelo do regime transiente	89
8 Conclusões e recomendações	91
Referências bibliográficas	93

Lista de figuras

Figura 1 – Condutividade térmica de algumas substâncias com respeito à condutividade térmica da água, baseado em Wang e Mujumdar (2008).	22
Figura 2 – Sistema de produção de nanopartículas pelo método de fase gasosa incrementado por plasma (Hosokawa et al., 2007).	24
Figura 3 – Nanopartículas de 79% Al ₂ O ₃ – 21% SiO ₂ (Hosokawa et al., 2007).	25
Figura 4 - Esquema da produção de nanofluidos por evaporação – condensação de vapor metálico (Choi e Eastman, 2001).	26
Figura 5 – Esquema do homogenizador de alta pressão para a produção de nanofluidos em dois passos (Hwang et al., 2008).	26
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).	35
Figura 7 – Diagrama do fluxo de energia para um motor a combustão interna (Heywood, 1988).	36
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).	38
Figura 9 – Vista seccionada do bloco de cilindros de um motor V-6 mostrando as camisas do motor (Crouse e Anglin, 1977).	39
Figura 10 – Fluxo de calor através das paredes da câmara de combustão (Heywood, 1988).	40
Figura 11 – Geometrias típicas de radiadores automotivos.	41
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).	42
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).	43

Figura 14 – Tipos de termostato.	44
Figura 15 – Estrutura do trocador de calor compacto estudado por Vasu et al. (2008).	47
Figura 16 – Esquema simplificado do sistema de arrefecimento do motor de combustão interna.	49
Figura 17 – Esquema do radiador e o sentido dos fluxos, cruzados e não misturados, envolvidos no processo de troca de calor.	55
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).	65
Figura 19 – Interpretação gráfica do método de Newton – Raphson (Kelley, 2003).	74
Figura 20 – Esquema do processo de cálculo pelo método de Euler.	75
Figura 21 – Densidade efetiva dos nanofluidos para várias concentrações de nanopartículas com diâmetro $d_{np} = 10$ nm operando a 89 °C.	80
Figura 22 – Calor específico efetivo dos nanofluidos para diferentes frações volumétricas de nanopartículas com diâmetro $d_{np} = 10$ nm e operando a 89 °C.	81
Figura 23 – Viscosidade dinâmica efetiva para várias concentrações de nanopartículas com um diâmetro $d_{np} = 10$ nm e operando a 89 °C.	81
Figura 24 – Condutividade térmica efetiva para diferentes frações volumétricas de nanopartículas, com um diâmetro $d_{np} = 10$ nm e operando a 89 °C.	82
Figura 25 – Número de Nusselt do nanofluido escoando nos tubos de seção alongada em função da concentração volumétrica de nanopartículas com diâmetro $d_{np} = 10$ nm e operando a 89 °C.	83
Figura 26 – Coeficiente de troca de calor para diferentes concentrações de nanopartículas, a uma temperatura de operação de 89 °C, e um diâmetro de nanopartículas $d_{np} = 10$ nm.	84
Figura 27 – Área de transferência de calor no lado interno dos tubos de seção oval do radiador para diferentes concentrações, a uma	

temperatura de operação de 89 °C, e para um diâmetro de partículas $d_{np} = 10$ nm.	85
Figura 28 – Altura do radiador para diferentes concentrações de nanopartículas, para uma temperatura de operação de 89 °C e um diâmetro de partículas $d_{np} = 10$ nm.	86
Figura 29 – Queda de pressão dos nanofluidos em função da concentração volumétrica das nanopartículas, a uma temperatura de operação de 89 °C e um diâmetro de partículas $d_{np} = 10$ nm.	87
Figura 30 – Potência de bombeamento do nanofluido a diferentes concentrações volumétricas, a uma temperatura de operação de 89 °C, e um diâmetro de nanopartículas $d_{np} = 10$ nm.	88
Figura 31 – Efeito da concentração das nanopartículas sobre a potência de bombeamento para nanofluido de alumina (Ben Mansour et al., 2007).	89
Figura 32 – Aumento da temperatura do FDA durante o período de aquecimento do motor (termostato fechado) para o nanofluido H ₂ O – Cu e água.	90
Figura 33 – Aumento da temperatura do FDA durante o período de aquecimento do motor (termostato fechado) para o nanofluido H ₂ O – Al ₂ O ₃ e água.	90

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valor da constante c da eq. (2.7) para diferentes nanofluidos (Velagapudi, V. et al., 2008).	30
Tabela 2 – Propriedades termofísicas das nanopartículas, (Velagapudi, V. et al., 2008).	77

Lista de Símbolos

Símbolos gerais

A	Área, [m ²]
A_c	Área de fluxo-livre mínima no lado do ar do radiador, [m ²]
A_{fr}	Área frontal do radiador, [m ²]
A_r	Razão de aspecto dos tubos de seção alongada ($A_r = T_w/T_d$), [-]
A_{tb}	Área da seção transversal dos tubos de seção alongada, [m ²]
A_w	Área média de troca de calor nos tubos de seção alongada, [m ²]
b	Comprimento médio da distância entre aletas, [m]
C	Taxa de capacidade térmica ($\dot{m} c_p$), [kW/K]
c_p	Calor específico a pressão constante, [kJ/kg·K]
C_r	Razão das taxas de capacidade térmicas ($C_r = C_{min}/C_{max}$), [-]
D_h	Diâmetro hidráulico, [m]
D_{pst}	Diâmetro do pistão, [m]
D_{rd}	Espessura do radiador, [m]
D_{tb}	Diâmetro das tubulações, [m]
f	Fator de atrito de Fanning, [-]
F	Razão de combustível – ar, [-]
F_d	Comprimento das aletas no sentido do fluxo do ar, [mm]
F_e	Eficiência de fluxo, [-]
F_l	Comprimento das aletas, [mm]
F_p	Passo das aletas, [mm]
F_{th}	Espessura das aletas, [mm]
G	Velocidade mássica, [kg/m ² -s]
H_{rd}	Altura do radiador, [m]
j	Fator de Colburn ($j = \alpha/Gc_p$), [-]
k	Condutividade térmica, [kW/m·K]
L_l	Comprimento dos louvers, [m]
L_p	Passo dos louvers, [m]

L_{rd}	Comprimento do radiador, [m]
L_{tb}	Comprimento das tubulações, [m]
m	Parâmetro da eficiência da aleta, [m ⁻¹]
\dot{m}	Vazão mássica, [kg/s]
N_{tb}	Número de tubos no radiador, [-]
NTU	Unidades de transferência de calor, [-]
Nu	Número de Nusselt, [-]
P	Pressão, [kPa]
Pr	Número de Prandtl, [-]
\dot{Q}	Calor fornecido ao sistema de arrefecimento, [kW]
Re	Número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico, [-]
S_{pst}	Curso do pistão, [m]
S_1	Comprimento dos louver de entrada e saída, [m]
S_2	Comprimento do louver defletor, [m]
T	Temperatura, [°C]
T_d	Comprimento dos tubos no sentido do fluxo do ar, [m]
T_f	Temperatura fria do fluido de arrefecimento, [°C]
T_g	Temperatura média efetiva do gás, [°C]
T_p	Passo dos tubos de seção alongada, [m]
T_q	Temperatura quente do fluido de arrefecimento, [°C]
T_{th}	Espessura da parede dos tubos de seção alongada, [m]
T_w	Comprimento dos tubos de seção alongada, [m]
U	Coefficiente geral de transferência de calor, [kW/m ² ·K]
u_c	Velocidade na área de fluxo-livre mínima, [m/s]
u_{fr}	Velocidade frontal do ar, [m/s]
U_{nf}	Velocidade do nanofluido, [m/s]
\dot{W}	Potência de bombeamento, [kW]

Símbolos gregos

α	Coefficiente de troca de calor, [kW/m ² ·K]
β	Razão entre a área total de troca de calor de um lado só e o volume total do radiador, [m ² /m ³]

γ	Razão entre a área aletada de um lado só e a correspondente área total de troca de calor, [-]
Δ	Diferença
ε	Efetividade, [-]
η	Eficiência, [-]
μ	Viscosidade dinâmica, [Pa·s]
ρ	Densidade, [kg/m ³]
σ	Razão entre a área de fluxo-livre mínima e a área frontal do radiador ($\sigma=A_o/A_{fr}$), [-]
ν	Viscosidade cinemática ($\nu =\mu/\rho$), [m ² /s]
ζ	Difusividade térmica ($\zeta =k/\rho c_p$), [m ² /s]

Símbolos subscritos

<i>o</i>	Geral
<i>ar</i>	Ar
<i>bc</i>	Bloco do motor
<i>f</i>	Aleta
<i>fb</i>	Fluido base
<i>fd</i>	Completamente desenvolvido
<i>i</i>	Ingresso
<i>lam</i>	Regime laminar
<i>m</i>	Média
<i>max</i>	Máxima
<i>min</i>	Mínima
<i>nf</i>	Fluido de arrefecimento (nanofluido)
<i>o</i>	Saída
<i>rd</i>	Radiador
<i>turb</i>	Regime turbulento
<i>wall</i>	Parede dos tubos de seção alongada no radiador

“Ciência é duvidar da autoridade dos especialistas”

Richard Feynman (Nobel de Física, 1965)