



**Yipsy Roque Benito**

## **Aplicação de nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração**

### **Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Alberto dos Reis Parise  
Co-orientador: Prof. José Viriato Coelho Vargas

Rio de Janeiro

Maio de 2012

**Yipsy Roque Benito**

**Aplicação de nanofluidos em sistemas  
secundários de refrigeração**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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. José Viriato Coelho Vargas**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – UFPR

**Prof. Alcir de Faro Orlando**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Eduardo Leme Nóbrega**

Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET/RJ

**Prof. Carlos Valois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Enio Pedone Bandarra Filho**

Faculdade de Engenharia Mecânica - UFU

**Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz**

Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ

**Prof. Sergio Leal Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 4 de maio de 2012

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

### **Yipsy Roque Benito**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, em 1998. Possui Mestrado em Engenharia Mecânica, na área de concentração Petróleo e energia, pela PUC-Rio (2007). Atua na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Refrigeração e Aproveitamento da Energia. Tem trabalhado em análises de sistemas energéticos.

### Ficha Catalográfica

Benito, Yipsy Roque

Aplicação de nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração / Yipsy Roque Benito; orientadores: José Alberto dos Reis Parise, José Viriato Coelho Vargas. – 2012.

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

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui bibliografia

Engenharia Mecânica – Teses. 2. Nanofluido. 3. Sistema indireto de refrigeração. 4. Coeficiente estrutural. 5. Análise termoeconômica. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD:621

Para mi abuela Concha,  
que acreditaba que doctorado era cosa de Medicina.

## Agradecimentos

Às agências CNPq e FAPERJ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu orientador, Prof. José Alberto dos Reis Parise, por todos os ensinamentos e pelos desafios colocados, os quais foram, sem dúvidas, incentivos para o crescimento.

Ao meu co-orientador, Prof. José Viriato Coelho Vargas, pelo apoio e estímulo.

Ao Jesús Betancourt Mena, professor, colega e, uma vez mais, tutor alternativo.

Ao meu pai, Pablo Roque Diaz, por me apontar os caminhos na vida e na engenharia.

À minha mãe, Margot Benito Blanco por ser motivo constante de inspiração por sua força e sua beleza.

À professora Irenia Gallardo, pelas oportunas colaborações.

Aos colegas da PUC-Rio: Frank, Paul, Isela, Minchola, Jubs, Jujú, Edwin e Marcos pelos ricos debates e as contribuições inapreciáveis ao presente trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Máquinas Hidráulicas, na UFPR, pela colaboração no levantamento dos dados experimentais.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pela ajuda em momentos cruciais.

Aos amigos daqui e aos de Santa Clara, em especial a Lisbet, pela presença, pela paciência e pelo carinho.

À Xenia, que por muitas razões não pode estar ausente destes agradecimentos.

Ao Pedro Rocha de Oliveira, companheiro da minha vida, por isso e por aprender direitinho o ciclo de refrigeração.

## Resumo

Benito, Yipsy Roque; Parise, José Alberto dos Reis. **Aplicação de nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração**. Rio de Janeiro, 2012. 172p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É estudada a aplicação de nanofluidos como fluidos secundários em sistemas de refrigeração por compressão de vapor mediante o desenvolvimento de um modelo termodinâmico de parâmetros concentrados. Quando um nanofluido é usado como fluido térmico, sua condutividade e viscosidade aumentam com respeito às propriedades do fluido base correspondente. Como consequência, a irreversibilidade por transferência calor diminui enquanto que a por atrito aumenta. É aplicado o método dos coeficientes estruturais para determinar o efeito da concentração de nanopartículas no fluido secundário na irreversibilidade global do sistema, levando em consideração as inter-relações da estrutura analisada. Para estimar os limites práticos da redução da irreversibilidade térmica com o uso de nanofluidos é proposta uma otimização do custo operacional, a partir de análise termoeconômica, considerando a aplicação do novo fluido secundário no sistema, sem nenhuma outra modificação no mesmo. A partir do modelo proposto, verificado com dados experimentais do ciclo de refrigeração, simulou-se um caso particular de operação. Mediante uma otimização parcial, foi determinado o ponto de mínimo custo operacional, com a simples variação da concentração volumétrica de nanopartículas. Os resultados das otimizações fornecem diferentes valores da concentração ótima para diferentes cenários, caracterizados por vários comprimentos equivalentes do circuito secundário e diversos tempos de operação anual. Adicionalmente, o trabalho inclui um estudo sobre a aplicação de nanofluidos em um evaporador de casco e tubo, o qual foi simulado a partir de um modelo termodinâmico detalhado. Dados experimentais foram levantados para validar o modelo.

## Palavras-chave

Nanofluido; sistema indireto de refrigeração; coeficiente estrutural; análise termoeconômica

## Abstract

Benito, Yipsy Roque; Parise, José Alberto dos Reis (Advisor). **Application of nanofluids in secondary refrigeration systems**. Rio de Janeiro, 2012. 172p. Dsc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The application of nanofluids as secondary fluids in vapor compression refrigeration systems is studied with the development of a lumped-parameter thermodynamic model. When a nanofluid is used as a heat transfer fluid, its thermal conductivity and viscosity increase, when compared with the corresponding properties of the base fluid. The irreversibilities due to heat transfer and due to friction decrease and increase, respectively. After irreversibility is calculated for each component, the method of structural coefficients of internal bonds is applied to determine the effect of the volumetric concentration of nanoparticles in the secondary fluid on the system's global irreversibility, taking into account the interrelations of the analyzed structure. To estimate the practical limits of thermal irreversibility reduction with nanofluid application, an optimization of operational cost was proposed, based on thermoeconomic analysis, and considering the application of the new secondary fluid on the system, without additional modifications. Based on the proposed model, which was verified by experimental data, an typical operation condition was simulated. Through partial optimization, the minimum operational cost is determined for a simple variation of volumetric concentration of nanoparticles. The results of the optimizations furnish different optimal concentration values for different scenarios. Additionally, an study of nanofluid application in a shell and tube evaporator was included. The evaporator was simulated from a detailed thermodynamic model. Experimental data were collected to validate the model.

## Keywords

Nanofluid; indirect vapor compression refrigeration systems; structural coefficient; thermoeconomic analysis

## Sumário

1. Introdução	22
1.1 Sistemas indiretos e nanofluidos	22
1.2 Estado da arte	24
1.2.1 Nanofluidos: visão geral	25
1.2.2 Critérios de avaliação	26
1.2.3 Aplicações como fluidos térmicos	27
1.2.4 Nanofluidos como fluidos secundários em refrigeração	28
1.2.5 Nanofluidos em sistemas	29
1.3 Justificativa e contextualização	29
1.4 Metodologia	30
1.5 Objetivos da tese	32
1.6 Organização do trabalho	32
2. Mecânica dos fluidos, transferência de calor e termodinâmica aplicadas a nanofluidos	34
2.1 Modelo de transporte térmico em nanofluidos	34
2.1.1 Propriedades	34
2.1.1.1 Massa específica	35
2.1.1.2 Calor específico	35
2.1.1.3 Condutividade térmica	35
2.1.1.4 Viscosidade dinâmica em nanofluidos	38
2.1.2 Números adimensionais	44
2.2 Transferência de calor por convecção forçada em nanofluidos	44
2.2.1 Investigações teóricas	45
2.2.2 Correlações experimentais	47
2.3 Queda de pressão em nanofluidos	49
2.4 Exergia do nanofluido	52
2.4.1 Exergia de uma corrente de nanofluido	52
2.4.1.1 Entalpia e entropia específicas de um nanofluido	53
2.4.1.3 Exergias química e física dos nanofluidos	55
2.5 Nanofluidos em trocadores de calor	56
3. Modelagem do uso de nanofluidos como fluidos secundários na refrigeração por compressão de vapor	58
3.1. Descrição do sistema de refrigeração por compressão de vapor	58



3.2. Ciclo termodinâmico	59
3.3. Sistema indireto de refrigeração	61
3.4. Irreversibilidade	63
3.4.1. Irreversibilidade devido à queda de pressão	64
3.4.2. Irreversibilidade devido uma diferença finita de temperaturas	65
3.4.3. Irreversibilidade total em um trocador de calor	66
3.5. Modelo matemático	68
3.5.1 Hipóteses simplificadoras	68
3.5.2 Balanços de energia e exergia dos componentes do ciclo	69
3.5.2.1 Compressor	70
3.5.2.2 Trocadores de calor	72
3.5.2.3 Modelo geral da bomba de líquido do circuito secundário	78
3.5.2.4 Modelo geral do dispositivo de expansão	78
3.5.2.5 Balanço global de energia	79
3.5.2.6 Análise exérgica do sistema indireto de refrigeração	79
3.5.3.1 Balanços exérgicos dos sub-sistemas	81
3.5.3.2 Irreversibilidade dos trocadores do circuito secundário	83
3.5. Indicadores térmicos de desempenho global para o sistema indireto de refrigeração	84
3.5.1 Coeficiente de desempenho: COP	84
3.5.2 Eficiência racional	85
4. Análise termoeconômica	86
4.1. Otimização	86
4.2. Coeficientes estruturais	87
4.3. Procedimento para a otimização termoeconômica pelo método dos coeficientes estruturais	89
4.4. Otimização termoeconômica de sistemas indiretos de refrigeração com trocadores de calor que usam nanofluidos	90
4.4.1 Variáveis de decisão	90
4.4.2 Irreversibilidade do subsistema k da planta em função da variável de decisão	91
4.4.3 Variação da taxa de irreversibilidade do trocador secundário com a variação da variável de decisão	92
4.4.4 Definição da irreversibilidade total da planta em função da variável de decisão e sua derivada	92
4.4.5 Coeficiente estrutural	93
4.4.6 Custos	94
5 Simulação	97

5.1 Modelo matemático	97
5.2 Solução numérica	97
5.3 Validação do modelo do ciclo termodinâmico com dados experimentais	99
5.4 Estudo de caso	101
5.4.1 Resultados da simulação	103
5.4.2 Análise econômica	115
5.4.2.1 Custos monetários	116
5.4.2.2 Otimização termoeconômica	118
5.5 Incertezas da simulação e da otimização	123
6 Simulação de um evaporador casco-e-tubo (em posição vertical e com fluido ascendente) esfriando um nanofluido	125
6.1 Introdução	125
6.2 Modelo	126
6.2.1 Hipóteses simplificadoras	127
6.2.2 Equações de balanço e troca de calor	128
6.2.3 Determinações do coeficiente de transferência de calor por convecção no interior dos tubos	129
6.2.3.1 Região bifásica	130
6.2.3.1.1 Modelo para escoamento em ebulição	130
6.2.3.1.2 Modelo para a região após a secagem de parede	131
6.2.3.2 Zona de vapor superaquecido	132
6.2.4 Determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção no lado do casco	132
6.2.5 Queda de pressão pelo lado do casco	133
6.3 Solução numérica	135
6.3.1 Metodologia	135
6.3.2 Simulação	137
6.3.3 Dados de entrada	138
6.3.4 Resultados	139
6.3.4.1 Comparação com dados experimentais	139
6.3.4.2 Estudo do evaporador operando com nanofluido de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$	143
6.4 Análise de resultados	144
7. Conclusões	149
7.1 Conclusões	149
7.2 Recomendações para trabalhos futuros	152
8. Referências bibliográficas	153
Apêndice	168

## Lista de figuras

Figura. 1. Viscosidade efetiva para nanofluido $\text{Al}_2\text{O}_3$ – água segundo a correlação de Khanafer e Vafai (2011) $1\% \leq \varphi_{np} \leq 9\%$ ; $20^\circ\text{C} \leq T \leq 70^\circ\text{C}$ ; $13\text{nm} \leq d_{np} \leq 131\text{nm}$	41
Figura 2. Representação esquemática de um sistema de refrigeração por compressão	58
Figura 3. Ciclo básico ideal de refrigeração	59
Figura 4. Ciclo real de refrigeração, considerando graus de sub-resfriamento e superaquecimento, queda de pressão nos trocadores de calor e compressão politrópica	60
Figura 5. Esquema do sistema indireto de refrigeração	61
Figura 6. Distribuição de temperaturas no circuito secundário	62
Figura 7. Plano T-s de um processo de troca de calor	65
Figura 8. Esquema do sistema indireto de refrigeração	70
Figura 9. Fluxos de energia no sistema indireto de refrigeração	79
Figura 10. Volume de controle do sistema indireto de refrigeração por compressão de vapor	80
Figura 11. Fluxos de exergia no sistema indireto de refrigeração	80
Figura 12. Comparação do desempenho experimental e calculado para o ciclo de amônia	100
Figura 13. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas no desempenho do ciclo e no desempenho global. Para $\text{Re} = 13000$ e um comprimento do circuito secundário de 10 m	104
Figura 14. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas no trabalho de compressão. Para $\text{Re} = 13000$	105
Figura 15. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na pressão de evaporação. Para $\text{Re} = 13000$	106

Figura 16. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas no 106  
trabalho de compressão e de bombeamento para três comprimentos  
equivalentes deferentes:  $L_1=0m$ ;  $L_2=10m$ ;  $L_3=100$

Figura 17. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na 107  
eficiência racional global. Para  $Re = 13000$  e um comprimento do  
circuito secundário de 10 m

Figura 18. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na 108  
eficiência racional global. Para  $Re = 13000$  e para três comprimentos  
equivalentes deferentes:  $L_1=0m$ ;  $L_2=10m$ ;  $L_3=100$

Figura 19. Irreversibilidades dos componentes do sistema variando a 108  
concentração volumétrica de nanopartículas. Para  $Re = 13000$  e um  
comprimento do circuito secundário de 10 m

Figura 20. Irreversibilidades dos componentes do circuito secundário 109  
variando a concentração volumétrica de nanopartículas. Para  $Re =$   
13000 e um comprimento do circuito secundário de 10 m

Figura 21. Irreversibilidades do trocador secundário variando a 109  
concentração volumétrica de nanopartículas. Para  $Re = 13000$

Figura 22. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na 110  
diferença de temperaturas média logarítmica no evaporador e no  
trocador secundário. Para  $Re = 13000$

Figura 23. Vazão de fluido secundário em função da concentração 111  
volumétrica de nanopartículas, para  $Re = 13000$

Figura 24. Coeficiente estrutural para o trocador secundário.  $L_1=0m$ ; 112  
 $L_2=10m$ ;  $L_3=100$

Figura 25. Variação do coeficiente estrutural do trocador secundário 113  
com taxa de irreversibilidade do trocador secundário. Comprimento  
das tubulações do circuito secundário 100m

Figura 26. Variação do coeficiente estrutural do trocador secundário 114  
com a concentração volumétrica de nanopartículas. Comprimento  
das tubulações do circuito secundário 100m

Figura 27. Variação das irreversibilidades do trocador secundário e da bomba com a concentração volumétrica de nanopartículas. Comprimento das tubulações do circuito secundário 100m	114
Figura 28. Componentes do custo para um tempo de operação de 8760 h/ano, comprimento equivalente do circuito secundário de 10m	117
Figura 29. Custo de operação para um período de operação de 8760 h/ano, comprimento comprimentos $L_1=0$ , $L_2=10m$ e $L_3=100m$	118
Figura 30a. Otimização gráfica para um tempo de operação de 8760 h/dia, comprimentos $L_1$ e $L_2$	119
Figura 30b. Otimização gráfica para um tempo de operação de 8760 h/ano, comprimento $L_3$	120
Figura 31a. Otimização gráfica para um comprimento desprezível das tubulações do circuito secundário	121
Figura 31b. Otimização gráfica para um comprimento das tubulações do circuito secundário igual a 10 m	121
Figura 31c. Otimização gráfica para um comprimento das tubulações do circuito secundário igual a 100 m	122
Figura 32. Representação esquemática do evaporador	126
Figura 33. Esquema do elemento “i” de trocador	127
Figura 34a. Diagrama de blocos contendo o algoritmo básico de solução do programa principal	136
Figura 34b. Diagrama de blocos contendo o algoritmo da sub-rotina de correção da temperatura de saída do fluido refrigerado	137
Figura 35. Teste de malha para a taxa de transferência de calor	138
Figura 36. Protótipo do refrigerador de absorção da UFPR	140
Figura 37. Vista parcial do evaporador na instalação da UFPR	140
Figura 38. Taxa de transferência de calor no evaporador. Comparação entre resultados do programa e medições experimentais para água	142

Figura 39. Perfil de temperaturas para o evaporador operando com 143  
água. Cem divisões

Figura 40. Incremento da condutividade com respeito ao fluido base 145  
para Re constante e igual a 2100.  $d_p = 20nm$

Figura 41. Incremento da viscosidade dinâmica com respeito ao 145  
fluido para Re constante e igual a 2100.  $d_p = 20nm$

Figura 42a. Fatores de incremento da condutividade, o coeficiente 146  
de transferência de calor e a taxa de transferência de calor para  
capacidade calorífica constante

Figura 42b. Fatores de incremento da condutividade, o coeficiente 146  
de transferência de calor e a taxa de transferência de calor para  
capacidade volumétrica constante

Figura 42c. Fatores de incremento da condutividade, o coeficiente de 147  
transferência de calor e a taxa de transferência de calor para Re  
constante.  $d_p = 20nm$

Figura 43. Fatores de incremento da queda de pressão pelo lado do 148  
fluido refrigerado para diferentes critérios.  $d_p = 20nm$

## Lista de tabelas

Tabela 1. Correlações experimentais de convecção forçada (adaptada de Sarkar, 2011)	47
Tabela 2. Equações de balanços e irreversibilidades para os componentes do sistema	98
Tabela 3. Dados experimentais (Bingming et al, 2009)	100
Tabela 4. Dados de entrada para o estudo de caso	101
Tabela 5. Resultados numéricos para o sistema base operando com água como fluido secundário, para um comprimento do circuito secundário de 10m	103
Tabela 6. Coeficientes estruturais para os componentes do circuito secundário. Comprimento equivalente do circuito secundário igual a 10m	111
Tabela 7. Concentração ótima para mínimo custo de operação anual	123
Tabela 8. Incertezas dos instrumentos de medição	141

## Simbologia

$A$	Área	$m^2$
$A_L$	Área de transferência de calor	$m^2$
$A_T$	Área de escoamento	$m^2$
$BC$	Corte do defletor	%
$c$	Concentração mássica da mistura	—
$C$	Capacidade térmica	kW/K
$C$	Custo	\$
$COP$	Coefficiente de desempenho	-
$c_p$	Calor específico a pressão constante	$kJ/(kg\ K)$
$d_p$	Diâmetro de partícula	nm
$Db_{inlet}$	Diâmetro bocal de entrada	m
$Db_{outlet}$	Diâmetro bocal de saída	m
$D_h$	Diâmetro hidráulico	m
$Dotl$	Diâmetro do círculo formado pelos diâmetros exteriores dos tubos	m
$Dt$	Diâmetro de tubo	m
$Ds_{ext}$	Diâmetro exterior do casco	m
$e$	Exergia específica	$kJ/kg$
$\dot{E}$	Taxa de exergia	kW
$\dot{E}_C^Q$	Taxa de exergia de entrada ao sistema indireto de refrigeração	kW
$f$	Fator de atrito	—
$F_{R\$/USD}$	Taxa de câmbio vigente entre moedas	
$g$	Aceleração gravitacional	$m/s^2$
$G$	Velocidade mássica	$kg/(s\ m^2)$
$h$	Entalpia específica	$kJ/kg$
$\dot{I}$	Taxa de irreversibilidade	kW
$\dot{I}_p$	Taxa de irreversibilidade mecânica ou devido à queda de	kW



	pressão	
$\dot{I}_T$	taxa de irreversibilidade térmica ou devido à troca de calor com um diferença finita de temperaturas	kW
$J$	Fator de correção para o coeficiente de transferência de calor	—
$j_{ideal}$	fator de Colburn ideal	—
$k$	Condutividade térmica	kW/(m K)
$K_f$	Número de ebulição de Pierre	—
$k_{tub}$	Condutividade térmica da parede do tubo	kW/(m.K)
$L$	Comprimento	m
$L_{ti}$	Coeficiente da equação (2.4)	—
$L_t$	Comprimento dos tubos	m
$\dot{m}$	Vazão mássica	kg/s
$MDE$	Lado direito da equação da condição de ótimo	—
$MEE$	Lado esquerdo da equação da condição de ótimo	—
$Nd$	Número de defletores	—
$Np_t$	Número de passes	—
$N_r$	Número de reposições do fluido secundário	—
$N_s$	Velocidade angular do eixo do compressor	r/s
$N_t$	Número de tubos	—
$Nu$	Número de Nusselt	—
$P$	Parâmetro da equação (2.4)	—
$P$	Pressão absoluta	kPa
$Pe$	Número de Péclet	—
$Pe_r$	Número de Péclet rotacional	—
$Pr$	Número de Prandtl	—
$Pt$	Passo entre tubos	m
$q''$	Fluxo de calor	kW/m <sup>2</sup>
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor	kW
$\dot{Q}_C$	Carga térmica	kW
$R_B$	Fator de correção de <i>bypass</i>	—

$R_{bd}$	Resistência interfacial térmica de Kapitza	—
$R_f$	Resistência térmica devido à incrustação	$\text{m}^2 \text{ K/kW}$
$R_k$	Incremento da condutividade	—
$R_L$	Fator de correção de fugas	—
$R_{\dot{Q}}$	Incremento da taxa de transferência de calor	—
$R_{\mu}$	Incremento da viscosidade	—
$R_{\alpha}$	Incremento do coeficiente de transferência de calor	—
$R_{\Delta P}$	Incremento da queda de pressão pelo lado do fluido resfriado	—
Re	Número de Reynolds	—
$r_{comp}$	razão de compressão	—
$s$	Entropia específica	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$\dot{S}_{gen}$	Taxa de geração de entropia	$\text{kW/K}$
$t$	Tempo	s
$t_{op}$	Tempo de operação anual	h/ano
$T$	Temperatura absoluta	K
$\bar{T}$	Temperatura média	K
$U$	Coeficiente global de transferência de calor	$\text{kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$
$u_m$	Velocidade média	m/s
$V$	Velocidade	m/s
$\dot{V}$	Vazão volumétrica	$\text{m}^3/\text{s}$
$v$	Volume específico	$\text{m}^3/\text{kg}$
$V_{nf}$	Inventário volumétrico anual de nanofluido	$\text{m}^3$
$\dot{W}$	Taxa de trabalho fornecido ou potência elétrica	kW
$x$	Fração mássica de vapor ou título	—

## Símbolos gregos

$\alpha$	Coeficiente de transferência de calor	kW/(m <sup>2</sup> K)
$\alpha_{tp}$	Coeficiente local de troca de calor para ebulição no interior dos tubos	kW/(m <sup>2</sup> K)
$\beta_{ii}$	Coeficiente da equação (2.4)	—
$\gamma$	Parâmetro da equação (2.4)	—
$\gamma$	Potencial químico	—
$\delta$	Incerteza	m
$\delta_t$	Espessura do tubo	m
$\delta_s$	Espessura do casco	m
$\delta_{nf}$	Difusividade térmica do nanofluido	m <sup>2</sup> /s
$\delta_v^+$	Espessura adimensional da sub-camada laminar	—
$\Delta$	Variação	—
$\varepsilon$	Efetividade	—
$\zeta$	Rugosidade da tubulação	m
$\zeta_{\Delta T}$	Margem de erro para o cálculo da temperatura	—
$\theta$	Arranjo dos tubos no feixe	°
$\eta$	Eficiência	—
$\kappa$	Constante de proporcionalidade	—
$k_{ii}^c$	Parâmetro da equação (2.4)	—
$\mu$	Viscosidade	—
$\rho$	Massa específica	kg/m <sup>3</sup>
$\varphi$	Concentração volumétrica de partículas	—
$\sigma$	Coeficiente estrutural	—
$\psi$	Eficiência racional	—

## Sub-índices e abreviaturas

<i>a</i>	Meio ambiente
<i>app</i>	Aproximação
<i>b</i>	Componente do custo independe da variável de decisão
<i>bf</i>	Fluido base
<i>bundle</i>	Feixe de tubos
<i>c</i>	Corrente fria no trocador de calor
<i>calc</i>	Calculado
<i>ch</i>	Química
<i>ciclo</i>	Referente ao ciclo de refrigeração
<i>cnd</i>	Condensação
<i>crit</i>	Crítico
<i>CON</i>	Condensador
<i>des</i>	Dessuperaquecimento
<i>eff</i>	Efetivo
<i>el</i>	Eletricidade
<i>exp</i>	Experimental
<i>ext</i>	exterior
<i>EVA</i>	Evaporador
<i>f</i>	fluido
<i>fw</i>	Fluido refrigerado
<i>h</i>	Corrente quente no trocador de calor
<i>HE</i>	Trocador de calor
<i>i</i>	Referente a um elemento de trocador
<i>ideal</i>	Ideal
<i>in</i>	Entrada ao volume de controle
<i>int</i>	Interno
<i>k</i>	cinética
<i>k</i>	Referente ao sub-sistema k-ésimo
<i>l</i>	Líquido
<i>lm</i>	Media logarítmica

<i>ls</i>	Líquido saturado
<i>m</i>	Mecânica
<i>med</i>	Media
<i>min</i>	Mínimo
<i>nf</i>	Nanofluido
<i>np</i>	Nanopartícula
<i>op</i>	Operação
<i>out</i>	Saída do volume de controle
<i>p</i>	Partícula
<i>p</i>	Potencial
<i>ph</i>	Física
<i>PUMP</i>	Bomba
<i>ref</i>	Refrigerante
<i>rf</i>	Referência
<i>s</i>	Isentrópico
<i>sat</i>	Saturação
<i>sf</i>	Fluido secundário (água ou nanofluido)
<i>shell</i>	Casco
<i>sub</i>	Sub-resfriamento
<i>sup</i>	Superaquecimento
<i>TOTAL</i>	Englobando todo o sistema
<i>tub</i>	Tubo, tubulação
<i>v</i>	Vapor
<i>vs</i>	Vapor saturado
<i>w</i>	Referente à parede