

**VIVIANE KECHICHIAN**

**MODELAGEM DO PROCESSO TÉRMICO CONTÍNUO DE  
FLUIDOS ALIMENTÍCIOS NÃO-NEWTONIANOS EM  
TROCADOR DE CALOR BITUBULAR**

São Paulo

2011

**VIVIANE KECHICHIAN**

**MODELAGEM DO PROCESSO TÉRMICO CONTÍNUO DE  
FLUIDOS ALIMENTÍCIOS NÃO-NEWTONIANOS EM  
TROCADOR DE CALOR BITUBULAR**

Texto apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
Título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:  
Engenharia Química

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Titular Carmen Cecília Tadini  
Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut

São Paulo

2011

**Kechichian, Viviane**

**Modelagem do processo térmico contínuo de fluídos alimentícios não-newtonianos em trocador de calor bitubular / V. Kechichian. -- São Paulo, 2011.**

**103 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.**

**1. Modelos matemáticos 2. Tratamento térmico 3. Processamento de alimentos 4. Transferência de calor I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.**

## **AGRADECIMENTOS**

Para que um trabalho de quase 5 anos seja iniciado, elaborado, não abandonado no meio do caminho e terminado dentro do prazo é necessária tanta ajuda, tanta torcida, tantas lágrimas que tenho receio de esquecer de agradecer nesta página alguma pessoa que tenha me ajudado em qualquer uma das necessidades que tive neste tempo todo.

Não costumo deixar elogios ou agradecimentos para o final de um trabalho, portanto, me sinto tranquila de que fui grata por quase toda palavra ou ação bem-vinda durante este projeto e me desculpe caso tenha falhado em alguns momentos!

Obrigada a todos de coração e sintam-se parte da comemoração de mais um projeto de vida meu.

## RESUMO

A demanda por produtos industrializados que apresentem máxima preservação de suas características naturais têm crescido e feito as indústrias alimentícias re-analisarem seus processos para atingirem essa necessidade do mercado. A abordagem convencional conservadora, utilizada para o dimensionamento do processamento térmico de alimentos, pode levar ao sobre-processamento especialmente no regime laminar, devido às significativas distribuições de temperatura e tempos de residência existentes. Um modelo matemático, composto por equações diferenciais de massa e energia foi elaborado, considerando o processamento térmico de um fluido não-newtoniano, sob regime laminar, escoando em um trocador de calor bitubular. No modelo, se levou em conta as dispersões efetivas de massa e energia associadas com o escoamento laminar não ideal, as trocas de calor com o ambiente, a letalidade que ocorre no aquecimento e resfriamento e o perfil de velocidade. O modelo foi testado por meio de simulações do estudo de caso do processamento térmico de suco de graviola (fluido pseudoplástico) considerando a destruição de bolores e leveduras. Objetivou-se nas simulações avaliar o efeito de distintas considerações do modelo nas variáveis consideradas. Os resultados indicaram que as etapas de aquecimento e resfriamento contribuíram de forma significativa na letalidade do processo, assim como as considerações quanto às dispersões de massa e energia. Como exemplo, as letalidades, considerando a abordagem convencional (tubo de retenção isotérmico com velocidade máxima) e o modelo completo (com todas as considerações) apresentaram valores de 1,46 e 5,74, respectivamente. A flexibilidade do modelo elaborado, assim como os tempos computacionais pequenos necessários para obter os resultados são as principais vantagens do uso do mesmo. Acredita-se que o modelo elaborado pode contribuir de forma importante para o correto dimensionamento e avaliação de processos térmicos em indústrias de alimentos, permitindo que a demanda dos consumidores seja atendida.

**Palavras-chave:** modelos matemáticos. processamento térmico. processamento de alimentos. transferência de calor.

## ABSTRACT

The demand for industrialized food with maximum retention of sensorial and nutritional attributes has grown and made the food industries rethink operational conditions to meet this market expectation. The classic conservative approach, used for the design of thermal food processing can lead to over-processing specially in laminar regime, due to the existing significant temperature and residence time distributions. A mathematical model, comprising differential equations for mass and heat transfer was elaborated, considering the thermal processing of a non-Newtonian liquid, under laminar flow in a double-pipe heat exchanger. In the model, it was taken into account the effective mass and energy dispersions associated with the non-ideal laminar flow, the heat exchange with the ambient, the contribution from heating and cooling sections in the lethality and the velocity profile. The model was tested through simulations of a study case of soursop juice processing (pseudoplastic fluid) regarding the destruction of yeast and molds. The objective of the simulations was to evaluate the effect of distinct model assumptions on the variables. The results indicated that the heating and cooling sections and the assumptions regarding the effective mass and energy dispersions had an important contribution to the processing lethality. As an example, the lethality, regarding the conventional approach (isothermal holding tube at the maximum velocity) and the complete model (with all the assumptions) were 1.46 and 5.74, respectively. The model flexibility and the small computational time needed for the results to be obtained are the main advantages of its use. It is expected that the developed model can be an important contribution to the correct design and evaluation of thermal processing in food industries, allowing the consumer demands to be reached.

**Key-words:** mathematical models. thermal processing. food processing. heat transfer.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.	Condições de contorno anteriormente apresentadas referentes ao fluido produto e tubo interno, para cada seção do trocador.....	56
Tabela 3.2.	Condições de contorno anteriormente apresentadas referentes ao fluido de serviço, tubo externo e isolamento térmico, para cada seção do trocador.....	57
Tabela 3.3.	Parâmetros do modelo de aquecimento (AQ), de retenção (RT) e de resfriamento (RF) referentes ao fluido produto e de serviço.....	59
Tabela 3.4.	Parâmetros do modelo de aquecimento (AQ), de retenção (RT) e resfriamento (RF) referentes ao tubo interno,tubo externo e isolamento térmico.....	61
Tabela 3.5.	Parâmetros do modelo de aquecimento (AQ), de retenção (RT) e de resfriamento (RF) referentes ao componente genérico A.....	62
Tabela 3.6.	Parâmetros do modelo de aquecimento (AQ), de retenção (RT) e de resfriamento (RF) referentes aos coeficientes convectivos individuais, global de troca térmica e temperatura do ar que circunda o trocador de calor.....	62
Tabela 3.7.	Variáveis do modelo de aquecimento (AQ), de retenção (RT) e de resfriamento (RF) do referentes ao fluido produto, de serviço, do componente genérico A, dos tubos interno e externo e do coeficiente convectivo.....	63
Tabela 3.8.	Variáveis do modelo de aquecimento (AQ), de retenção (RT) e de resfriamento (RF) referentes as taxa de calor.....	63
Tabela 4.1.	Temperaturas consideradas parâmetros do modelo no estudo de caso.....	65
Tabela 4.2.	Parâmetros de cinética de destruição térmica e média de mistura da concentração volumétrica do componente A considerados no estudo de caso.....	66
Tabela 4.3.	Coeficientes de convecção considerados no estudo de caso.....	68
Tabela 4.4.	Parâmetros referentes aos materiais do trocador de calor considerados no estudo de caso.....	68

Tabela 4.5.	Valores da condutividade térmica efetiva ( $k_{ef1-radial}$ ) de acordo com o valor de Peclet ( $Pe$ ).....	69
Tabela 4.6.	Considerações do modelo para cada caso estudado.....	79
Tabela 4.7.	Contribuição de cada seção do trocador de calor na letalidade do processo considerando os casos 3, 4, 5 e 6 (Tabela 4.6).....	83
Tabela 4.8.	Letalidade ao final da seção de aquecimento, de acordo com as hipóteses do modelo.....	89



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de um trocador bitubular (a). Esquema das seções de aquecimento, resfriamento e do tubo de retenção de um trocador de calor bitubular (b).....	11
Figura 3.1	Esquema do escoamento dos fluidos produto e de serviço nas seções de aquecimento e resfriamento do trocador de calor bitubular, utilizado na modelagem matemática.....	23
Figura 3.2	Esquema do tubo de retenção do trocador de calor bitubular utilizado para a modelagem matemática.....	24
Figura 3.3	Dimensões do tubo interno e do tubo externo do trocador bitubular, consideradas na modelagem matemática.....	24
Figura 3.4	Dimensões do tubo de retenção utilizado na modelagem matemática.....	25
Figura 3.5	Domínio axial adimensionalizado, utilizado na modelagem matemática.....	26
Figura 3.6	Esquema que indica as posições das temperaturas do fluido produto ( $T_1$ e $T_1^*$ ), do tubo interno ( $T_{ib1}$ ) e o coeficiente global de troca térmica ( $U_1$ ).....	35
Figura 3.7	Esquema que indica a temperatura média radial do fluido de serviço ( $T_2$ ) e o coeficiente global de troca térmica ( $U_2$ ).....	38
Figura 3.8	Esquema que indica o que representam $T_{ib2}$ , $T_2$ e $U_3$ .....	43
Figura 3.9	Esquema indicando as temperaturas $T_{ar}$ , $T_{ib2}$ , o coeficiente de transferência de calor entre o ar e o trocador de calor por convecção natural $h_{cn}$ e o coeficiente global de troca térmica, $U_4$ .....	47
Figura 3.10	Esquema indicando o coeficiente de troca térmica $U_5$ .....	50
Figura 3.11	Esquema indicando o coeficiente global de troca térmica $U_6$ .....	54
Figura 3.12	Esquema do trocador de calor indicando as posições onde fez-se necessário impor condições de contorno para garantir a continuidade dos perfis de temperatura e concentração dos fluidos..	55

Figura 4.1	Influência da discretização axial no valor da letalidade considerando 20 pontos radialmente.....	70
Figura 4.2	Influência da discretização radial no valor da letalidade, considerando 200 pontos axialmente.....	71
Figura 4.3	Concentração média de bolores e leveduras obtida por simulação, na seção de aquecimento, para distintos valores de $Pe$ .....	72
Figura 4.4	Concentração média de bolores e leveduras, obtida por simulação, no tubo de retenção, para distintos valores de $Pe$ .....	72
Figura 4.5	Concentração média de bolores e leveduras, obtida por simulação, na seção de resfriamento, para distintos valores de $Pe$ .....	73
Figura 4.6	Perfis da temperatura média do fluido produto obtidos por simulação para dois valores distintos de $Pe$ térmico radial.....	74
Figura 4.7	O efeito do valor do $Pe$ do fluido produto na distribuição da letalidade, ao longo do trocador de calor.....	74
Figura 4.8	Perfis de temperatura do fluido produto, ao longo do trocador de calor, no centro e na parede do tubo, obtidos por simulação.....	75
Figura 4.9	Perfis de temperatura do fluido produto, no tubo de retenção, no centro e na parede do tubo, obtidos por simulação.....	76
Figure 4.10	Perfis axiais de concentrações média radiais de bolores e leveduras na seção de aquecimento, obtidos por simulação.....	77
Figura 4.11	Perfis de temperatura (produto e serviço), na seção de aquecimento, obtidos por simulação.....	77
Figura 4.12	Perfis de temperatura (produto e serviço) na seção de resfriamento, obtidos por simulação .....	78
Figura 4.13	Perfis de temperatura do fluido produto no centro do tubo (seção de aquecimento), de acordo com o caso estudado (Tabela 4.6).....	79
Figura 4.14	Temperatura do fluido produto no centro do tubo, considerando os casos 3 e 6 definidos na Tabela 4.6 .....	80
Figura 4.15	Efeito das considerações do modelo (Tabela 4.6) na letalidade ( $S$ ) ao final do processamento térmico, considerando a concentração média de bolores e leveduras.....	81
Figura 4.16	Letalidade acumulada ao longo do trocador de calor (axialmente) de acordo com o caso considerado (Tabela 4.6).....	82

Figura 4.17	Letalidade após cada seção do trocador de calor, considerando os casos 3 a 6 (Tabela 4.6).....	83
Figura 4.18	Concentração média de bolores e leveduras ao longo do trocador dependendo da consideração utilizada no modelo quanto às dispersões mássica e térmica.....	85
Figura 4.19	Efeito de considerar as dispersões mássica ou térmica na letalidade (baseado na concentração média de bolores e leveduras).....	86
Figura 4.20	Perfis de temperatura do fluido produto no centro do tubo, ao longo do trocador de calor, de acordo com as considerações usadas no modelo matemático.....	87
Figura 4.21	Perfis de temperatura do fluido produto, de acordo com a posição, na seção de aquecimento, quando somente a dispersão mássica foi considerada.....	88
Figura 4.22	Perfis de temperatura do fluido produto, de acordo com a posição, na seção de aquecimento, quando considerou-se a dispersão mássica e térmica ou somente a térmica.....	88
Figura 4.23	Temperatura da água quente na entrada da seção de aquecimento de acordo com a vazão do fluido produto considerada.....	90
Figura 4.24	Perfis de temperatura do fluido produto no centro do tubo para distintos valores de vazão do fluido produto (considerando caso 6, Tabela 4.6) .....	91
Figura 4.25	Letalidade após a seção de resfriamento, de acordo com a vazão do fluido produto considerada (considerando caso 6, Tabela 4.6).....	92
Figura 4.26	Efeito da vazão do fluido produto na letalidade, considerando os casos 3 e 6 (Tabela 4.6).....	92

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área ( $m^2$ )
$\dot{A}rea_{MOLHEADA}$	área da seção transversal de escoamento ( $m^2$ )
$c$	parâmetro da equação de Eagle- Ferguson
$cp_1$	calor específico a pressão constante do fluido produto ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )
$cp_2$	calor específico a pressão constante do fluido de serviço ( $J\ kg^{-1}\ .K^{-1}$ )
$cp_{ib1}$	calor específico a pressão constante do tubo interno ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )
$cp_{ib2}$	calor específico a pressão constante do tubo externo ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )
$cp_{iso}$	calor específico a pressão constante do isolamento térmico ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )
$C_A$	concentração volumétrica do componente A ( $kg\ m^{-3}$ ou UFC $m^{-3}$ )
$\bar{C}_A(\eta)$	média de mistura da concentração volumétrica do componente A ( $kg\ m^{-3}$ ou UFC $m^{-3}$ )
$C_{A-ENTRADA-AQ}$	concentração do componente A na entrada da seção de aquecimento em $\eta=0$ (UFC $m^{-3}$ ou $kg\ m^{-3}$ )
$C_{A-ENTRADA-RET}$	concentração do componente A na entrada do tubo de retenção em $\eta=1$ (UFC $m^{-3}$ ou $kg\ m^{-3}$ )
$C_{A-ENTRADA-RF}$	concentração do componente A na entrada da seção de resfriamento em $\eta=2$ (UFC $m^{-3}$ ou $kg\ m^{-3}$ )
$D(\eta, x)$	tempo de redução decimal do componente A (s)
$D_h$	diâmetro hidráulico da seção anular (m)
$D_{efA}$	difusividade mássica efetiva do componente genérico A no fluido produto ( $m^2\ s^{-1}$ )
$D_{ref}$	tempo de redução decimal do componente A na temperatura de referência (s)

$D_{efA-radial}$	difusividade mássica efetiva radial do componente A no fluido produto ( $m^2 s^{-1}$ )
$e_1$	espessura do tubo interno (m)
$e_2$	espessura do tubo externo (m)
$e_{iso}$	espessura do isolamento térmico (m)
$h_e$	coeficiente convectivo entre o o fluido de serviço e a superfície externa do tubo interno ou a superfície interna do tubo externo ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$h_{cn}$	coeficiente de transferência de calor entre o ar e o trocador de calor por convecção natural ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$k_{ef1-radial}$	condutividade térmica efetiva radial do fluido produto ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
$k_{ef2-axial}$	condutividade térmica efetiva axial do fluido de serviço ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
$k_{tb1}$	condutividade térmica do tubo interno ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
$k_{tb2}$	condutividade térmica do tubo externo ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
$k_{iso}$	condutividade térmica do isolamento térmico ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
$L$	comprimento da seção do trocador de calor (m)
$Perímetro_{MOLHADO}$	perímetro referente ao contato entre o fluido de serviço e as paredes molhadas (m)
$n$	índice de comportamento
$Pe$	número de Peclet
$Pe_{M1-radial}$	número de Peclet mássico radial do fluido produto
$Pe_{T1-radial}$	número de Peclet térmico radial do fluido produto
$Pe_{T2-axial}$	número de Peclet térmico axial do fluido de serviço
$\dot{Q}_2(\eta)$	taxa de calor trocado pelo fluido de serviço por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{2-tb1}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo fluido de serviço e o tubo interno por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )

$\dot{Q}_{2-tb2}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo fluido de serviço e o tubo externo por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb1}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo interno por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb1-1}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo interno e o fluido interno por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb1-2}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo interno e o fluido de serviço por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb1-iso}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo interno e isolamento térmico por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb2}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo externo por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb2-2}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo externo e o fluido de serviço por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{tb2-cn}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo tubo externo e o ar por convecção natural por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{iso}(\mu)$	taxa de calor trocado pelo isolamento térmico por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{iso-tb1}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo isolamento térmico e o tubo interno por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$\dot{Q}_{iso-cn}(\eta)$	taxa de calor trocado pelo isolamento térmico e o ar por convecção natural por unidade de volume ( $W m^{-3}$ )
$r_A(\eta, x)$	taxa de reação do componente A ( $kg m^{-3} s^{-1}$ ou $UFC m^{-3} s^{-1}$ )
$r_{médioib1}$	posição onde se observa a temperatura média radial do tubo interno no estado estacionário (m)
$r_{médioib2}$	posição onde se observa a temperatura média radial do tubo externo no estado estacionário (m)
$r_{médioiso}$	posição onde se observa a temperatura média radial do isolamento térmico no estado estacionário (m)
$r_1$	raio interno do tubo interno (m)

$r_2$	raio interno do tubo externo (m)
S	letalidade do processo
$T_1(\eta, x)$	temperatura do fluido produto (K)
$T_1^*$	temperatura do fluido produto na parede interna do tubo (K)
$\bar{T}_1(\eta)$	média de mistura da temperatura do fluido produto (K)
$T_{ar}$	temperatura do ar que circunda o trocador de calor (K)
$T_{ref}$	temperatura de referência (K)
$T_2(\eta)$	temperatura média radial do fluido de serviço (K)
$T_{iso}(\eta)$	temperatura do isolamento térmico (K)
$T_{tb2}(\eta)$	temperatura do tubo externo (K)
$T_{tb1}(\eta)$	temperatura do tubo interno (K)
$T_{1ENTRADA-AQ}$	temperatura do fluido produto na entrada da seção de aquecimento (K)
$T_{1ENTRADA-RET}$	temperatura do fluido produto na entrada do tubo de retenção (K)
$T_{1ENTRADA-RF}$	temperatura do fluido produto na entrada da seção de resfriamento (K)
$T_{2ENTRADA-AQ}$	temperatura do fluido de serviço na entrada da seção de aquecimento (K)
$T_{2ENTRADA-RF}$	temperatura do fluido de serviço na entrada da seção de resfriamento (K)
$T_{2MÉDIASEÇÃO}$	temperatura média axial do fluido de serviço na seção do trocador considerada (aquecimento ou resfriamento) (K)
$T_{tb1-int}$	temperatura da superfície interna do tubo interno (K)
$T_{tb1-ext}$	temperatura da superfície externa do tubo interno (K)
$T(r)$	função temperatura radial do tubo interno, no estado estacionário
$U_1$	coeficiente global de troca térmica entre o fluido produto e tubo interno ( $W m^{-2} K^{-1}$ )

$U_2$	coeficiente global de troca térmica entre o tubo interno e fluido de serviço ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$U_3$	coeficiente global de troca térmica entre o fluido de serviço e o tubo externo ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$U_4$	coeficiente global de troca térmica entre o tubo externo e o ar que circunda o trocador de calor ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$U_5$	coeficiente global de troca térmica entre o tubo interno e o isolamento térmico ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$U_6$	coeficiente global de troca térmica entre o isolamento térmico e o ar que circunda o isolamento térmico ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$V$	volume ( $m^3$ )
$v_1(x)$	velocidade do fluido produto ( $m s^{-1}$ )
$\bar{v}_1$	velocidade axial média do fluido produto (bulk) ( $m s^{-1}$ )
$\bar{v}_2$	velocidade axial média do fluido de serviço ( $m^3 s^{-1}$ )
$x$	posição radial adimensionalizada
$z$	variação de temperatura necessária para promover uma variação de 10 vezes no valor de D (K)
$z^*$	posição axial (m)

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha_{ef1-radial}$	difusividade térmica efetiva radial do fluido produto ( $m^2 s^{-1}$ )
$\alpha_{ef2-axial}$	difusividade térmica efetiva axial do fluido de serviço ( $m^2 s^{-1}$ )
$\eta$	posição axial adimensionalizada
$\rho_1$	densidade do fluido produto ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_2$	densidade do fluido de serviço ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_{tb1}$	densidade do tubo interno ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_{tb2}$	densidade do tubo externo ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_{iso}$	densidade do isolamento térmico ( $kg m^{-3}$ )



# SUMÁRIO

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	4
2.1 LETALIDADE DO PROCESSAMENTO TÉRMICO	4
2.2 PROCESSAMENTO TÉRMICO CONTÍNUO	9
2.3 REOLOGIA DE FLUIDOS ALIMENTÍCIOS	13
2.4 DIMENSIONAMENTO DO PROCESSO TÉRMICO CONTÍNUO	18
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO</b>	23
3.1 MODELAGEM DA SEÇÃO DE AQUECIMENTO / RESFRIAMENTO	27
3.1.1 <i>Modelagem do fluido produto</i>	28
3.1.1.1 Equação de conservação de massa de A	28
3.1.1.2 Equação de conservação de energia	31
3.1.2 <i>Modelagem do tubo interno</i>	33
3.1.3 <i>Modelagem do fluido de serviço</i>	39
3.1.4 <i>Modelagem do tubo externo</i>	44
3.2 MODELAGEM DO TUBO DE RETENÇÃO	47
3.2.1 <i>Modelagem do fluido produto</i>	47
3.2.1.1 Equação de conservação do componente A	47
3.2.1.2 Equação de conservação de energia	48
3.2.2 <i>Modelagem do tubo interno</i>	49
3.2.3 <i>Modelagem do isolamento térmico</i>	51
3.3 MODELO DE UNIÃO DAS SEÇÕES DO TROCADOR	54
3.4 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DOS MODELOS ELABORADOS	59
3.5. SIMULAÇÃO	64

<b>4 ESTUDO DE CASO</b>	65
4.1 ESTUDO DA DISCRETIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS	69
4.2 ESTUDO DO EFEITO DO NÚMERO DE PECLET	71
4.3 ESTUDO DOS PERFIS DE TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO	75
4.4 ESTUDO DO EFEITO DAS CONSIDERAÇÕES DO MODELO	78
4.5 EFEITO DA DISPERSÃO MÁSSICA OU TÉRMICA	85
4.8 EFEITO DA VAZÃO DO FLUIDO PRODUTO	90
<b>5 CONCLUSÕES</b>	94
<b>6 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	96
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	97