

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OPERAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR DE FLUXO CRUZADO EM REGIME
TRANSITÓRIO

João Otávio dos Santos Mota

São Paulo
2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OPERAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR DE FLUXO CRUZADO EM REGIME
TRANSITÓRIO

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia

João Otávio dos Santos Mota

Orientador: Prof. Dr. Marcos M. Pimenta

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2014

Mota, João Otávio dos Santos

**Operação de um trocador de calor de fluxo cruzado em
regime transitório / J.O.S. Mota. – São Paulo, 2014.**

68 p. + apêndices

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Trocadores de calor 2.Trocador de calor de fluxo cruzado
3.Regime transitório I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal a análise do comportamento de um trocador de calor em fluxo cruzado quando operado em um regime transiente. Primeiramente, foi estudado um modelo teórico de um trocador deste tipo, de onde foi feita uma modelagem matemática para que seja possível estudar a dinâmica das temperaturas internas do trocador até que estas cheguem a um valor de regime. Com o modelo bem definido, foi estudado o seu comportamento em condições variáveis de funcionamento assim como foi dado um início a um estudo para adaptar o modelo simples para um composto por vários sistemas em conjunto.

ABSTRACT

The main objective of this work is the analysis of the behavior of a cross-flow heat exchanger in transient state. Firstly, a theoretical model of this type of exchanger was modeled. With this mathematical model we were able to create command lines so we could study the behavior of the internal temperatures within the exchanger until it reached a steady state. With the well known model, we studied how the system would behave under variable conditions and we started a research for an adaptation of the original model in which we could compose a more complex model of a heat exchanger with only a combination of the original model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. TIPOS DE TROCADORES DE CALOR	8
1.2. REGIME TRANSITÓRIO	10
2. OBJETIVO	12
3. MODELO DE UM TROCADOR DE CALOR DE FLUXO CRUZADO ..	13
3.1. MODELO FÍSICO	13
3.2. EQUACIONAMENTO	15
3.3. MODELO MATEMÁTICO	18
3.4. MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA	19
3.5. MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS	20
4. SIMULAÇÕES DO COMPORTAMENTO DO MODELO	29
4.1. CONDIÇÕES INICIAIS	30
4.2. RESPOSTA NO TEMPO	32
4.3. CONDIÇÕES FINAIS	40
4.4. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS	46
4.5. RESPOSTA DO SISTEMA A VARIAÇÕES NA ENTRADA	52
5. MODELO DE TROCADOR COM MULTIPLOS PASSES	57
5.1. ADAPATAÇÕES NO MODELO ORIGINAL	58
5.2. SIMULAÇÕES COM DIVERSOS PASSES	59
6. CONCLUSÕES	63

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

APÊNDICE A - LINHAS DE COMANDO 68

LISTA DE FIGURAS

Fig 1.1 – Tipos de trocadores	9
Fig 1.2 – Trocador “Cross-counterflow”	10
Fig 3.1 – Célula do trocador	13
Fig 3.2 – Diagrama para o trocador de fluxo cruzado.....	14
Fig 3.3 - Representação simplificada da malha para um tempo qualquer	22
Fig 4.1 - Condição inicial de Th	30
Fig 4.2 - Condição inicial de Tc	31
Fig 4.3 - Condição inicial de Tw	31
Fig 4.4 - Representação dos cortes da superfície	32
Fig 4.5 - Denominação dos cortes paralelos ao eixo X	33
Fig 4.6 - Denominação dos cortes paralelos ao eixo Y	33
Fig 4.7 - Resposta de Th no tempo em diferentes pontos	34
Fig 4.8 - Resposta de Tc no tempo em diferentes pontos	35
Fig 4.9 - Resposta de Tw no tempo em cortes paralelos ao eixo X ..	37
Fig 4.10 - Resposta de Tw no tempo em cortes paralelos ao eixo Y ..	38
Fig 4.11 - Comparação de Th, Tw e Tc no tempo	39
Fig 4.12 - Mapa de Th no instante final da simulação	40
Fig 4.13 - Cortes do mapa de Th no instante final	41
Fig 4.14 - Mapa de Tc no instante final	42

Fig 4.15 - Cortes do mapa de Th no instante final	43
Fig 4.16 - Mapa de Tw no instante final	44
Fig 4.17 - Corte do mapa de Tw no instante final (Direção x)	45
Fig 4.18 - Corte do mapa de Tw no instante final (Direção y)	46
Fig 4.19 - Comparação do resultado com hh – Variação de 800 a 4500 W/m ² K	47
Fig 4.20 - Comparação do resultado com hc – Variação de 800 a 4500 W/m ² K	48
Fig 4.21 - Comparação do resultado com Cw	49
Fig 4.22 - Comparação do resultado com uc – Variação de 1 a 5 m/s	50
Fig 4.23 - Comparação do resultado com uh – Variação de 1 a 4 m/s	51
Fig 4.24 – Temperaturas na saída com variação senoidal em Tc	53
Fig 4.25 - Temperaturas na saída com variação senoidal em Tc - Baixa frequência	53
Fig 4.26 - Temperaturas na saída com variação senoidal em Tc - Alta frequência	54
Fig 4.27 - Resposta das temperaturas na saída com uma entrada rampa temporária em Tc	56
Fig 5.1 - Modelo físico de um conjunto de células	57
Fig 5.2 - Representação dos vários passes w	58
Fig 5.3 - Comparação dos resultados com diversos passes	60

Fig 5.4 - Comparação dos resultados de 1 a 4 passes	61
Fig 5.5 - Gráfico da variação da Temperatura final com os passes ...	62
Fig 6.1 - Resposta de Temp H em um trocador de corrente paralela (BEATO, MONTE, 2012)	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Parâmetros do problema	29
Tabela 4.2 - Valores variados de Cw [$J/(kg \cdot K)$] para alguns sólidos	49
Tabela 4.3 – Variações de amplitude do sinal de saída Th	55
Tabela 5.1 - Temperaturas finais por número de passes	61

SÍMBOLOS

E – Erro, Constante do sistema

F, G, H – Constante do sistema

h – Coeficiente de troca de calor

i, j, k – Coordenadas (Discreto)

\hat{k} – Difusividade térmica

L – Comprimento da parede

M – Massa

\dot{m} – Fluxo de massa instantâneo

\tilde{m} – Massa residente

S – Área total de troca

t – tempo

T – Temperatura (Contínuo), Tempo total de simulação

u – Velocidade instantânea

V – Volume

x, y – Coordenadas espaciais (Contínuo)

θ – Temperatura (Discreto)

λ – Coeficiente de condução térmica

ρ – Densidade

τ – Tempo total

Subscritos

c – “cold”, fluido frio

h – “hot”, fluido quente

w – “wall”, parede

x – coordenada x

y – coordenada y

0 – condição inicial

1. INTRODUÇÃO: TROCADORES DE CALOR

Trocadores de calor têm como função principal transferir o calor de uma parte para outra de um equipamento, onde exista uma diferença de temperaturas. Geralmente, são utilizados para a troca de calor entre fluídos, um “quente” e outro “frio”, podendo ou não ser separados por uma parede.

Esse tipo de equipamento é utilizado nas mais diversas aplicações. Seja em máquinas comuns como geladeiras, radiadores de carros e equipamentos de ar condicionado, mas também em inúmeras aplicações industriais como caldeiras, tanques de refrigeração, entre outros.

1.1. TIPOS DE TROCADORES

Dada a definição um tanto genérica para esse tipo de equipamento descrito anteriormente, é normal esperar inúmeros tipos de trocadores. Devido ao amplo uso e às diversas aplicações, pode ser necessário alcançar diferentes características de funcionamento desse dispositivo.

Sendo assim foram desenvolvidos diversos tipos de trocadores de calor, desde o mais simples, com dois fluidos correndo numa mesma direção separados por uma parede, até modelos bastante complexos. Esse desenvolvimento de trocadores com características construtivas diversas se deve à busca de equipamentos cada vez mais eficientes, tanto na taxa de troca de calor, quanto em tamanho ou custo.

Tentando simplificar todas essas possíveis configurações, podemos dividir os trocadores em três tipos:

- Fluxo Paralelo (fig 1.1a), com os dois fluidos escoando na mesma direção com uma parede entre eles.
- Fluxo em contra corrente (fig 1.1b), com construção semelhante ao de fluxo paralelo, mas com os fluidos escoando em direções opostas.
- Fluxo cruzado (fig 1.1c), com um fluido passando em uma direção perpendicular ao outro.

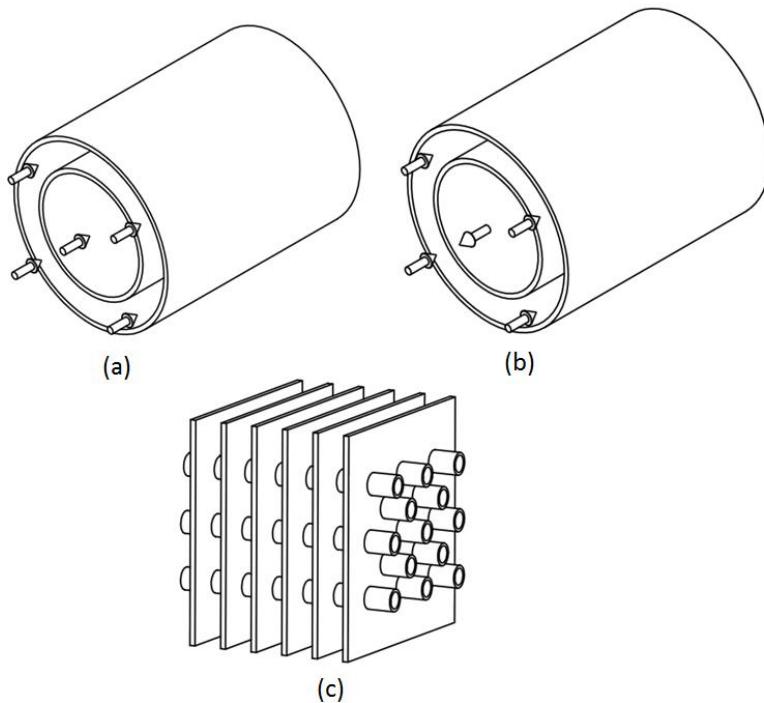


Figura 1.1 - Tipos de trocadores

A partir desses três modelos de trocadores podemos criar equipamentos mais complexos. Quando colocados em conjunto, seja uma combinação entre eles ou somente vários passes de mesma configuração, é possível criar equipamentos diferentes para aplicações mais específicas,

alcançando melhores características. Na fig. 1.2 a seguir, temos um trocador com uma combinação de fluxo cruzado e contra corrente.

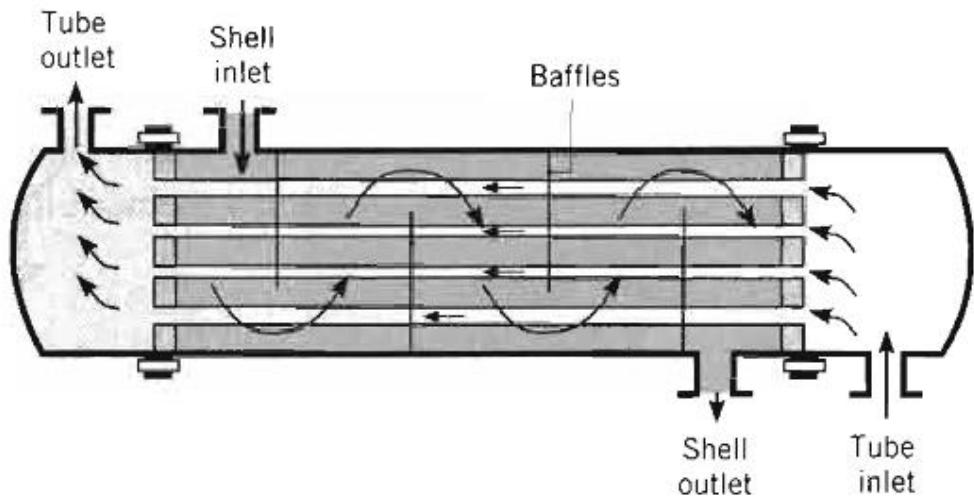


Figura 1.2 - Trocador “Cross-counterflow” (INCROPERA, 2008)

1.2. REGIME TRANSITÓRIO

O método mais simples de se estudar o comportamento de um equipamento, incluindo trocadores de calor, é estudando o comportamento em regime permanente. Nesse estado, as características do escoamento dentro do trocador de calor (Velocidade, pressão, densidade e etc.) variam somente com as coordenadas espaciais.

Um método mais complexo e que permite estudar melhor o comportamento do trocador é utilizando um regime transitório. Nesse estado, é possível incluir no modelo variações temporais das características do escoamento. Assim, é possível estudar não só o comportamento nas coordenadas espaciais, mas também como todas as variáveis do escoamento variam no tempo dado alguma variação temporal dessas variáveis.

Com esse estudo em regime transitório é possível analisar situações mais críticas do equipamento como em partidas da máquina, quando as

condições variam bastante e a dinâmica é bastante distante do regime permanente. Ou em condições de problemas de operação, quando ocorrem picos de temperatura ou pressão, gerando uma condição inadequada que mesmo que momentânea pode gerar complicações no processo.

2. OBJETIVOS

No trabalho de final de curso de Beato e Monte (2012) foram estudados o comportamento de dois desses tipos de trocadores fundamentais, em fluxo paralelo e em contra-corrente. No texto, as autoras encontraram um modelo matemático para essas configurações de trocadores e estudaram a resposta destes em regime transitório para variações de temperatura nas entradas.

Como complemento ao estudo citado, esse trabalho tem como objetivo principal analisar o comportamento de trocadores de calor em fluxo cruzado. Primeiramente será buscado um modelo adequado para o sistema e, a partir deste, realizado diversas simulações buscando a resposta para diversas situações de funcionamento. É importante notar que esse trabalho busca principalmente a resposta para um sistema transitório.

Com um modelo adequado, serão feitas simulações variando os diversos parâmetros do modelo para buscar uma otimização da resposta. Após essa etapa, será feito um estudo considerando as características construtivas de um trocador desse tipo incluindo características de equipamentos reais e levando em consideração o escoamento dos fluidos, característica bastante importante para se avaliar a troca de calor dentro de um trocador de fluxo cruzado. Devido a diversas hipóteses simplificadoras, essas características irão pouco influenciar o modelo teórico estudado a princípio.

Para resolver o problema real do trocador, considerando uma construção real deste equipamento, iremos realizar um estudo do escoamento através de softwares de dinâmica de fluidos computacional para encontrar um modelo um pouco mais próximo ao de modelos comerciais.

3. MODELO DE UM TROCADOR DE CALOR DE FLUXO CRUZADO

3.1. MODELO FÍSICO

Para encontrar o modelo matemático necessário, é necessário primeiramente definir um modelo físico a ser estudado. No caso do trocador em fluxo cruzado, será considerada uma chamada “célula” do trocador como a da figura 3.1.

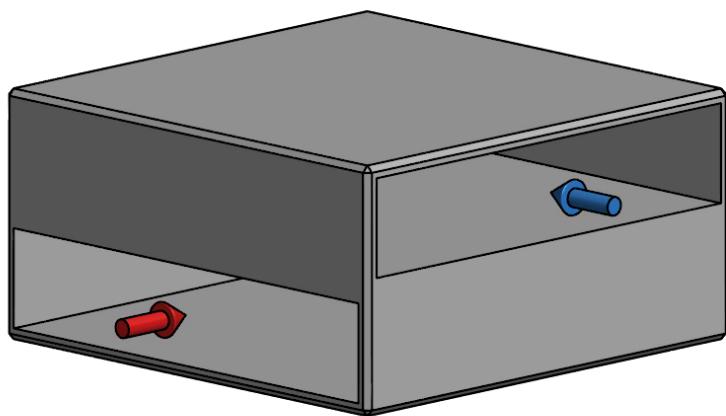


Figura 3.1 - Célula do trocador

Nessa célula, temos dois fluidos, denominados quente (índice h) e frio (índice c) escoando perpendicularmente entre si, separados por uma parede de dimensões e materiais bem definidos.

A figura 3.2 mostra um diagrama com as dimensões da célula e uma distribuição de temperaturas genéricas esperadas, onde já é possível denominar algumas variáveis importantes para o modelo.

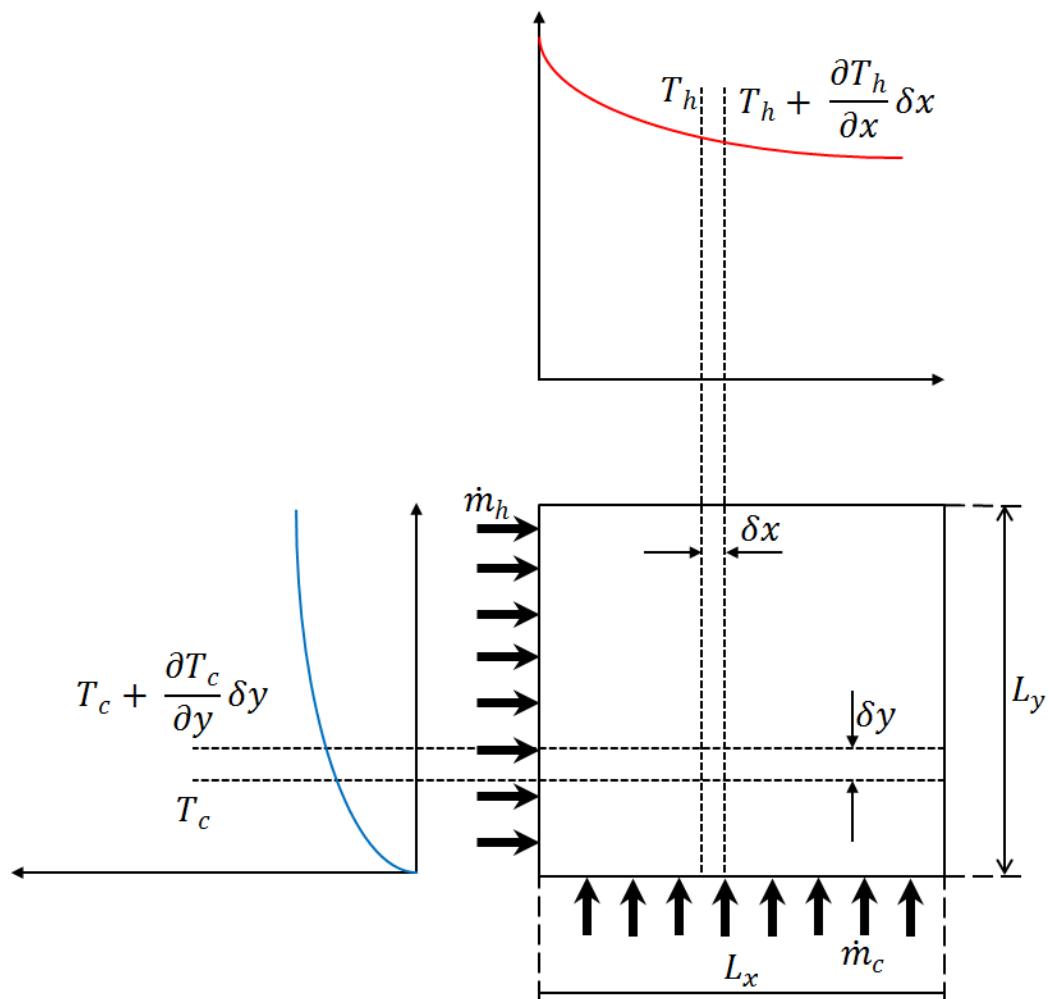


Figura 3.2 - Diagrama para o trocador de fluxo cruzado

Nesse modelo físico deveremos adicionar algumas hipóteses para o desenvolvimento adequado. São elas:

- Fluxo perpendicular de escoamento;
- Regime transitório;
- Armazenamento térmico na parede e nos fluidos;
- Troca de calor adiabática;
- Fluxo não misturado dentro da célula.

3.2. EQUACIONAMENTO

O equacionamento do sistema considerado será dado em três partes: O balanceamento energético do fluido quente, do fluido frio e da parede. No geral, o balanceamento será dado como a soma das energias que entram e saem da região considerada que será igualada ao armazenamento na região. Todos os cálculos dessa seção serão realizados tomando a partícula em destaque da figura 3.2.

Antes do equacionamento, são necessárias algumas definições:

$$\tilde{m} = \frac{\dot{m}\delta x}{u}$$

$$u = \frac{\delta x}{\delta t}$$

$$S = L_x L_y$$

Sendo:

\dot{m} → *Fluxo de massa instantâneo*

u → *Velocidade instantânea*

S → *Área de troca de calor*

3.2.1. BALANÇO DE ENERGIA NO FLUIDO QUENTE

No fluido quente, o balanço será dado pela diferença de energia contida no fluido na entrada e saída da célula, subtraído da energia transferida para a parede, tudo isso igualada a energia armazenada no fluido:

$[En. fluido quente na entrada - En. fluido quente na saída]$

$$- [Calor para a parede] = [En. armazenada no fluido quente]$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(\dot{m}_h \frac{\delta y}{L_y} \right) C_h T_h - \left(\dot{m}_h \frac{\delta y}{L_y} \right) C_h \left(T_h + T_h \frac{\partial T_h}{\partial x} \delta x \right) \right] - h_h (\delta x \delta y) (T_h - T_w) \\ &= \dot{m}_h \left(\frac{\delta y}{L_y} \right) C_h \frac{\partial T_h}{\partial t} \quad (3.1) \end{aligned}$$

Fazendo algumas transformações, chegamos à:

$$\frac{\partial T_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial T_h}{\partial x} = - \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} (T_h - T_w) \quad (3.2)$$

3.2.2. BALANÇO DE ENERGIA NA PAREDE

Na parede, o balanço energético terá alguns fatores exclusivos para a parede, na forma da condução de calor nas direções x e y, não existentes nos fluidos. O balanço geral será dado por:

$[Calor vindo do fluido quente - Calor saindo para fluido frio]$

$$- [Condução na dir. x + condução na dir. y]$$

$$= [En. armazenada na parede]$$

$$[h_h (\delta x \delta y) (T_h - T_w) - h_c (\delta x \delta y) (T_w - T_c)]$$

$$- \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda_x \left(A_x \frac{\delta y}{L_y} \right) \frac{\partial T_w}{\partial x} \delta x \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[-\lambda_y \left(A_y \frac{\delta x}{L_x} \right) \frac{\partial T_w}{\partial y} \delta y \right] \right\}$$

$$= M_w \left(\frac{\delta x \delta y}{L_x L_y} \right) C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (3.3)$$

Sendo:

$$M_w = \rho_w V_w$$

$$\hat{k} = \lambda \frac{AL}{V_w}$$

Teremos então:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} - \hat{k}_x \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} - \hat{k}_y \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2} = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) (T_h - T_w) - \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) (T_w - T_c) \quad (3.4)$$

3.2.3. BALANÇO DE ENERGIA NO FLUIDO FRIO

No fluido frio, temos um equacionamento bastante semelhante ao do fluido quente. Assim teremos:

$$[En. fluido frio na entrada - En. fluido frio na saída] \\ - [Calor para a parede] = [En. armazenada no fluido frio]$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(\dot{m}_c \frac{\delta y}{L_y} \right) C_c T_c - \left(\dot{m}_c \frac{\delta y}{L_y} \right) C_c \left(T_c + T_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \delta x \right) \right] - h_c (\delta x \delta y) (T_w - T_c) \\ &= \dot{m}_c \left(\frac{\delta y}{L_y} \right) C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (3.5) \end{aligned}$$

Fazendo as mesmas transformações do fluido quente:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} + u_c \frac{\partial T_c}{\partial y} = + \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} (T_w - T_c) \quad (3.6)$$

3.3. MODELO MATEMÁTICO

Com as equações definidas, podemos montar o sistema a ser resolvido:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial T_h}{\partial x} = - \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} (T_h - T_w) \\ \frac{\partial T_w}{\partial t} - \hat{k}_x \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} - \hat{k}_y \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2} = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) (T_h - T_w) - \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) (T_w - T_c) \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} + u_c \frac{\partial T_c}{\partial y} = + \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} (T_w - T_c) \end{cases} \quad (3.7)$$

O sistema da eq.(3.7) nos fornece uma solução geral (considerando as hipóteses utilizadas) para a dinâmica do trocador. A partir dele é possível considerar algumas simplificações. Na eq.(3.8) a seguir, temos um sistema quando desconsideradas variações temporais, ou seja, quando considerado um regime permanente.

$$\begin{cases} u_h \frac{\partial T_h}{\partial x} = - \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} (T_h - T_w) \\ \hat{k}_x \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} - \hat{k}_y \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2} = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) (T_h - T_w) - \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) (T_w - T_c) \\ + u_c \frac{\partial T_c}{\partial y} = + \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} (T_w - T_c) \end{cases} \quad (3.8)$$

Por fim, uma última variação, desta vez muito mais útil nesse estudo, onde retiramos os termos de condutividade térmica na parede (os termos de derivada segunda). Esse sistema se torna muito mais adequado devido à menor influência desses termos e ao fato de que uma solução numérica considerando esses termos seria muito mais complexa e demorada.

$$\boxed{\begin{cases} \frac{\partial T_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial T_h}{\partial x} = - \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} (T_h - T_w) \\ \frac{\partial T_w}{\partial t} = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) (T_h - T_w) - \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) (T_w - T_c) \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} + u_c \frac{\partial T_c}{\partial y} = + \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} (T_w - T_c) \end{cases}} \quad (3.9)$$

3.4. MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Para a solução do problema de trocadores de calor em fluxo cruzado existem alguns métodos diferentes na literatura. Aqui será feito um pequeno resumo destes métodos considerando suas características principais e eventuais problemas.

3.4.1. MÉTODO DE TRANSFORMADA DE LAPLACE

Romie (1983) e Chen (1991) formularam métodos de solução desse problema utilizando uma única transformada de Laplace considerando um sistema gás-gás com ambos os fluidos não misturados. Porém em ambos os textos foram necessárias hipóteses para se desprezar termos de capacidade térmica dos fluidos, impossibilitando uma solução completa do escoamento.

3.4.2. TRANSFORMADA DE LAPLACE THREEFOLD

Em dois textos, Spiga e Spiga (1987 e 1992) chegaram a soluções para o problema com perturbações de temperatura utilizando transformadas de Laplace Threefold. No primeiro (1987), assim como na solução comentada anteriormente, foram desprezados os termos de capacidade térmica no sistema gás-gás. Na publicação seguinte, os autores incluíram esses termos na solução do problema.

3.4.3. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Em sua publicação, Yamashita ET al. (1978) demonstrou uma solução do problema de fluxo cruzado utilizando o método de diferenças finitas para um escoamento com um só passe e variações na temperatura de um dos fluidos. Esse método se beneficia das capacidades

computacionais para simplificar o problema e permitir resolver inclusive problemas com mais de um passe sem um aumento significativo da complexidade da solução, embora possa necessitar um tempo razoável para a solução numérica em caso de malhas refinadas.

A partir dessas soluções encontradas na literatura, foi escolhido para este trabalho o uso dos métodos de diferenças finitas. Além da menor carga matemática necessária para o uso dessa solução, a capacidade computacional atual permite que o sistema considerado seja calculado em somente alguns minutos em um computador pessoal comum, mesmo com uma malha bastante refinada (suficiente para a solução adequada).

3.5. MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS

O método das diferenças finitas nos permite calcular o comportamento de sistemas dinâmicos através de um espaço discretizado aproximado do real que nos fornece uma solução, também aproximada, da resposta real. Apesar de não oferecer a solução exata, o erro intrínsico ao método pode ser controlado refinando a malha, ou seja, aumentando o número de pontos da discretização. Para a discretização do problema, as dimensões físicas serão divididas em pontos, tanto no espaço quanto no tempo. No caso do problema de trocadores de fluxo cruzado em regime transitório, será necessário a discretização de duas coordenadas espaciais além do tempo.

Nesse tipo de solução, serão calculados os estados e condições somente nesses pontos escolhidos. Assim, a transformação da solução discretizada será sempre aproximada da real. Em contrapartida, esse

método gera algumas facilidades no cálculo da resposta. A principal delas é a possibilidade de se substituir as derivadas do modelo matemático por diferenças entre dois dos pontos da malha.

Com a malha bem definida e a dificuldade das derivadas ultrapassada, o método permite calcular as condições de cada ponto no espaço em função de condições de instantes anteriores. Por esse motivo é importante deixarem claras as condições iniciais do problema, de onde partirão os cálculos iterativos nessa solução.

Porém, como todos os métodos este apresenta algumas dificuldades quando utilizado para o cálculo da resposta de um trocador deste tipo. Os principais problemas são:

- Espaço bidimensional do problema de fluxo cruzado gera uma malha muito maior que em uma solução para um trocador em fluxo paralelo ou contra corrente que só exige uma dimensão. Se realizada uma análise semelhante com um trocador de mesmo tamanho, no problema de fluxo cruzado teríamos uma malha com o quadrado de pontos.

- Devido aos erros derivados da discretização, temos de usar uma malha bastante refinada, ou seja, uma diferença muito pequena entre os pontos no espaço e, principalmente, no tempo. Isso gera problemas na simulação já que conforme as diferenças entre os pontos diminuem, o tempo gasto na simulação pode aumentar significativamente. Então é necessário um balanço considerando um menor erro possível com um dado tempo hábil de processamento.

3.5.1. DISCRETIZAÇÃO

Na modelagem do sistema, utilizamos a notação T_h , T_w e T_c para nos referir as temperaturas reais do fluido quente, da parede e do fluido frio,

respectivamente. Sabendo que essas temperaturas variam com as três dimensões do sistema, eles serão tal que:

$$\begin{cases} T_h = T_h(x, y, t) \\ T_w = T_w(x, y, t) \\ T_c = T_c(x, y, t) \end{cases}$$

Na discretização, conforme a fig. 3.3, temos a divisão da área definida por L_x e L_y em pontos distanciados entre si por Δx e Δy , nas suas respectivas direções. Nesses pontos, nomearemos as temperaturas de maneira diferente para deixar claro que se trata de um campo discretizado. Chamaremos as temperaturas no fluido quente, parede e fluido frio de θ_h , θ_w e θ_c , respectivamente.

Na fig. 3.3 a seguir, podemos ver a representação simplificada dos pontos da malha considerada para um instante qualquer k do tempo. Nesse exemplo, estão em destaque alguns pontos de θ_h , mas ela se estende para as outras temperaturas θ_w e θ_c . É importante notar que a coordenada i é o equivalente discreto ao avanço de x , analogamente para j com y e k com t .

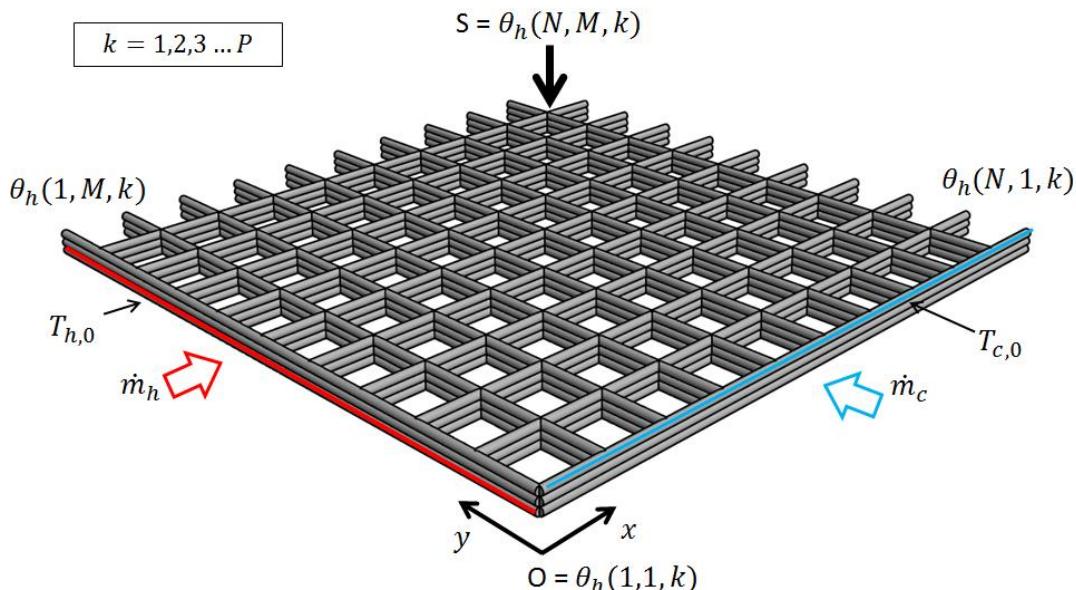


Figura 3.3 - Representação simplificada da malha para um tempo qualquer

Podemos então dizer que, no espaço discretizado:

$$\begin{cases} \theta_h = \theta_h(i, j, k) \\ \theta_w = \theta_w(i, j, k) \\ \theta_c = \theta_c(i, j, k) \end{cases}$$

Com:

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$j = 1, 2, \dots, M$$

$$k = 1, 2, \dots, P$$

E definindo N, M e P tal que:

$$N = L_x / \Delta x$$

$$M = L_y / \Delta y$$

$$P = T / \Delta t$$

Sabendo que $\Delta x, \Delta y$ e Δt são os intervalos entre os pontos discretizados e T é o tempo total de simulação.

Utilizando a temperatura no fluido quente como um exemplo, teremos três nomenclaturas para esta:

$$T_h(x, y, t) \rightarrow Solução\ real$$

$$T_h(x_i, y_j, t_k) \rightarrow Solução\ real\ num\ ponto\ onde\ existe\ um\ ponto\ discreto\ (i, j, k)$$

$$\theta_h(i, j, k) \rightarrow Solução\ aproximada\ no\ ponto\ discreto$$

3.5.2. MÉTODO DE APROXIMAÇÃO DE DERIVADAS

Em um modelo discretizado, o conceito de derivada se torna incoerente dado que o modelo só conta com pontos distantes de Δ entre si ao invéz de uma função contínua no espaço. Assim, para substituir funções

derivadas no mundo discreto se utiliza a teoria de séries de Taylor. Dela podemos retirar o seguinte:

$$T(x_i + \delta) = T(x_i) + \delta \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_i} + \frac{\delta^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x_i} + \frac{\delta^3}{3!} \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \Big|_{x_i} + \dots$$

$$\Leftrightarrow \delta \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_i} = T(x_i + \delta) - T(x_i) - \left(\frac{\delta^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x_i} + \frac{\delta^3}{3!} \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \Big|_{x_i} + \dots \right)$$

Nessa equação, δ é um termo suficientemente pequeno, o que permite fazer essa igualdade. Se o substituirmos por um Δx também suficientemente pequeno, podemos fazer que

$$\Leftrightarrow \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_i} = \frac{T(x_i + \Delta x) - T(x_i)}{\Delta x} - \left(\frac{\Delta x}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x_i} + \frac{\Delta x^2}{3!} \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \Big|_{x_i} + \dots \right) \quad (3.10)$$

Até então temos utilizado $T(x)$ como uma função contínua. Porém se analizarmos a equação 3.10 com x_i sendo um ponto pertencente a malha discretizada, sabemos que o ponto $(x_i + \Delta x)$ também pertencerá à malha. Com isso, podemos dizer que mesmo em uma malha discretizada, a aproximação seguinte será válida.

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_i \cong \frac{\theta(i+1) - \theta(i)}{\Delta x} + E(\Delta x^2) \quad (3.11)$$

Temos então um valor aproximado para a derivada com os pontos do espaço discretizados. É importante notar que essa aproximação inclui um erro $E(\Delta x^2)$ que dificilmente será encontrado dado que não temos como encontrar os valores das derivadas seguintes da função. Porém, como é possível verificar na equação 3.10, todos os termos incluídos nesse erro são função de pelo menos o quadrado da diferença Δx . Assim, o valor desse

erro poderá ser controlado utilizando um valor suficientemente pequeno para Δ , diminuindo seu valor frente aos outros termos da equação 3.11.

É importante considerar que embora seja importante escolher valores pequenos para Δ , um valor muito menor que o suficiente poderá gerar um tempo de processamento desnecessário.

Em alguns casos também podemos fazer uma modificação na equação 3.10, onde usamos $\delta = \Delta x$. Podemos também utilizar $\delta = -\Delta x$ para gerarmos o que é chamado de método de diferença reversa. Esse método será útil para que as simulações, que começam os cálculos nas regiões de condições de contorno sempre utilizem as temperaturas na parede durante o cálculo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x_i} &= \frac{-T(x_i - \Delta x) + T(x_i)}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\Big|_{x_i} - \frac{\Delta x^2}{3!} \frac{\partial^3 T}{\partial x^3}\Big|_{x_i} + \dots \\ \Leftrightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x}\Big|_i &\cong \frac{\theta(i) - \theta(i-1)}{\Delta x} + E'(\Delta x^2) \quad (3.12) \end{aligned}$$

Por fim, podemos fazer análises semelhantes para a coordenada y e também para o tempo t , gerando equações semelhantes às 3.11 e 3.12 com essas coordenadas.

3.5.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO AO PROBLEMA

Como já explicado, utilizaremos o método de diferenças finitas para calcular os estados do problema em pontos discretizados. As temperaturas $T_h(x, y, t)$, $T_w(x, y, t)$ e $T_c(x, y, t)$ serão aproximadas para as funções

$\theta_h(i, j, k)$, $\theta_w(i, j, k)$ e $\theta_c(i, j, k)$ e as derivadas do sistema original 3.9 serão aproximadas pelas equações 3.11 e 3.12.

Partindo do sistema original 3.9

$$\begin{cases} \frac{\partial T_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial T_h}{\partial x} = - \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} (T_h - T_w) \\ \frac{\partial T_w}{\partial t} = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) (T_h - T_w) - \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) (T_w - T_c) \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} + u_c \frac{\partial T_c}{\partial y} = + \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} (T_w - T_c) \end{cases}$$

Substituindo as funções T pelas funções θ :

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_h(i, j, k)}{\partial t} + u_h \frac{\partial \theta_h(i, j, k)}{\partial x} = - \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} (\theta_h(i, j, k) - \theta_w(i, j, k)) \\ \frac{\partial \theta_w(i, j, k)}{\partial t} = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) (\theta_h(i, j, k) - \theta_w(i, j, k)) - \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) (\theta_w(i, j, k) - \theta_c(i, j, k)) \\ \frac{\partial \theta_c(i, j, k)}{\partial t} + u_c \frac{\partial \theta_c(i, j, k)}{\partial y} = + \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} (\theta_w(i, j, k) - \theta_c(i, j, k)) \end{cases}$$

Denominaremos as seguintes constantes:

$$\begin{cases} E = \left(\frac{h_h S}{\dot{m}_h C_h} \right) \frac{u_h}{L_x} \\ F = \left(\frac{h_h S}{M_w C_w} \right) \\ G = \left(\frac{h_c S}{M_w C_w} \right) \\ H = \left(\frac{h_c S}{\dot{m}_c C_c} \right) \frac{u_c}{L_y} \end{cases}$$

Substituindo essas constantes e as derivadas temporais conforme a equação 3.11

$$\begin{cases} \frac{\theta_h(i,j,k+1) - \theta_h(i,j,k)}{\Delta t} + u_h \frac{\partial \theta_h(i,j,k)}{\partial x} = -E.(\theta_h(i,j,k) - \theta_w(i,j,k)) \\ \frac{\theta_w(i,j,k+1) - \theta_w(i,j,k)}{\Delta t} = F.(\theta_h(i,j,k) - \theta_w(i,j,k)) - G.(\theta_w(i,j,k) - \theta_c(i,j,k)) \\ \frac{\theta_c(i,j,k+1) - \theta_c(i,j,k)}{\Delta t} + u_c \frac{\partial \theta_c(i,j,k)}{\partial y} = H.(\theta_w(i,j,k) - \theta_c(i,j,k)) \end{cases}$$

Trocando as derivadas parciais conforme 3.12

$$\begin{cases} \frac{\theta_h(i,j,k+1) - \theta_h(i,j,k)}{\Delta t} + u_h \left(\frac{\theta_h(i,j,k) - \theta_h(i-1,j,k)}{\Delta x} \right) = -E.(\theta_h(i,j,k) - \theta_w(i,j,k)) \\ \frac{\theta_w(i,j,k+1) - \theta_w(i,j,k)}{\Delta t} = F.(\theta_h(i,j,k) - \theta_w(i,j,k)) - G.(\theta_w(i,j,k) - \theta_c(i,j,k)) \\ \frac{\theta_c(i,j,k+1) - \theta_c(i,j,k)}{\Delta t} + u_c \left(\frac{\theta_c(i,j,k) - \theta_c(i,j-1,k)}{\Delta y} \right) = H.(\theta_w(i,j,k) - \theta_c(i,j,k)) \end{cases}$$

Organizando melhor as equações para facilitar a implementação na simulação chegaremos às equações:

- Fluido quente

$$\theta_h(i,j,k+1) = \theta_h(i,j,k) + \Delta t. \left[-u_h \left(\frac{\theta_h(i,j,k) - \theta_h(i-1,j,k)}{\Delta x} \right) - E.(\theta_h(i,j,k) - \theta_w(i,j,k)) \right] \quad (3.13)$$

- Parede

$$\theta_w(i,j,k+1) = \theta_w(i,j,k) + \Delta t. [F.(\theta_h(i,j,k) - \theta_w(i,j,k)) - G.(\theta_w(i,j,k) - \theta_c(i,j,k))] \quad (3.14)$$

- Fluido frio

$$\theta_c(i,j,k+1) = \theta_c(i,j,k) + \Delta t. \left[-u_c \left(\frac{\theta_c(i,j,k) - \theta_c(i,j-1,k)}{\Delta y} \right) + H.(\theta_w(i,j,k) - \theta_c(i,j,k)) \right] \quad (3.15)$$

Enfim com as equações devidamente discretizadas, podemos começar as simulações do comportamento do sistema. Nas equações de 3.13 a 3.15 podemos calcular um termo da temperatura referente ao um tempo $k+1$ somente termos das temperaturas em um tempo k . Com isso podemos calcular gradativamente todas as temperaturas em todos os pontos do sistema desde que tenhamos um mapa inicial de temperaturas, em que usaremos a condição inicial do sistema. Também serão necessárias algumas hipóteses para adequar a simulação:

- No instante $t = 0$ ($k = 1$) se inicia o escoamento do fluido quente dentro do trocador;
- Nesse mesmo instante se inicia a troca de calor entre os fluidos e a parede;
- O escoamento do fluido quente é suficientemente rápido para se desprezar as condições transientes nos momentos iniciais do escoamento dentro do trocador. Com essa hipótese poderemos calcular o comportamento do sistema como se o fluido já passasse pelo trocador mas a troca de calor só se iniciasse em $t = 0$ ($k = 1$);
- No instante inicial, a temperatura dos fluidos e da parede é igual em toda a extensão da superfície de troca;

$$\theta_h(i, j, 1) = T_{h,0}, \quad \text{para qualquer } i, j$$

$$\theta_w(i, j, 1) = T_{w,0}, \quad \text{para qualquer } i, j$$

$$\theta_c(i, j, 1) = T_{c,0}, \quad \text{para qualquer } i, j$$

- Em todos os instantes, a temperatura na entrada do fluido quente ($y = 0, j = 1$) será a temperatura de entrada do fluido (No caso, igual a temperatura inicial) e a temperatura na entrada do fluido frio ($x = 0, i = 1$) será a temperatura de entrada no fluido frio, conforme o mostrado na fig. 3.3

$$\theta_h(i, 1, k) = T_{h,0}, \quad \text{para qualquer } i, k$$

$$\theta_c(1, j, k) = T_{c,0}, \quad \text{para qualquer } j, k$$

4. SIMULAÇÕES DO COMPORTAMENTO DO MODELO

A partir do sistema encontrado na seção anterior (eqs. 3.13, 3.14 e 3.15), iremos agora iniciar as simulações através de um programa desenvolvido no software MATLAB (código no apêndice A). Neste programa foi necessária a definição de algumas constantes do problema listadas na tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Parâmetros do problema

h_h	2800	$W/(m^2.K)$	u_h	2	m/s	T	10.0	s
h_c	3100	$W/(m^2.K)$	u_c	3	m/s	Δx	0.0002	m
C_h	2200	$J/(kg.K)$	\dot{m}_h	0.3	kg/s	Δy	0.005	m
C_c	4180	$J/(kg.K)$	\dot{m}_c	0.4	kg/s	Δt	0.005	s
C_w	900	$J/(kg.K)$	M_c	0.864	kg			
T_{hzero}	373	K	Lx	0.4	m			
T_{wzero}	313	K	Ly	0.4	m			
T_{czero}	303	K	S	0.64	m^2			

Em análises posteriores, poderemos modificar algumas dessas constantes a fim de visualizar a diferença de resposta gerada em função da variação de uma constante específica.

- Devido ao problema da temperatura em um trocador de fluxo cruzado depender de três coordenadas (x, y e t), a representação gráfica da resposta se torna difícil sem uma mídia de vídeo ou animação. Mesmo em um gráfico tridimensional, só temos como representar em papel um gráfico de T por x e y, ou quaisquer duas coordenadas. Por isso, para apresentar os resultados encontrados, teremos que utilizar alguns meios não convencionais, que serão explicados conforme a necessidade.

4.1. CONDIÇÕES INICIAIS

No instante inicial, as temperaturas são tais quais as seguintes superfícies:

- Temperatura do fluido quente (θ_h) na superfície de troca

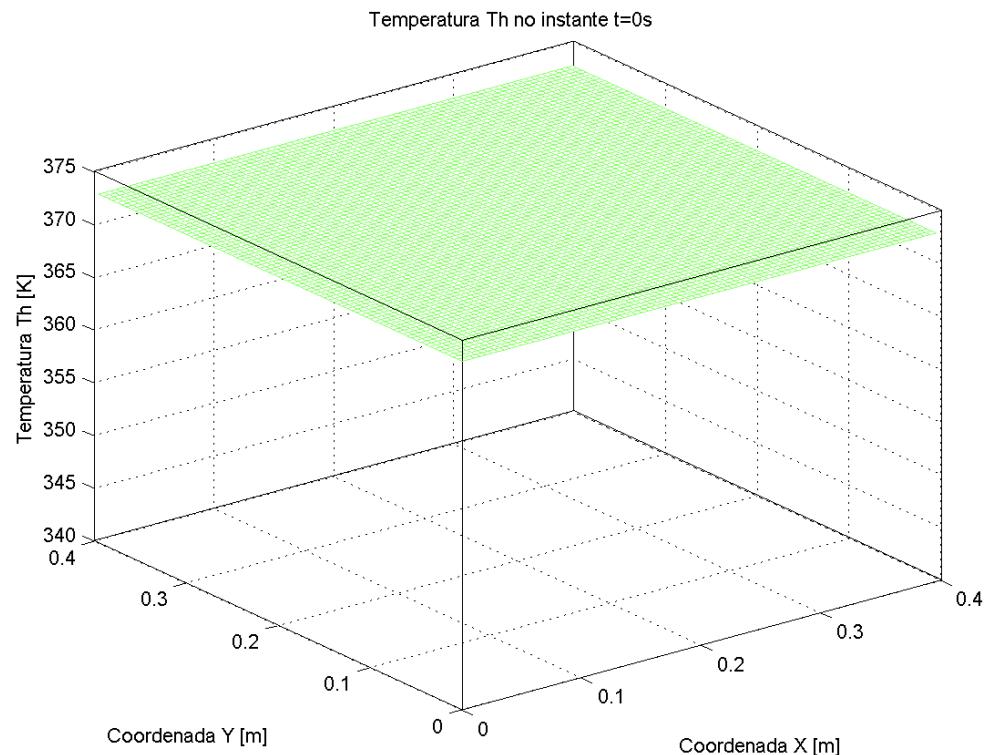


Figura 4.1 - Condição inicial de Th

- Temperatura do fluido frio (θ_c) na superfície de troca

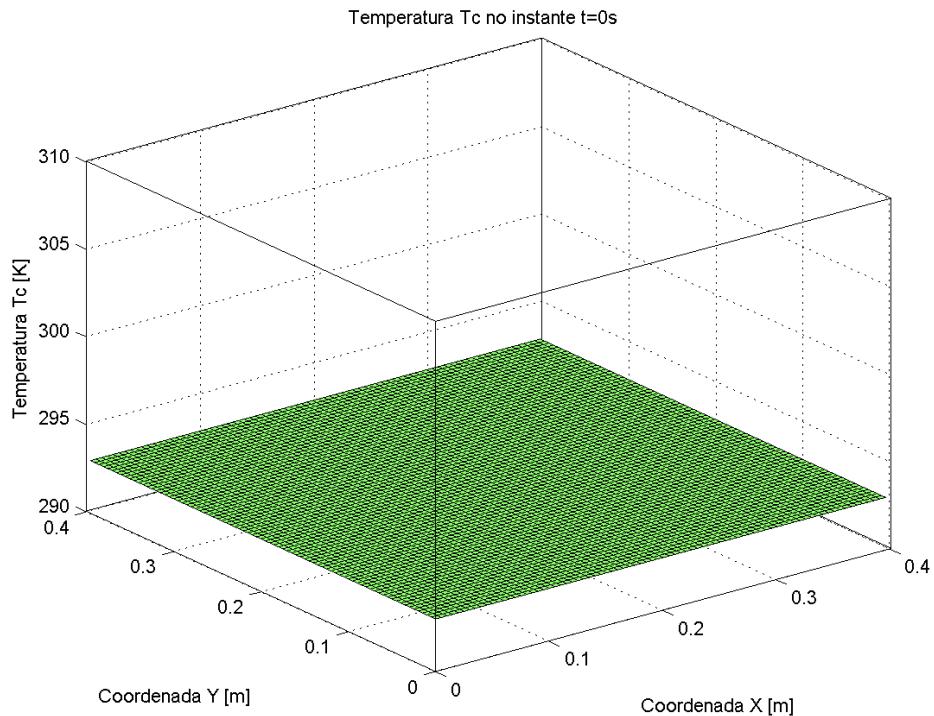


Figura 4.2 - Condição inicial de Tc

- Temperatura da parede (θ_w) na superfície de troca

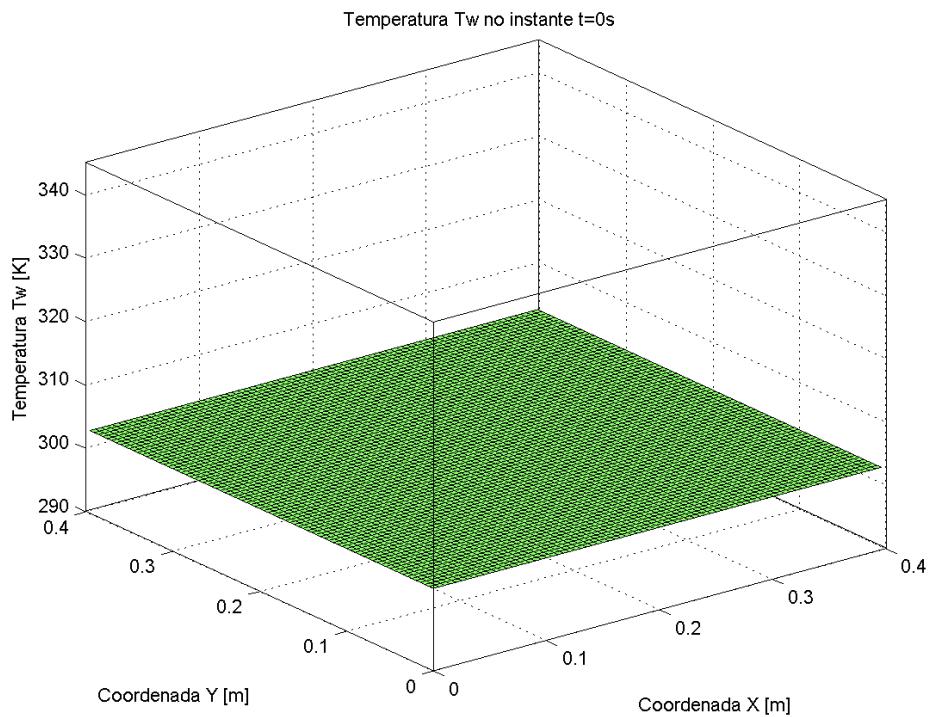


Figura 4.3 - Condição inicial de Tw

4.2. RESPOSTA NO TEMPO

Para representar a resposta no tempo precisaremos utilizar uma das maneiras não convencionais. Na fig. 4.4 a seguir, podemos ver um esquema de cortes na malha que será utilizado tanto nessa seção quanto na próxima para representar as condições finais.

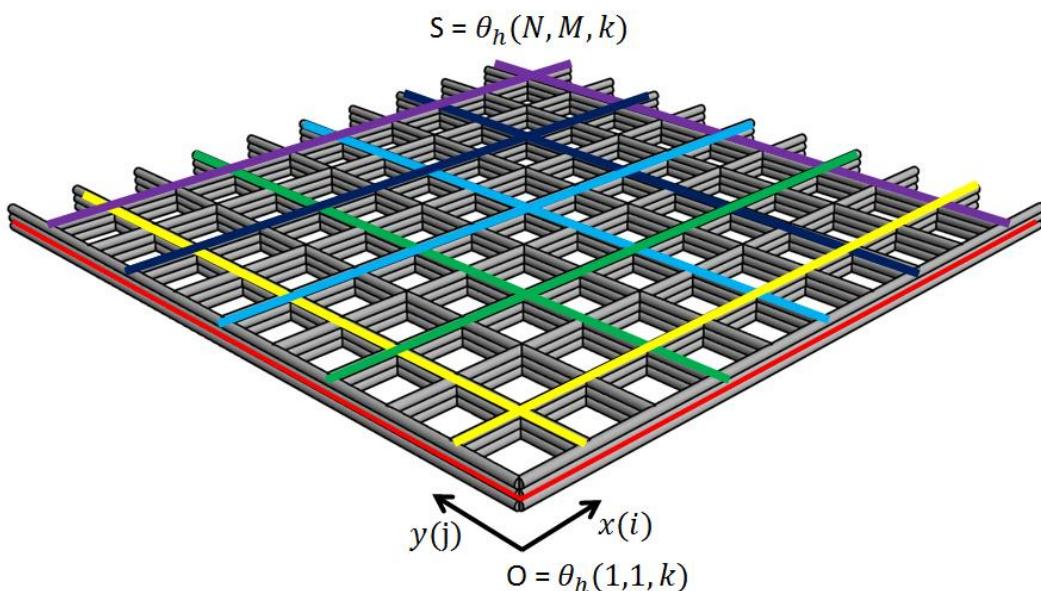


Figura 4.4 - Representação dos cortes da superfície

Para mostrar a resposta das temperaturas no tempo, utilizaremos os cortes paralelos à direção do escoamento do fluido que queremos representar. No caso, utilizaremos os cortes coloridos na fig. 4.4 paralelos ao eixo x para mostrar condições relevantes ao fluido quente (que escoa paralelo ao eixo x) e os cortes coloridos paralelos ao eixo y para condições do fluido frio. Para a representação da variação da temperatura da parede com o tempo, utilizaremos dois gráficos, com os dois tipos de corte já que esta temperatura não varia com uma direção principal, mais relevante que a outra. Os cortes paralelos a x serão denominados conforme a fig. 4.5.

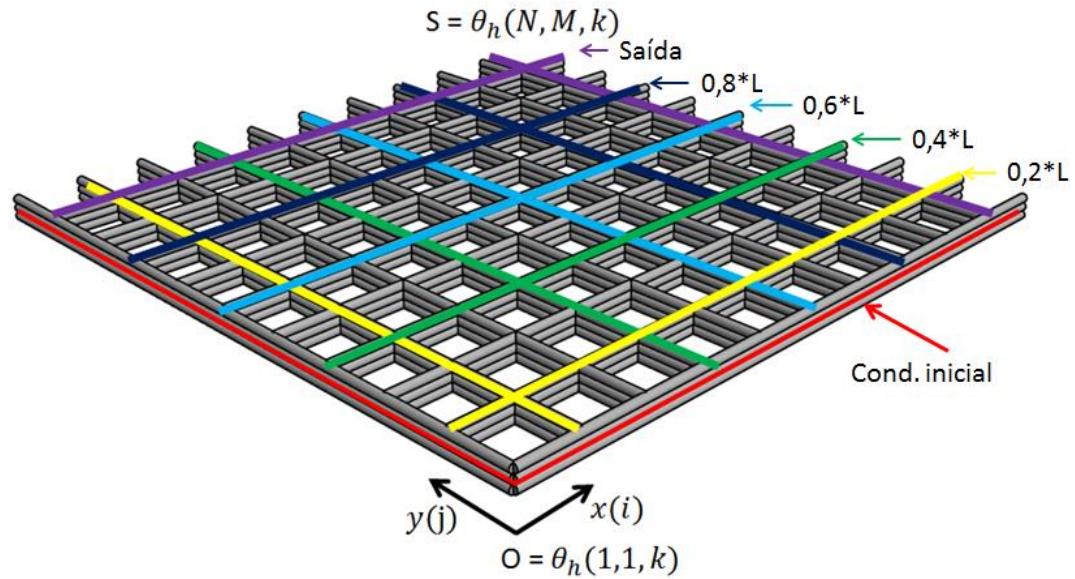


Figura 4.5 - Denominação dos cortes paralelos ao eixo X

De maneira análoga, os cortes paralelos a y serão tais como na fig. 4.6 a seguir.

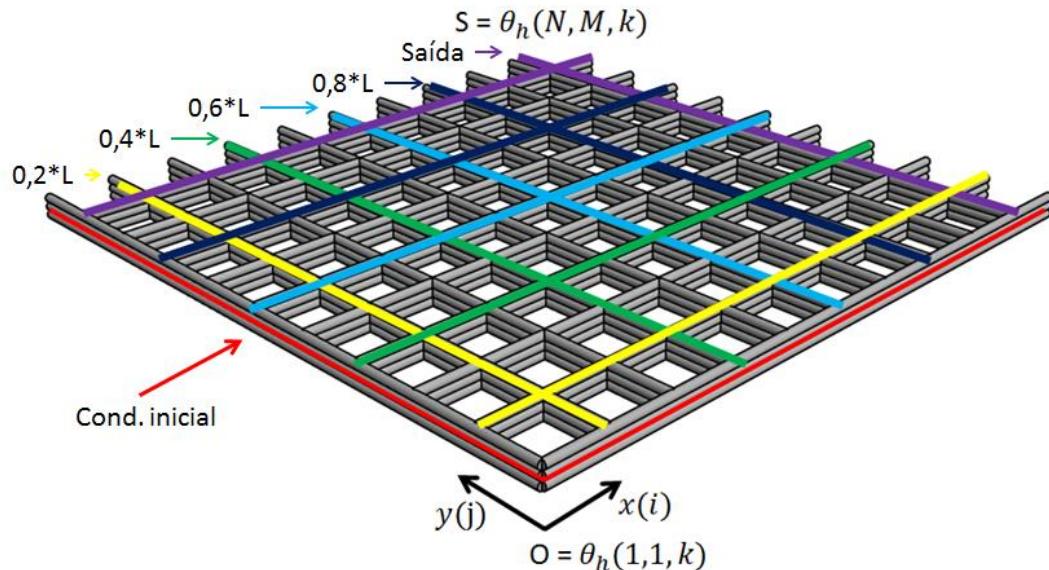


Figura 4.6 - Denominação dos cortes paralelos ao eixo Y

- Variação da temperatura θ_h com o tempo

No gráfico a seguir, foi representada a variação da temperatura θ_h com o tempo em 6 pontos. Esses pontos são os últimos pontos de cada

corte da fig. 4.5 e com isso podemos representar a variação da temperatura de saída do fluido quente em coordenadas diferentes do espaço de saída.

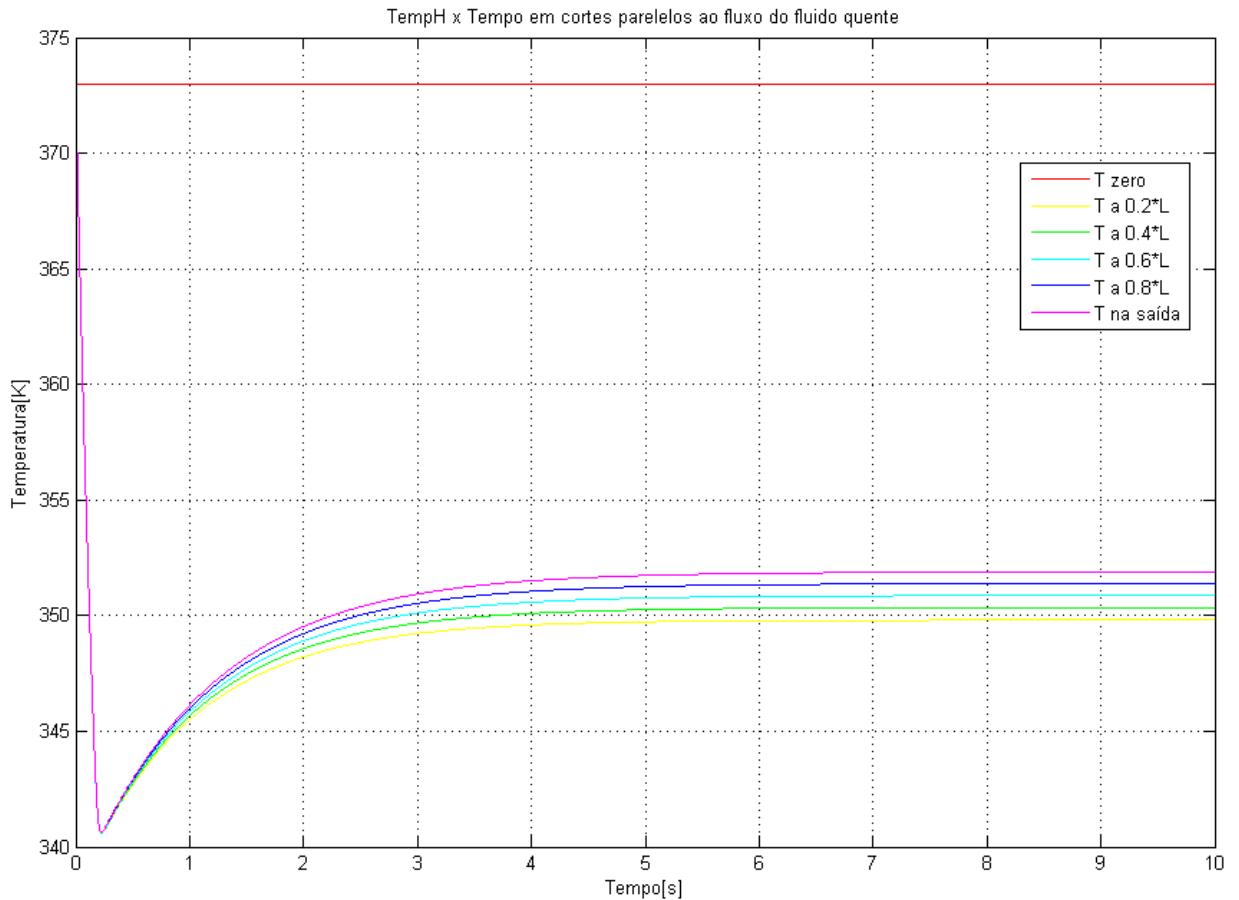


Figura 4.7 - Resposta de T_h no tempo em diferentes pontos

Nesse gráfico, podemos notar que o comportamento geral do sistema não se diferencia muito do comportamento encontrado por Beato e Monte (2012) para os outros modelos de trocadores. É notável que nos instantes iniciais existe uma queda brusca na temperatura do fluido quente devido à diferença grande de temperaturas do fluido quente e da parede. Essa queda brusca inclusive faz com que a temperatura fique por alguns instantes abaixo da temperatura de regime do sistema. Após esse período de queda, o sistema irá bem mais lentamente para uma temperatura de regime.

Também é importante notar a diferença de temperatura entre os pontos medidos. Como era de se esperar, o ponto medido mais próximo à entrada do fluido frio (a curva amarela) irá entrar em regime em uma temperatura ligeramente menor, que é crescente conforme o ponto medido se afasta da entrada do fluido frio.

- Variação da temperatura θ_c com o tempo

No gráfico a seguir, foi representada a variação da temperatura θ_c com o tempo em 6 pontos. Esses pontos são os últimos pontos de cada corte da fig. 4.6 e com isso podemos representar a variação da temperatura de saída do fluido quente em coordenadas diferentes do espaço de saída.

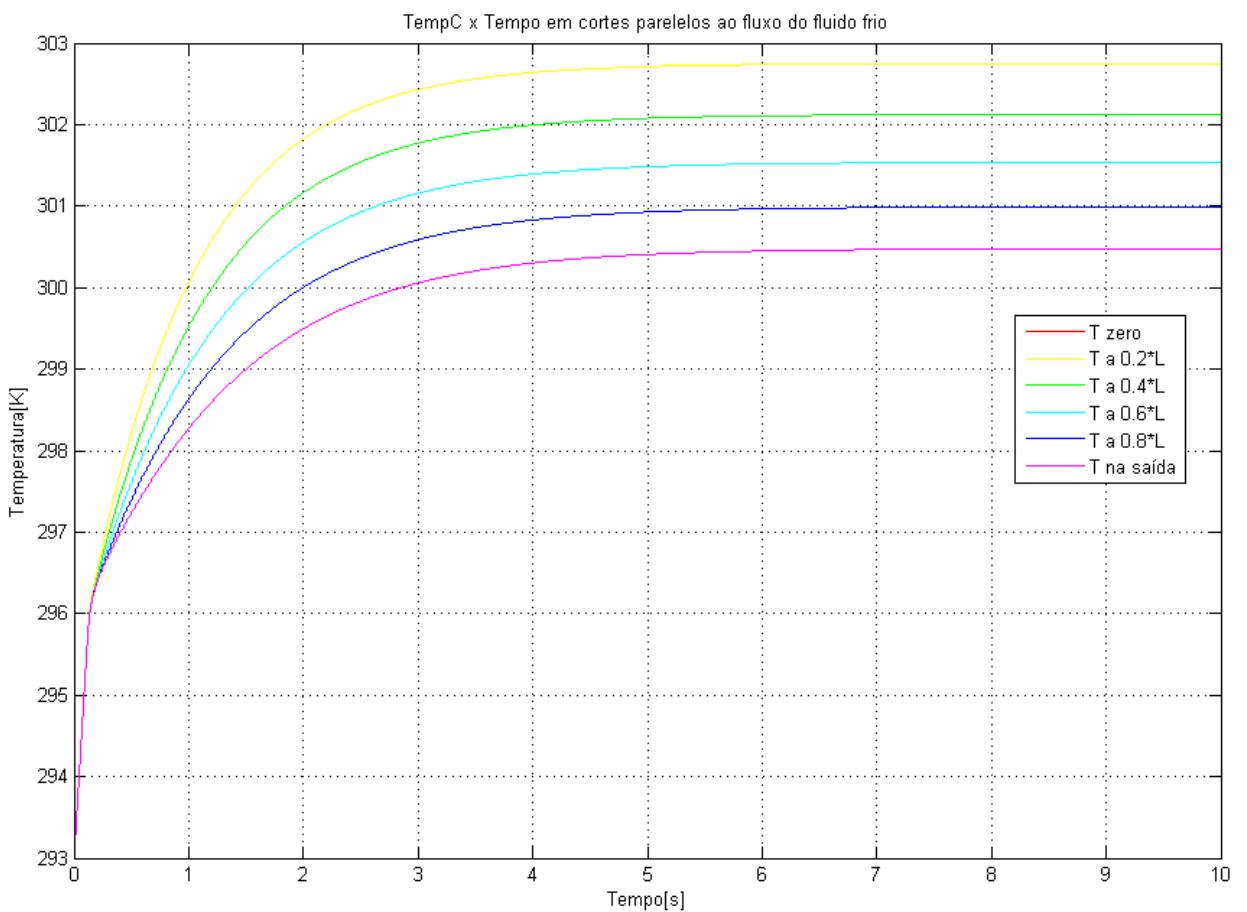


Figura 4.8 - Resposta de T_c no tempo em diferentes pontos

Assim como para o fluido quente, a resposta geral do fluido frio também tem um formato parecido com o de outros modelos de trocador. Em um primeiro momento, um aumento rápido da temperatura devido à diferença de temperaturas entre o fluido frio e a parede e após essa faixa, uma variação gradual até as temperaturas entrarem em regime.

Enfim, nesse gráfico também aparece uma diferença de temperaturas de regime encontrada para cada ponto considerado, em função da distância da entrada do fluido quente. Nesse gráfico, a curva em amarelo representa o ponto medido mais próximo à entrada do fluido quente e, conforme o esperado, entra em regime em uma temperatura maior que a dos outros pontos.

- Variação da temperatura θ_w com o tempo

Para a representação da temperatura da parede, serão apresentados dois gráficos distintos. No primeiro, será apresentada a resposta da temperatura com o tempo medidas nos pontos da fig. 4.5 (em cortes paralelos ao eixo x). No segundo gráfico, serão representadas medidas feitas nos pontos da fig. 4.6 (em cortes paralelos ao eixo y)

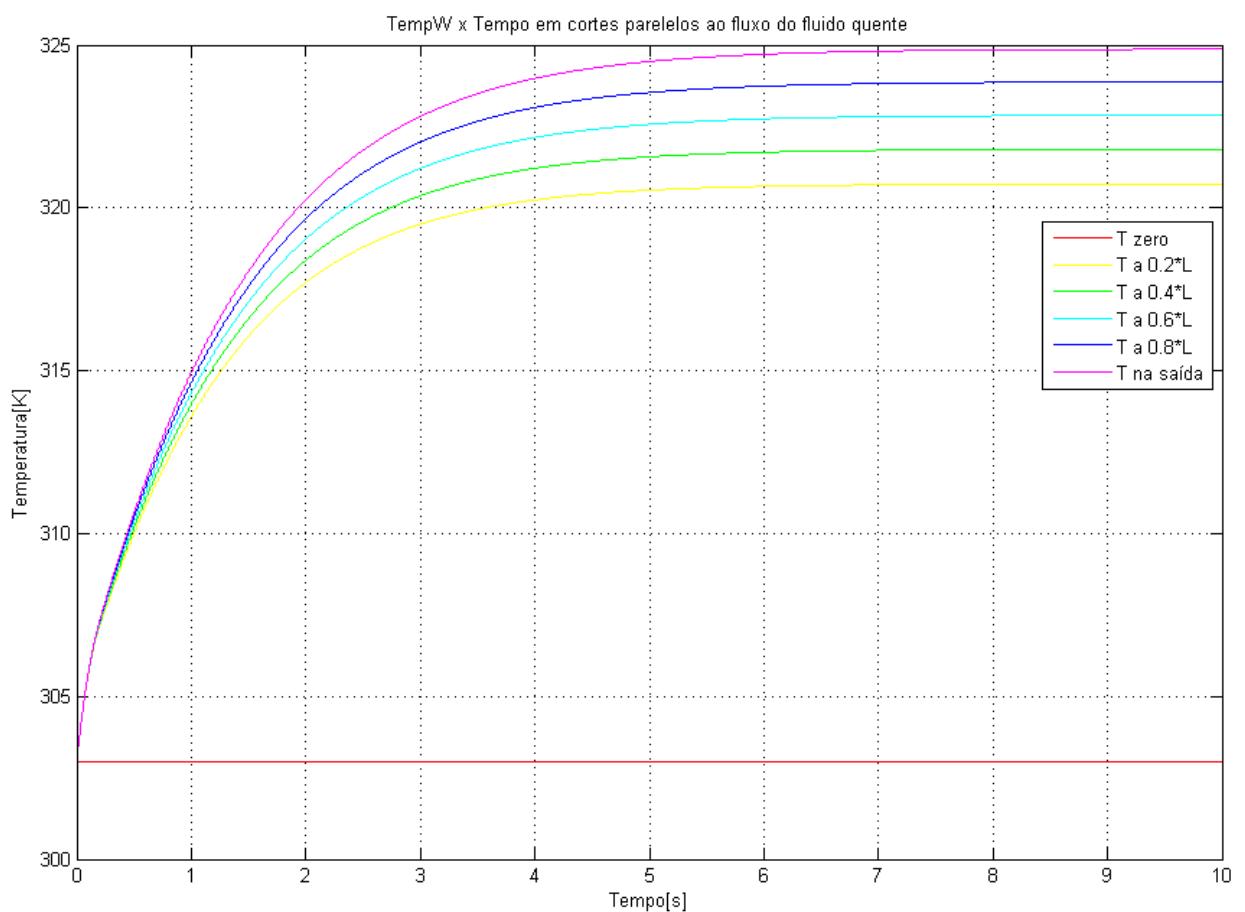


Figura 4.9 - Resposta de T_w no tempo em cortes paralelos ao eixo X

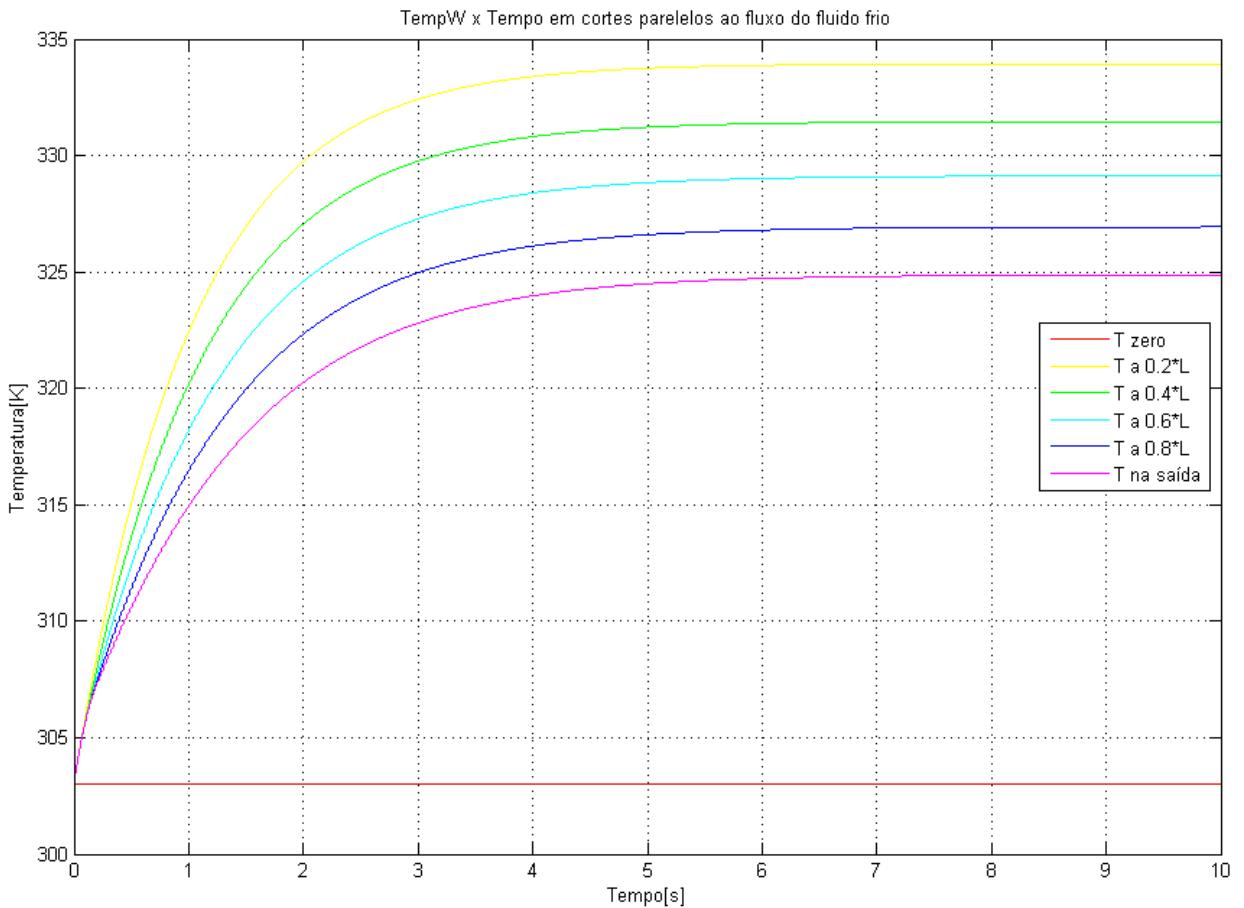


Figura 4.10 - Resposta de T_w no tempo em cortes paralelos ao eixo Y

Nesses dois gráficos, fica claro que a temperatura θ_w não sofre de uma diferença brusca nos instantes iniciais, diferente do que acontece com os dois fluidos. Isso nos indica que é a temperatura da parede que tem a maior influência no comportamento de todo o sistema. Enquanto a temperatura de um fluido difere bastante da temperatura da parede, essa irá sofrer uma variação grande da temperatura.

- Comparação das temperaturas e resposta no tempo

Nesse ultimo gráfico foi feita a comparação das temperaturas θ_h , θ_w e θ_c em um unico gráfico. Nesse caso, foi considerada as temperaturas medidas

somente no ultimo ponto da malha (com $i = N$ e $j = M$; também representado pelas curvas roxas dos gráficos anteriores). Nesse gráfico podemos ver o comportamento das três temperaturas em conjunto para uma melhor comparação.

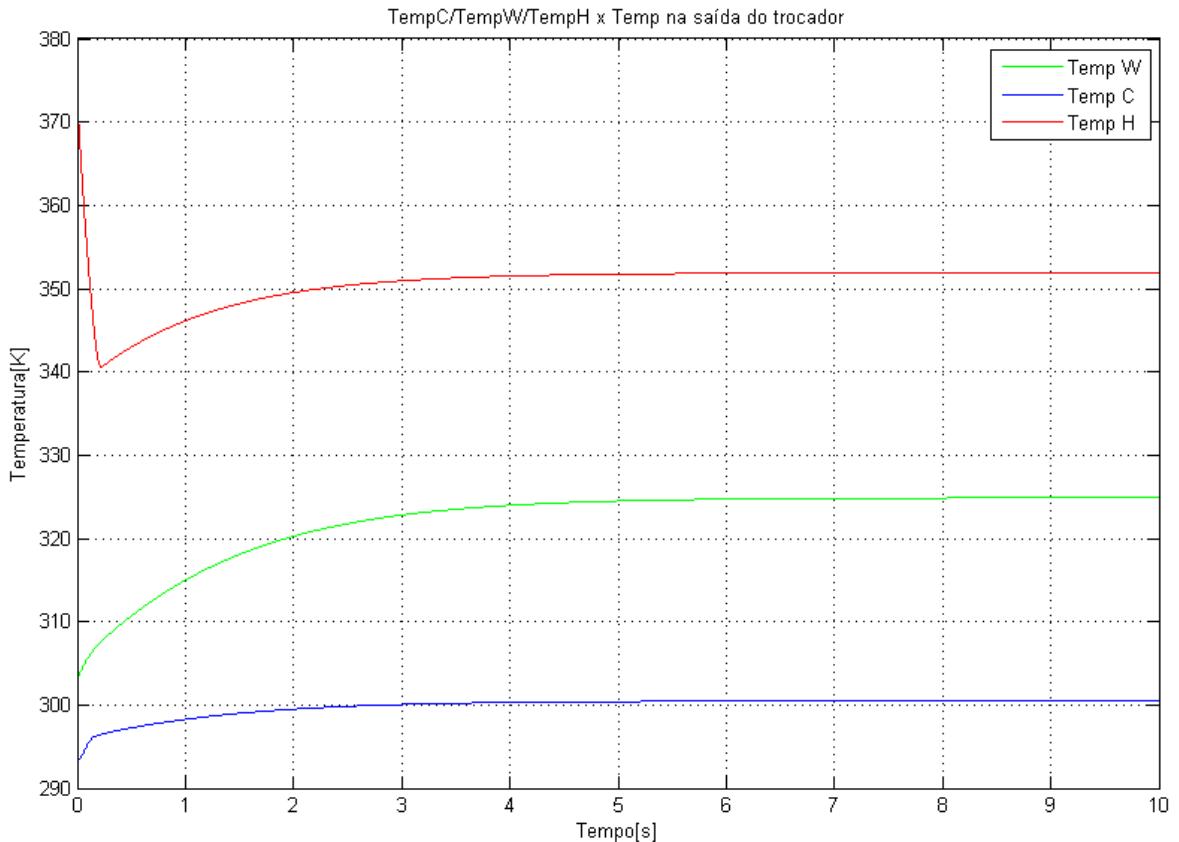


Figura 4.11 - Comparação de Th, Tw e Tc no tempo.

Na fig. 4.11 podemos notar que o sistema entra em regime em pouco menos de 6s. Como pode ser visto nos gráficos anteriores, a curva roxa (sempre medida no ponto mais distante da origem) é sempre a mais demorada para entrar em regime. Como esse ultimo gráfico sempre leva em consideração essas medidas, podemos afirmar que esse será o tempo máximo para que o sistema todo entre na temperatura final em regime permanente.

4.3. CONDIÇÕES FINAIS

No instante final de simulação ($T = 10s$), quando o sistema já está em regime, os mapas de temperaturas serão conforme os seguintes:

- Temperatura do fluido quente (θ_h) na superfície de troca

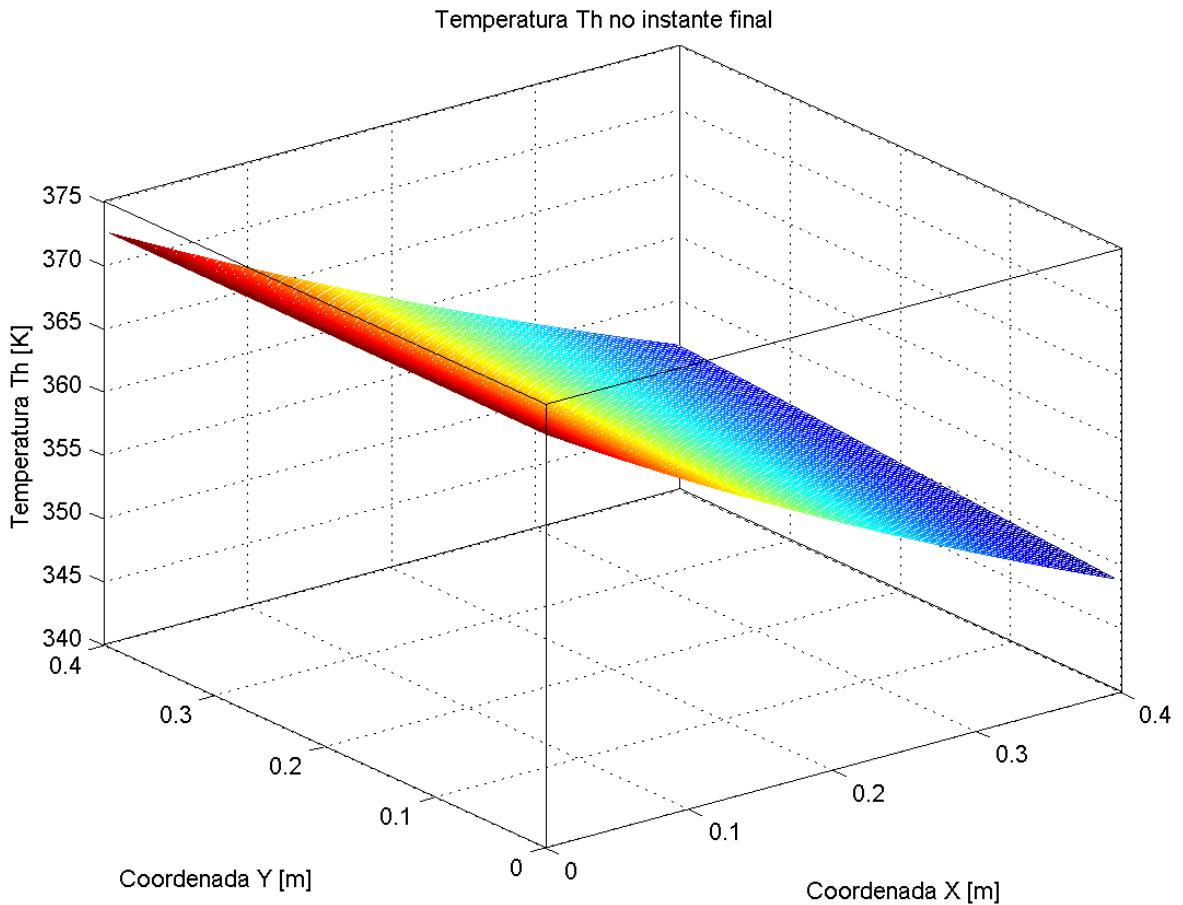


Figura 4.12 - Mapa de Th no instante final da simulação

Representando essa mesma curva da fig. 4.11 em cortes conforme as linhas coloridas da fig. 4.5, podemos representar as temperaturas do fluido frio no ultimo instante de simulação da seguinte maneira

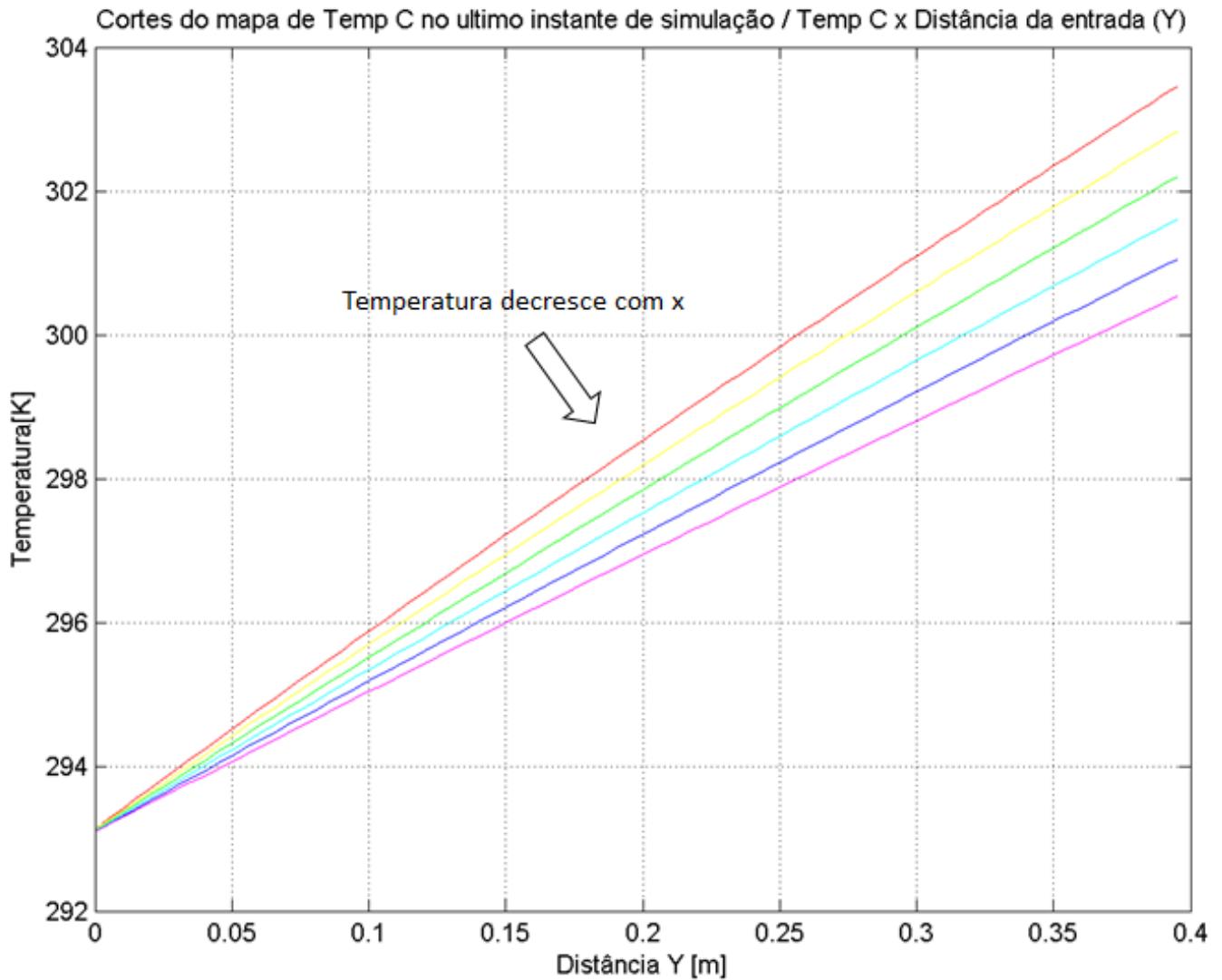


Figura 4.13 - Cortes do mapa de Th no instante final

Como já esperado, mesmo em regime, pontos mais próximos à entrada do fluido frio (curva vermelha) possuem as menores temperaturas.

- Temperatura do fluido frio (θ_c) na superfície de troca

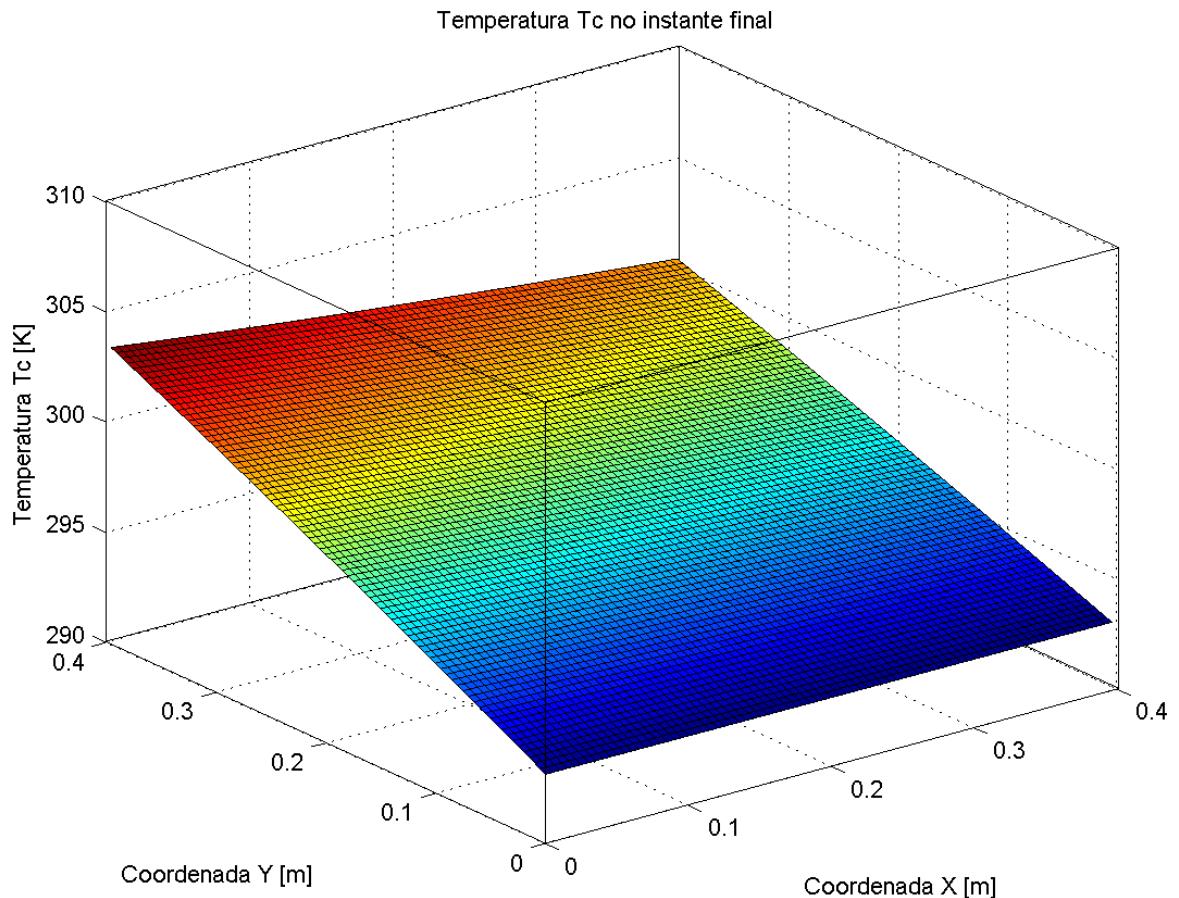


Figura 4.14 - Mapa de Tc no instante final

Assim como fizemos para o fluido quente, podemos representar esse mapa como diversos cortes, dessa vez cortes paralelos ao eixo Y conforme as retas coloridas da fig. 4.6.

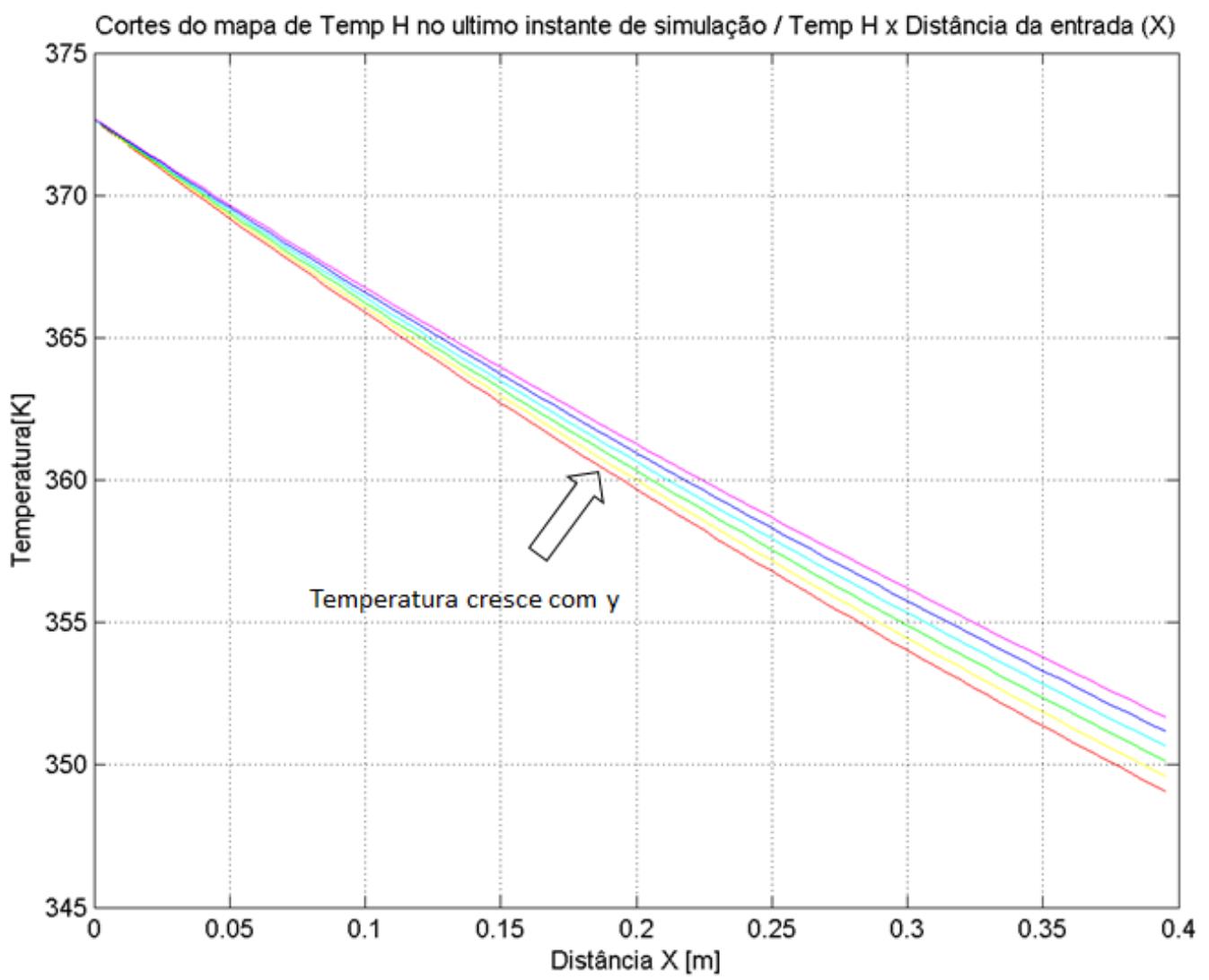


Figura 4.15 - Cortes do mapa de Th no instante final

Também como esperado, pontos medidos próximos à entrada do fluido quente (curva vermelha) possuem temperaturas mais altas em regime.

- Temperatura da parede (θ_w) na superfície de troca

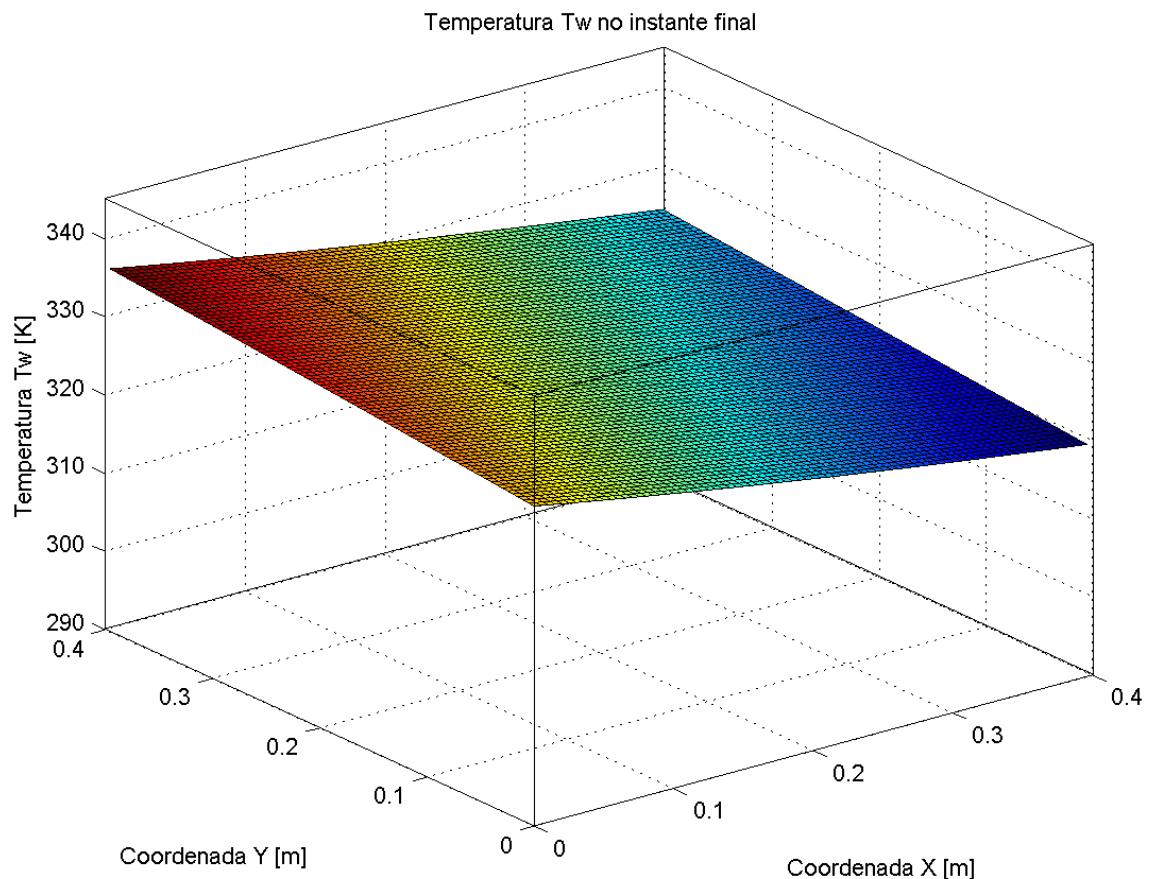


Figura 4.16 - Mapa de T_w no instante final

Como nos outros casos, podemos representar esse mapa em cortes na direção X

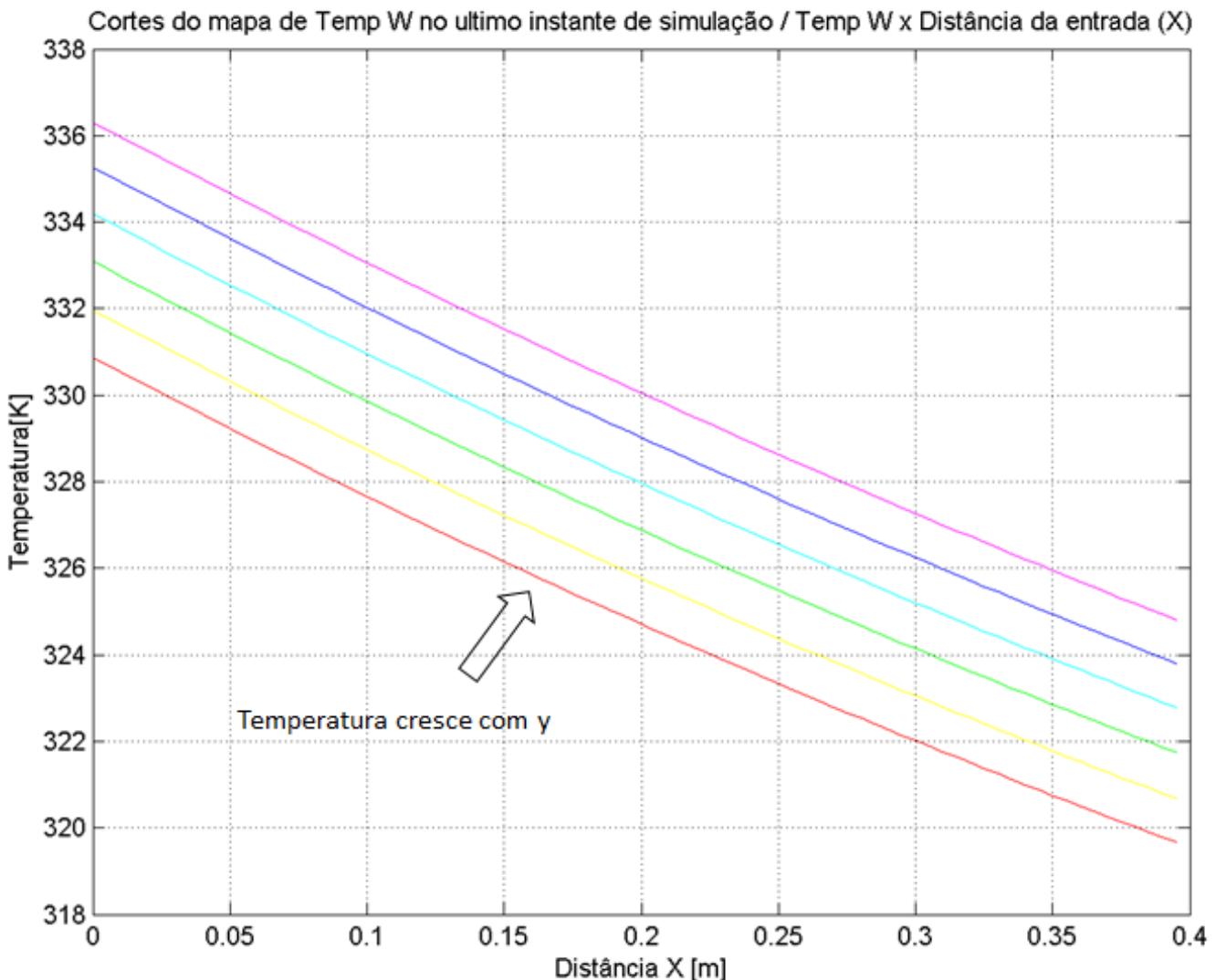


Figura 4.17 - Corte do mapa de Tw no instante final (Direção x)

Assim como podemos representar com cortes na direção y

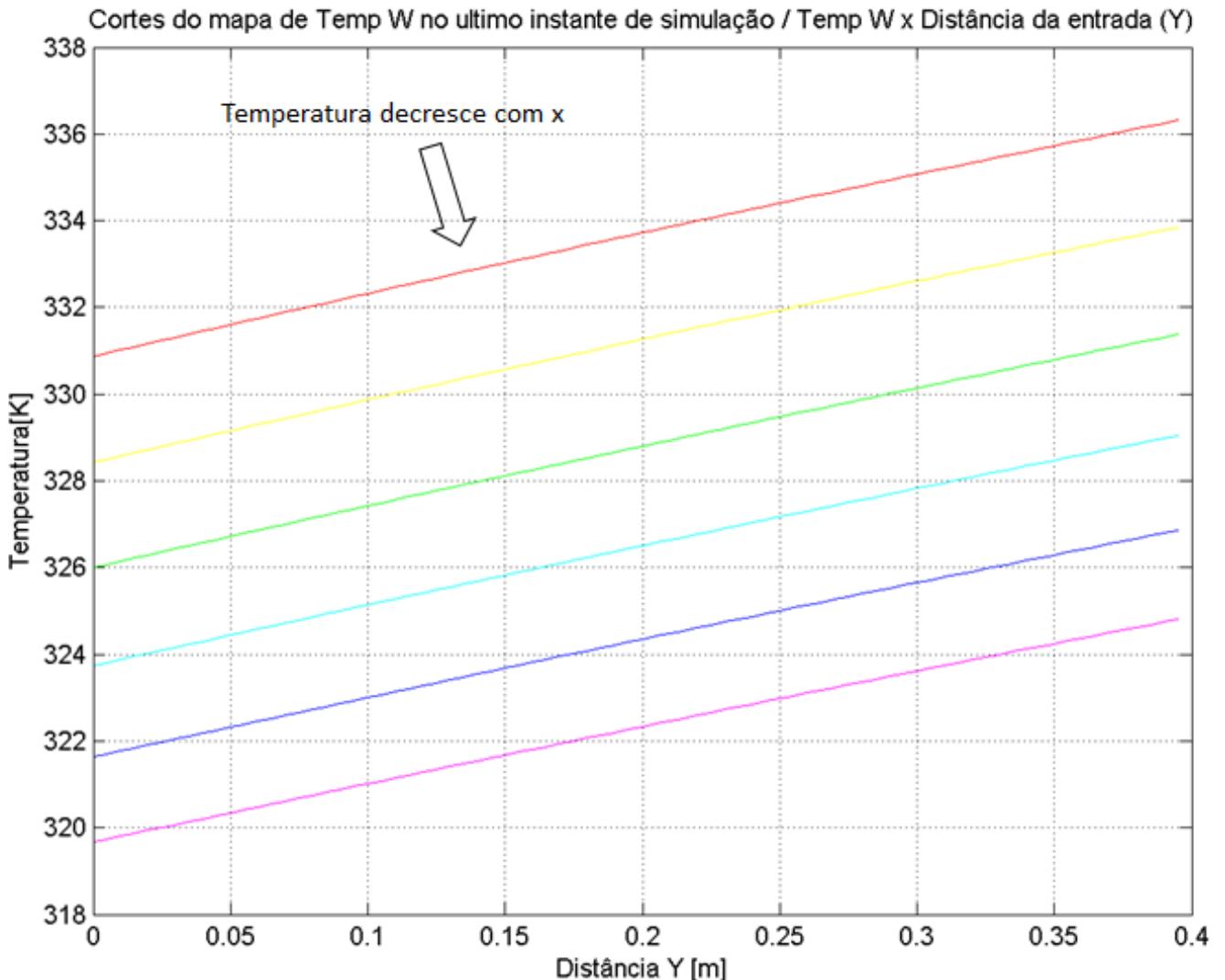


Figura 4.18 - Corte do mapa de Tw no instante final (Direção y)

4.4. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS

Nessa seção, incluiremos algumas comparações de respostas variando alguns dos parâmetros da tabela 4.1. Essas relações serão encontradas a partir de um gráfico de comparação das três temperaturas em função do tempo no ponto final da malha (como na fig. 4.11) dado que este foi o gráfico que nos trouxe mais informações relevantes para a resposta do sistema.

Nos gráficos a seguir, três curvas de mesma cor representam as temperaturas da parede, fluido frio e fluido quente, calculados com um parâmetro. Variação da cor das curvas indica a variação do parâmetro.

- Variação de h_h

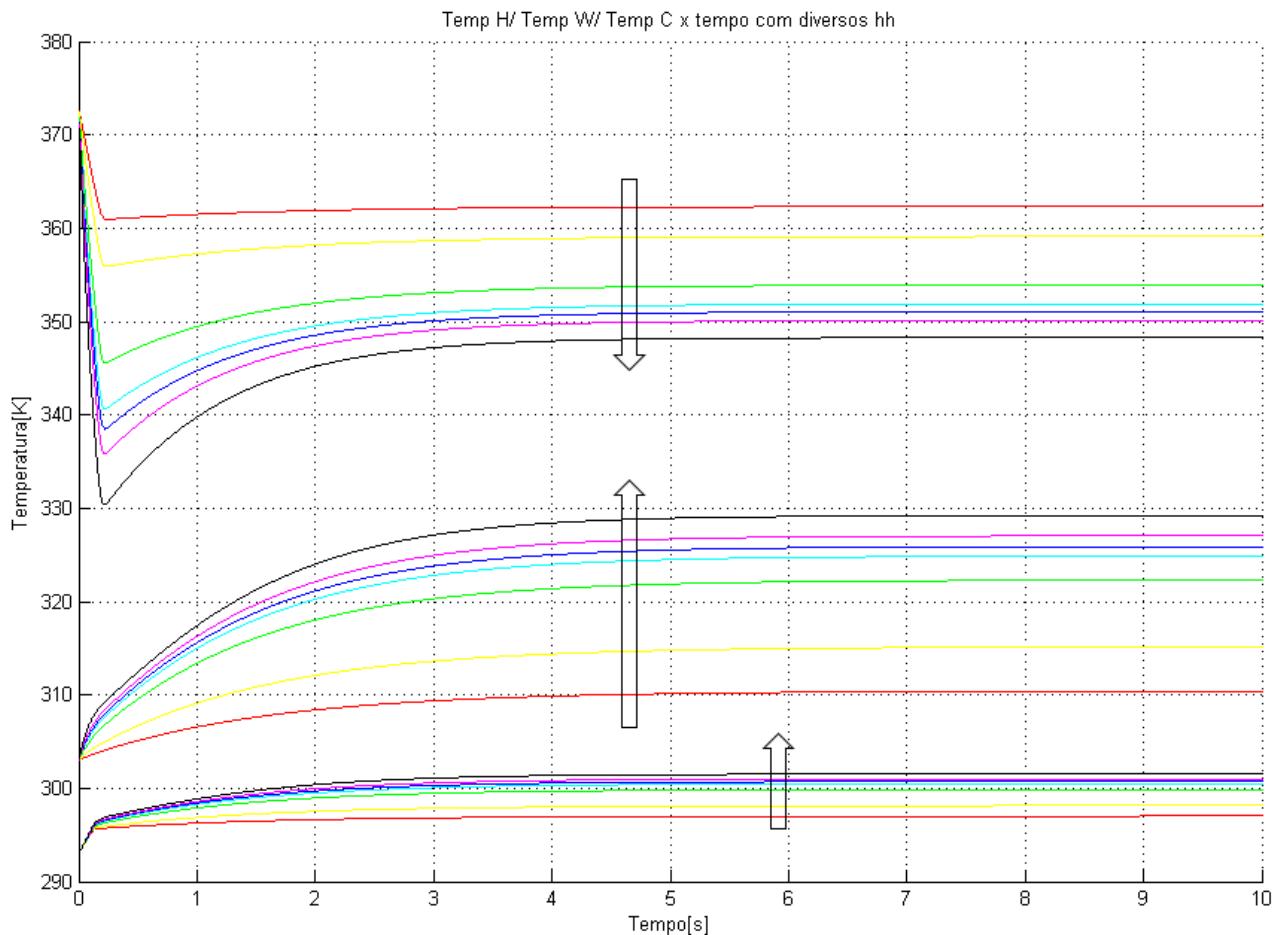


Figura 4.19 - Comparação do resultado com hh – Variação de 800 a 4500 W/m²K

A variação de h_h visivelmente implica bastante nas temperaturas de regime. Embora o comportamento do sistema ainda tenha a mesma forma – Queda brusca inicial de θ_h e aumento rápido de θ_c seguido de uma variação lenta até o regime – as temperaturas finais são claramente dependentes do parâmetro h_h .

A direção das setas na fig. 4.19 representa a direção de aumento do parâmetro. Por exemplo, para θ_h a curva vermelha representa o menor valor do parâmetro h_h enquanto a curva preta representa o maior valor do parâmetro. Vemos então que a temperatura em regime de θ_h aumenta com h_h enquanto as temperaturas θ_w e θ_c diminuem.

- Variação de h_c

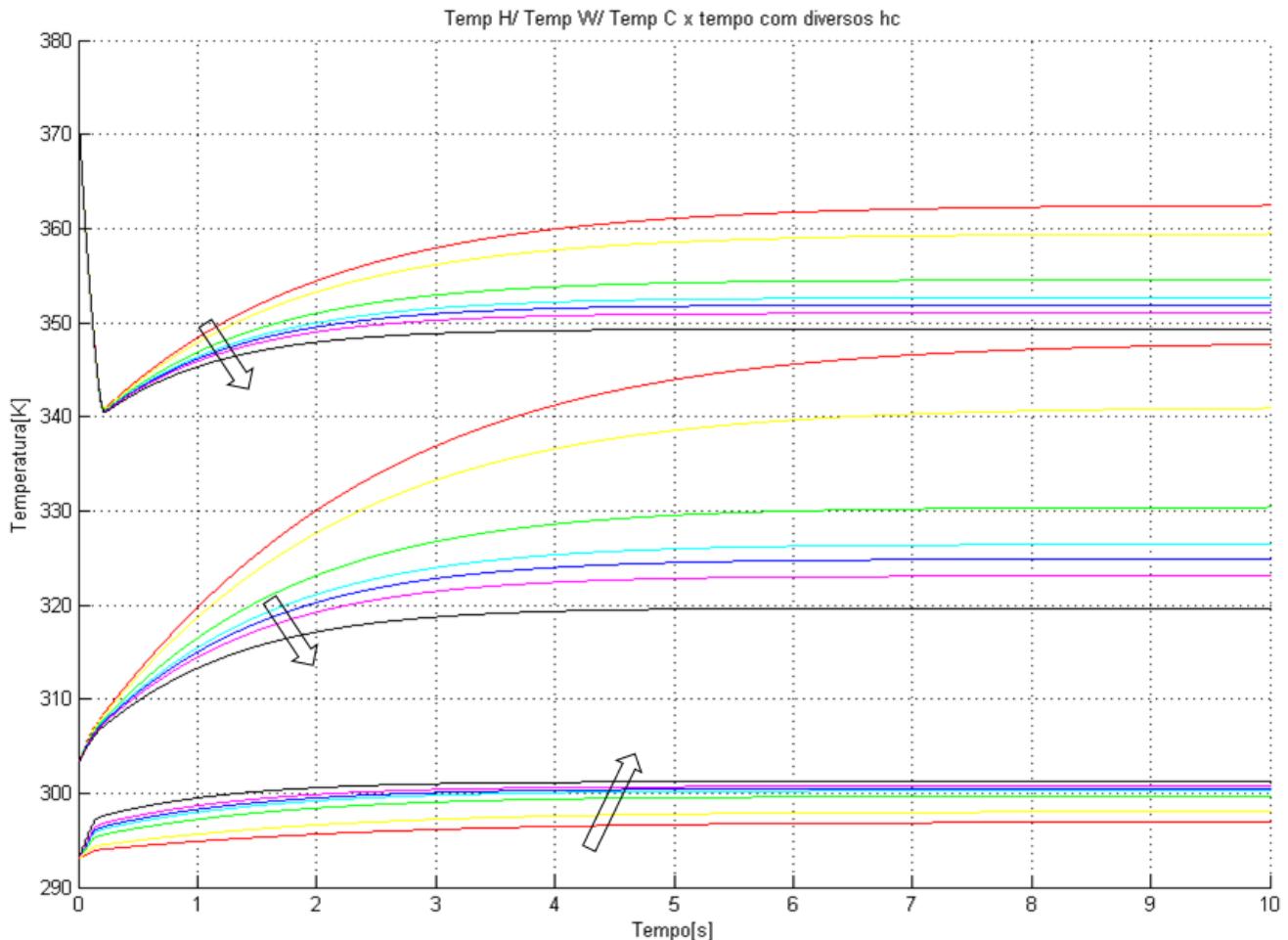


Figura 4.20 - Comparação do resultado com h_c – Variação de 800 a 4500 W/m²K

Assim como na comparação de h_h , vemos que o parâmetro h_c também influencia bastante as temperaturas em regime do sistema apesar de também manter a mesma forma. Nesse caso fica visível uma variação do tempo de resposta – o tempo que o sistema leva para entrar em regime. Para um menor parâmetro h_c (curva vermelha), o tempo de resposta é inclusive maior que o tempo total de simulação enquanto para um valor maior de h_h .

Por fim, notamos que a temperatura em regime de θ_c aumenta com o valor de h_c enquanto as temperaturas θ_w e θ_h diminuem com o parâmetro.

- Variação de C_w

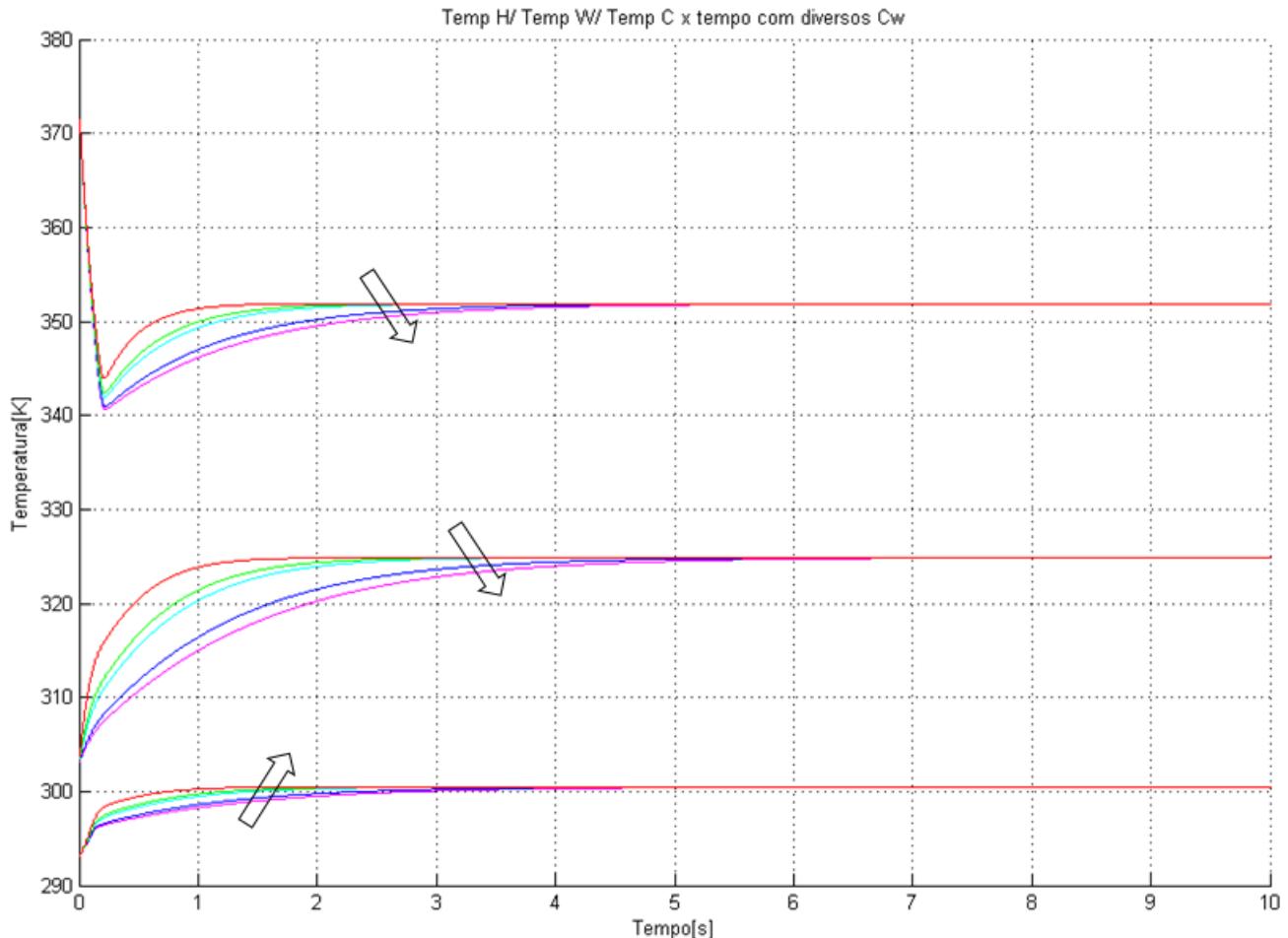


Figura 4.21 - Comparaçāo do resultado com C_w

Para variar o parāmetro C_w , foram utilizados alguns valores de calor específico de alguns materiais sólidos conforme a tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores variados de C_w [$J/(kg \cdot K)$] para alguns sólidos

Estanho	225
Cobre	385
Aço	450
Silício	753
Alumínio	897

Como fica visível, o parâmetro C_w não influencia na temperatura de regime como os outros parâmetros já vistos, mas tem grande influência no tempo de resposta do sistema. Apesar da variação inicial de θ_h e θ_c continuem as mesmas, valores mais baixos de C_w fazem com que o sistema responda muito mais rápido às variações de temperatura.

- Variação das velocidades u_c e u_h

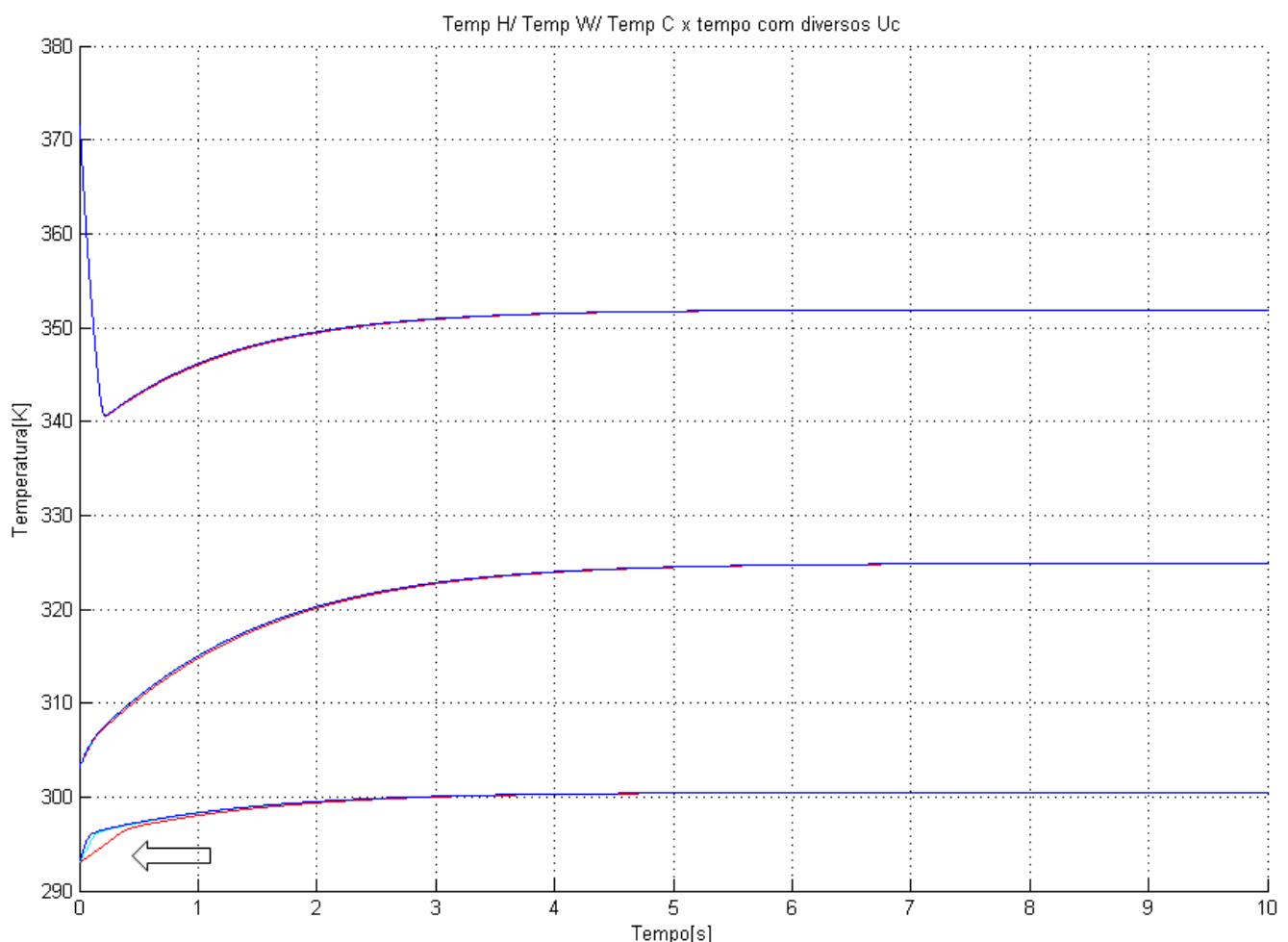


Figura 4.22 - Comparaçāo do resultado com uc – Variação de 1 a 5 m/s

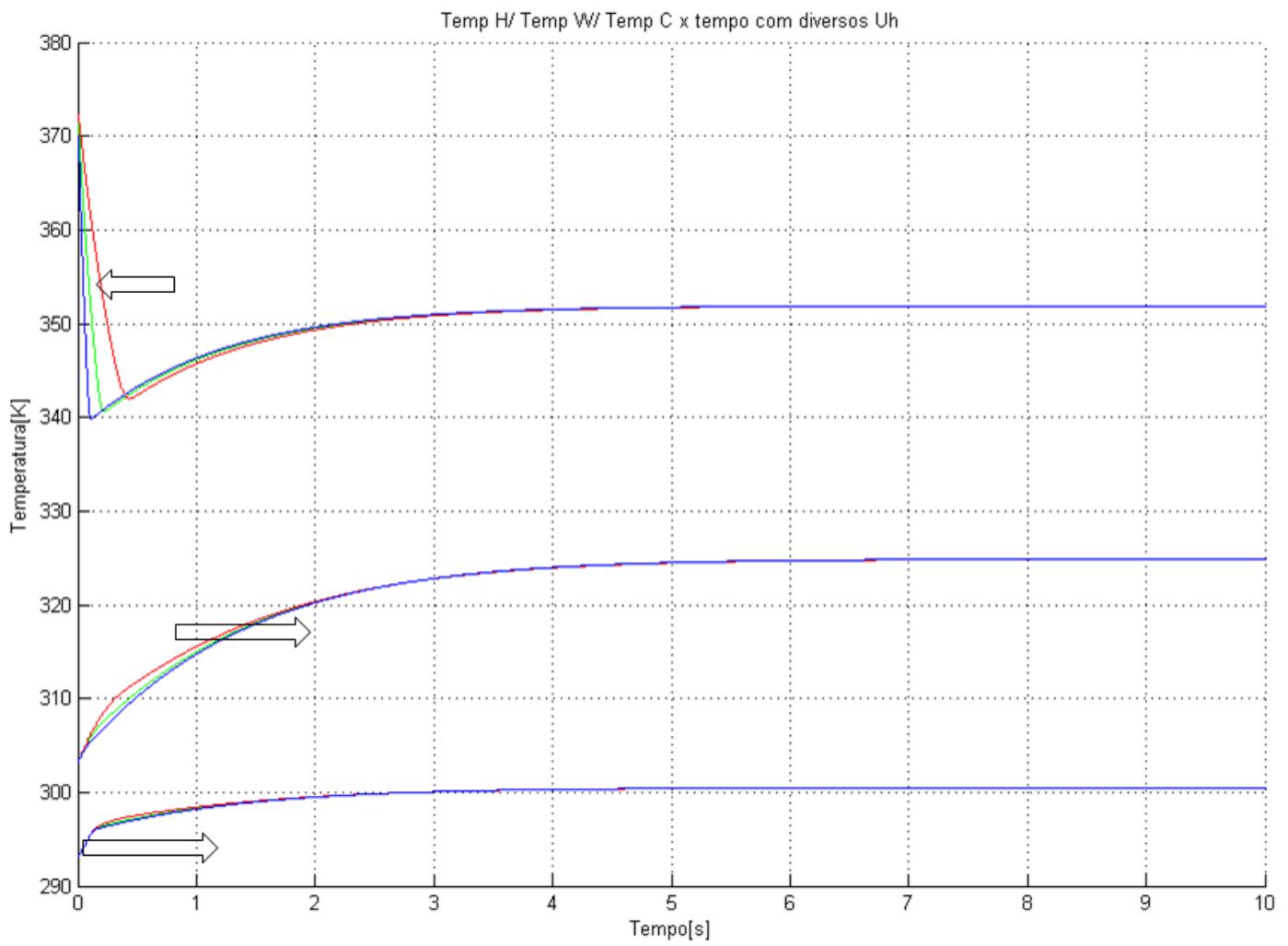


Figura 4.23 - Comparação do resultado com u_h – Variação de 1 a 4 m/s

Nas fig. 4.22 e 4.23 podemos ver que a velocidade de um dos fluidos basicamente só irá alterar a taxa de troca de calor no instante inicial de troca, onde ocorre a variação brusca de θ_h e θ_c . A variação da velocidade u_c do fluido frio irá alterar principalmente a taxa de troca de calor do fluido frio para a parede enquanto a variação de u_h irá principalmente aumentar a taxa de troca do fluido quente com a parede. Embora exista uma mínima influência de u_c na resposta de θ_h e de u_h em θ , essa variação é consideravelmente pequena.

4.5. RESPOSTA DO SISTEMA A VARIAÇÕES NAS ENTRADAS

Por fim foram realizadas simulações e análises da resposta do sistema estudado quando introduzidas entradas variáveis no tempo. O foco dessa etapa foi estudar como é dada a resposta temporal da temperatura na saída do fluido quente quando ocorrem variações na entrada do fluido frio.

As análises foram tomadas dessa maneira devido ao funcionamento desse tipo de equipamento. Em grande parte das aplicações, trocadores desse tipo têm como objetivo principal reduzir a temperatura de um elemento quente através de um fluido refrigerado até uma temperatura adequada. Aqui será estudado como será influenciada a capacidade de troca no elemento quente quando ocorre um suposto problema ou variação inesperada da temperatura em que o fluido frio entra no trocador.

- Variação periódica da temperatura do fluido frio θ_c

Foram realizadas algumas simulações para estudar a resposta da temperatura do fluido quente θ_h quando ocorrem variações periódicas de forma senoidal na entrada do fluido frio. Como visível nas fig. 4.24, 4.25 e 4.26, existe um atraso de fase entre a resposta da temperatura do fluido quente e a do fluido frio. Vale notar que os gráficos mostram a saída do fluido frio que já possuem outro pequeno atraso da entrada. A variação da temperatura da entrada do fluido frio foi simulada como sendo:

$$\theta_{c,e} = \theta_{c,0} + A * \cos\left(\frac{B * \pi * t}{T}\right) \quad (4.1)$$

Nesse tópico, os termos A e B foram tomados como:

$$A = 5$$

$$B = 8$$

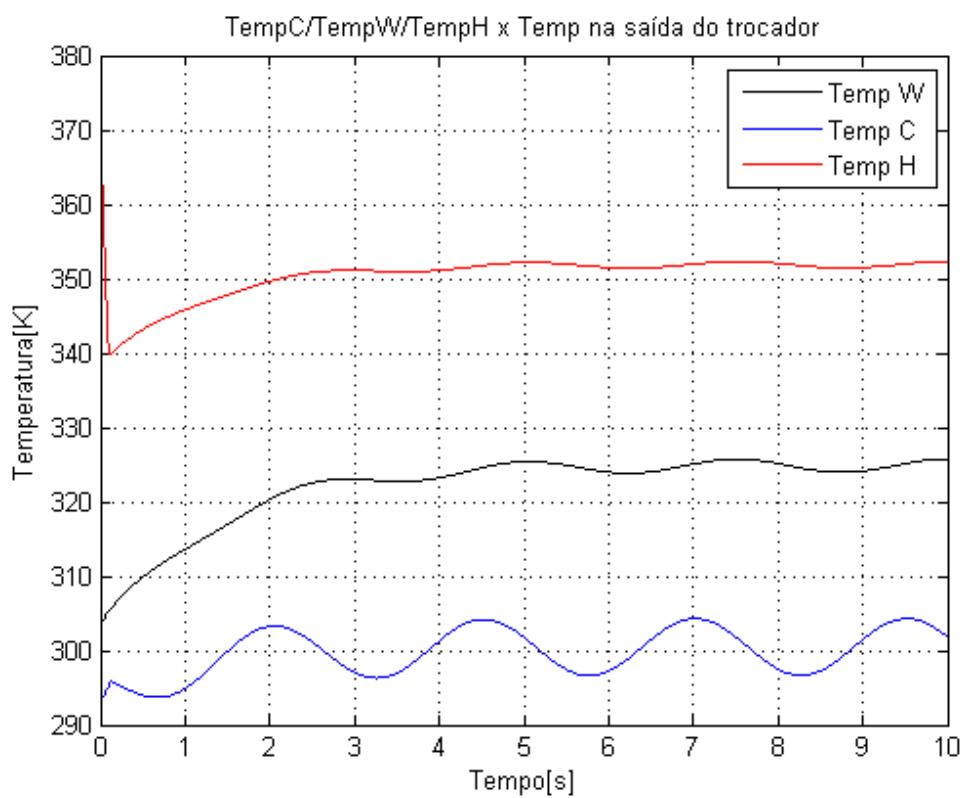


Figura 4.24 – Temperaturas na saída com variação senoidal em Tc

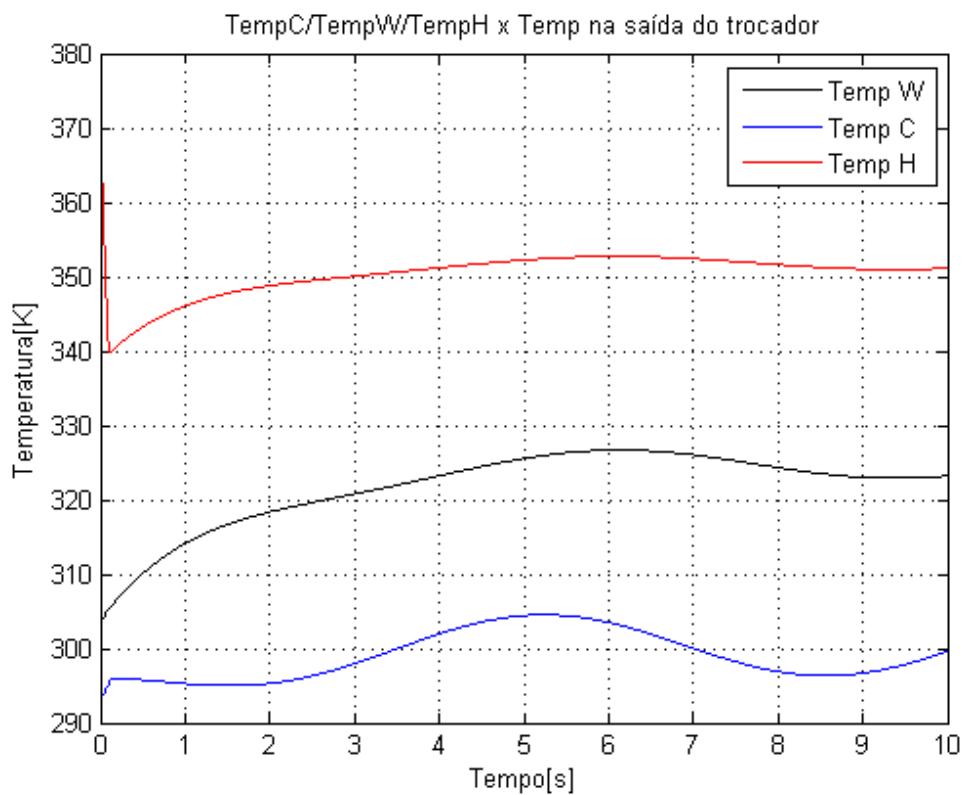


Figura 4.25 - Temperaturas na saída com variação senoidal em Tc - Baixa frequência

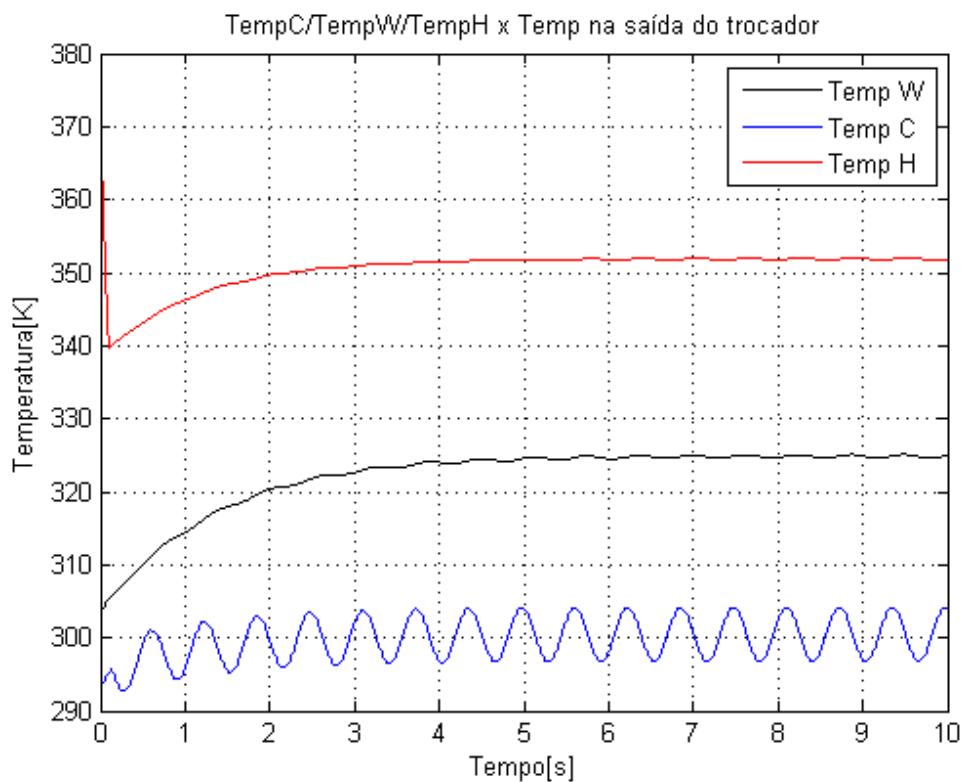


Figura 4.26 - Temperaturas na saída com variação senoidal em T_c - Alta frequência

Por ser um sistema de resposta razoavelmente lenta, os gráficos apresentam resultados já esperados. Em alta frequência da entrada, a saída que estamos estudando apresenta amplitudes insignificantes dado que não tem tempo para variações antes do sinal de entrada voltar a mudar de fase. Na simulação de baixa frequência vemos que a amplitude do sinal de saída consegue alcançar um valor consideravelmente maior e é visível o atraso de fase.

Em seguida, foram realizadas novas simulações para estudar a influência da amplitude do sinal de entrada. Foram realizados testes criando variações também senoidais com amplitudes variando de 2 a 40°C. As amplitudes alcançadas no sinal de resposta foram encontrados conforme a tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Variações de amplitude do sinal de saída Th

Variação de amplitude de Tc Tc_e = Tc_zero + A*cos(pi*B*t/T) H = amplitude de Th_s		
A	B	H
1	8	0,18
2	8	0,33
4	8	0,52
5	8	0,85
7	8	1,17
8	8	1,36
10	8	1,72
15	8	2,6
20	8	3,46

- Variação da temperatura do fluido frio θ_c com uma rampa

Em seguida foi realizada uma nova simulação considerando um suposto sistema de refrigeração que para de funcionar e gera um aumento constante no tempo da temperatura de entrada do fluido frio. Isso se aproxima do comportamento de um equipamento que temporariamente para de funcionar devido a uma queda de energia ou problema temporário similar.

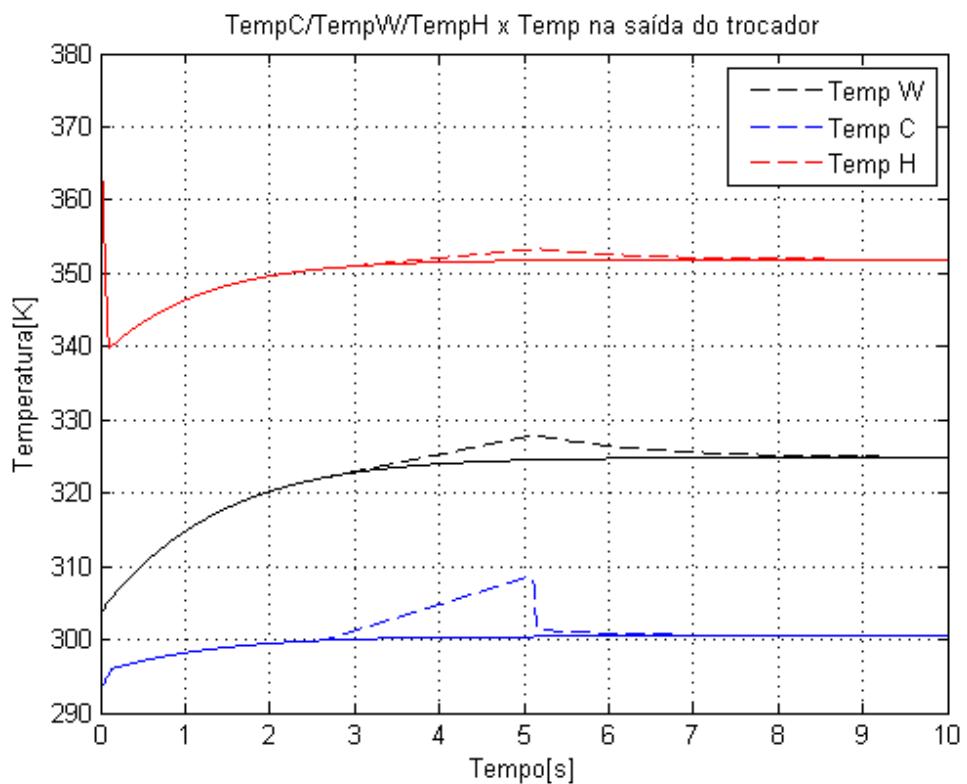


Figura 4.27 - Resposta das temperaturas na saída com uma entrada rampa temporária em T_c

Como no tópico anterior, é possível perceber que o aumento da temperatura de saída do fluido quente é dado de uma maneira bem mais lenta, com amplitude menor e um atraso notável comparado ao sinal de entrada. Também foi possível medir que o tempo de retorno para a estabilidade após o sinal voltar ao padrão é bem próximo ao tempo de estabilização inicial do sistema.

5. MODELO DE TROCADOR COM MULTIPLOS PASSES

Até este ponto foi estudado o comportamento de uma única célula de um trocador de calor considerando um único passe dos fluidos não misturados. Equipamentos reais em geral possuem sistemas de múltiplos passes de fluidos que permite um melhor aproveitamento da diferença de temperaturas existente entre os fluidos nas suas respectivas saídas.

Para melhorar o modelo apresentado anteriormente e tentar aproxima-lo de um equipamento mais prático, foi desenvolvido uma nova linha de código que permite considerar uma sequência de células colocadas em sequência considerando algumas hipóteses:

- Nessa etapa, foram considerados somente passes adicionais do fluido frio. Como pode ser visto no exemplo da figura 5.1, foram alinhadas 4 células e é possível ver a direção do escoamento considerada.

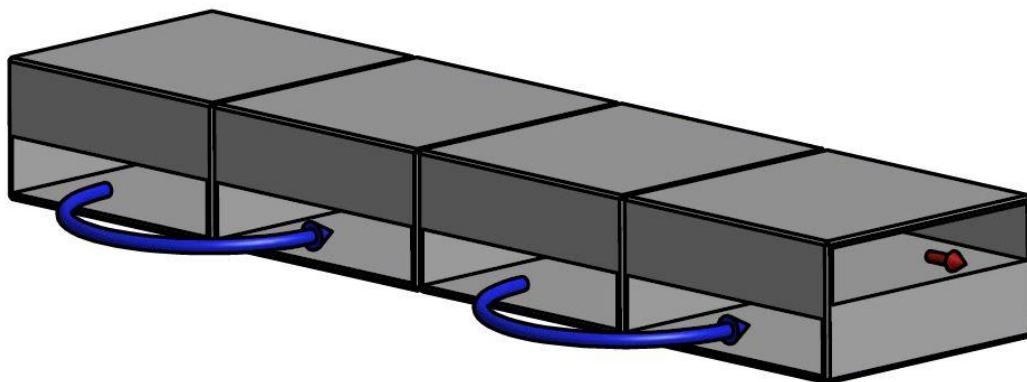


Figura 5.1 - Modelo físico de um conjunto de células

- Entre cada uma das células, o fluido quente passa diretamente, mantendo a distribuição de temperaturas alinhadas ao escoamento. Já o fluido frio, ao passar de uma célula para a seguinte necessita de uma variação na orientação do escoamento. Isso irá forçar uma mistura que torna irrelevante a distribuição de temperaturas na saída da primeira célula. Será

considerado então que ele entra na segunda célula com uma distribuição de temperaturas uniforme, igual à temperatura média do ultimo ponto de cálculo da célula anterior.

- Não será considerada qualquer troca de energia fora das células, mesmo que o fluido frio tenha que sair da região considerada para a inversão de direção.

5.1. ADAPATAÇÕES NO MODELO ORIGINAL

Para resolver o problema de vários passes, foram feitas algumas alterações no modelo original apresentado anteriormente. O modelo matemático encontrado na equação 3.9 não sofrerá alterações, porém são necessárias mudanças no modelo aplicado no sistema computacional. Essas alterações são listadas a seguir

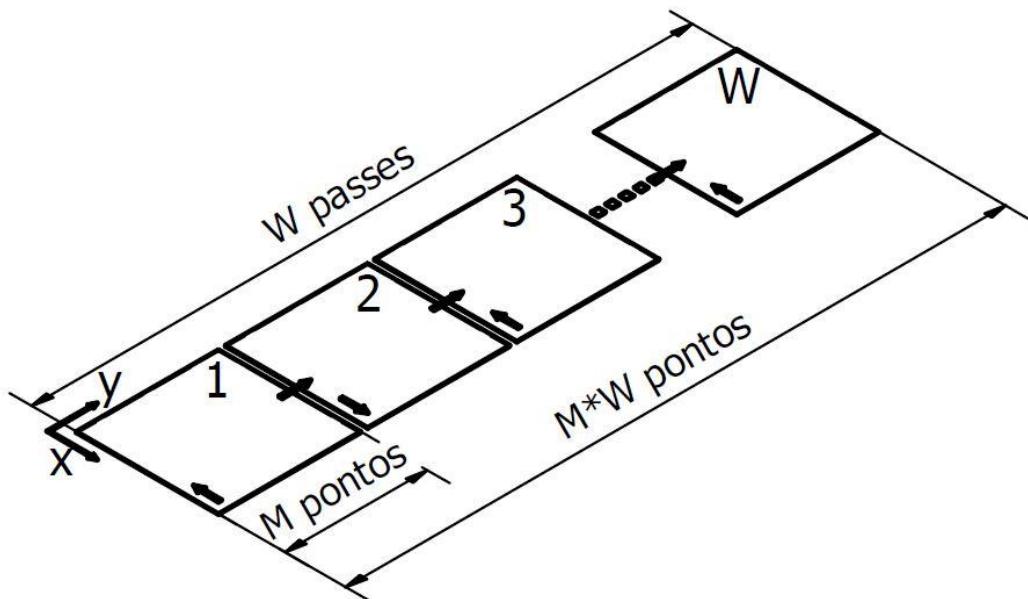


Figura 5.2 - Representação dos vários passes w

- Como é mostrado na figura 5.2, temos um total de W passes (cada nomeado como $w = 1, 2, 3 \dots W$). No modelo discreto original tínhamos M

pontos de cálculo na direção y para cada passo no tempo, no novo sistema teremos um total de W^*M .

- Variável u_c com sentido dependente do passe w. No modelo original ela era constante positiva na direção de x já nessa adaptação ela varia conforme a equação:

$$\overrightarrow{u_c(w)} = u_c(-1)^{w+1} \vec{i} \quad (5.1)$$

- Condições de contorno da temperatura do fluido frio nas entradas do modelo variando também com w. Devido à variação do sentido de u_c , os pontos de entrada do modelo irão variar entre os pontos de coordenada $i = 1$, para os passes com w ímpar e $i = N$ para os passes com w par.

Colocando a variável w diretamente na coordenada j, teremos uma nova variável $j = 1, 2, 3 \dots P, P + 1 \dots 2P \dots MP$. Assim, podemos definir as distribuições nas entradas como sendo:

$$\begin{cases} w = 1 \rightarrow \theta_c(1,1:P) = \theta_{c,zero} \\ w = k, \text{ímpar} \rightarrow \theta_c(1, (k-1)*P + 1 : K * P) = \text{Média}[\theta_c(1, (k-2)*P + 1 : (k-1)*P) \\ w = k, \text{par} \rightarrow \theta_c(N, (k-1)*P + 1 : K * P) = \text{Média}[\theta_c(N, (k-2)*P + 1 : (k-1)*P)] \end{cases}$$

5.2. SIMULAÇÕES COM DIVERSOS PASSES

Inicialmente foram feitas algumas simulações com os mesmos parâmetros das simulações originais somente acrescentando um número maior de passes. Na primeira simulação, são comparadas as temperaturas de saída dos dois fluidos e da parede para uma simulação com 1, 2 e 4 passes do fluido frio.

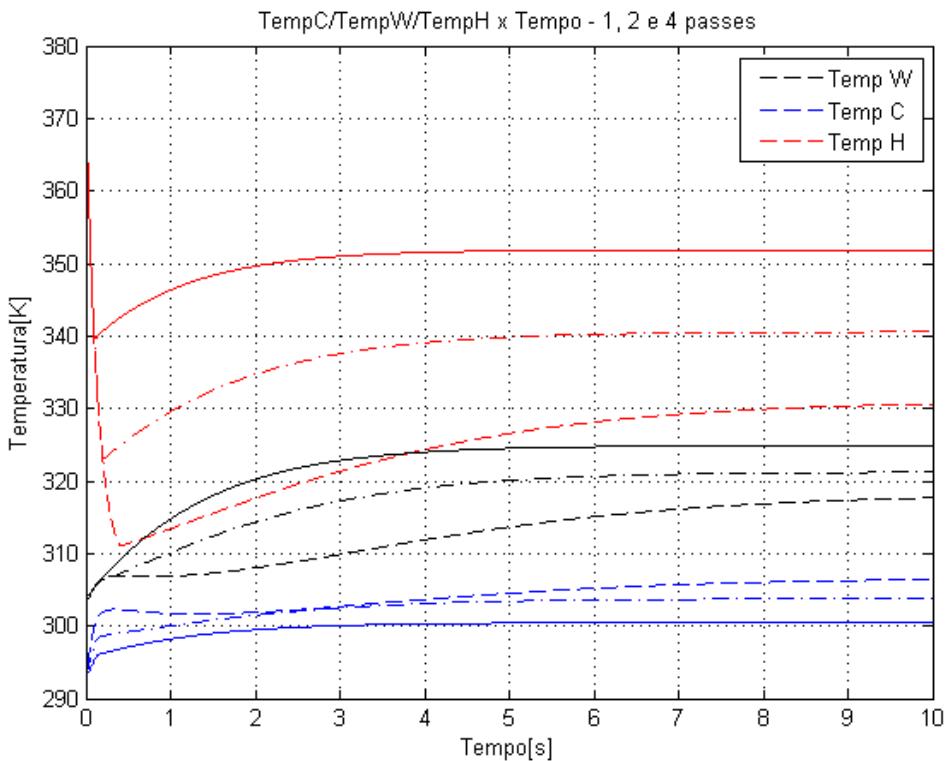


Figura 5.3 - Comparação dos resultados com diversos passes

Como é possível ver na figura 5.3, existe uma queda considerável na temperatura de saída do fluido quente para passes adicionais. Também é possível notar uma distorção no formato das curvas de quatro passes dada à proximidade das temperaturas.

Devido a essa distorção, foi optado por utilizar uma área de troca menor do que a utilizada nas simulações anteriores para observar melhor como o sistema responde com maiores números de passes. Originalmente foi utilizada uma superfície de troca com dimensões 40x40mm. Nas simulações a seguir será considerada uma área de 20x20mm.

Na figura 5.4 a seguir podemos ver uma comparação do resultado de um trocador 20x20mm variando o número de passes w de 1 a 4. Na tabela 5.1 estão os valores das temperaturas nos pontos finais da simulação. Quando transformados em um gráfico (Figura 5.5), podemos ver melhor como as temperaturas finais se modificam com os passes.

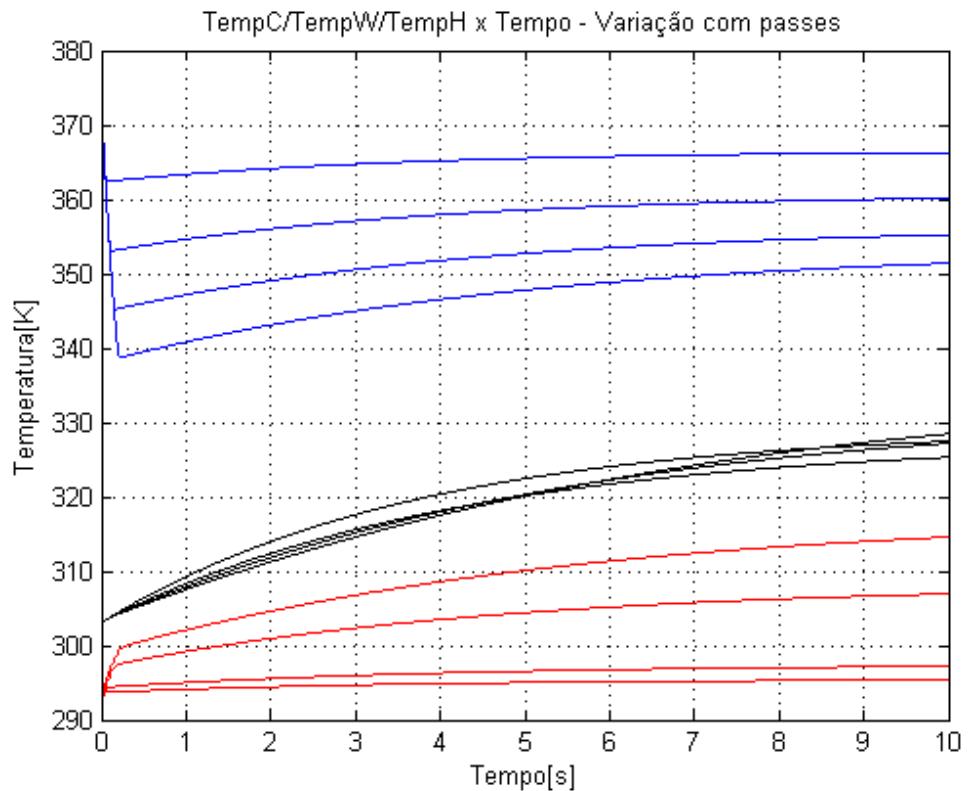


Figura 5.4 - Comparaçāo dos resultados de 1 a 4 passes

Como era esperado, vemos que existe uma melhora na eficiência do trocador conforme se aumenta o número de passes. Ao mesmo tempo, a diferença entre a melhora da eficiência diminua a cada passe adicional.

Tabela 5.1 - Temperaturas finais por número de passes

Passes	Th	Tw	Tc
1	366,31	327,46	295,36
2	360,15	325,31	297,21
3	355,23	327,19	306,94
4	351,40	328,46	314,58
5	348,81	329,48	321,00
6	346,22	329,94	325,73

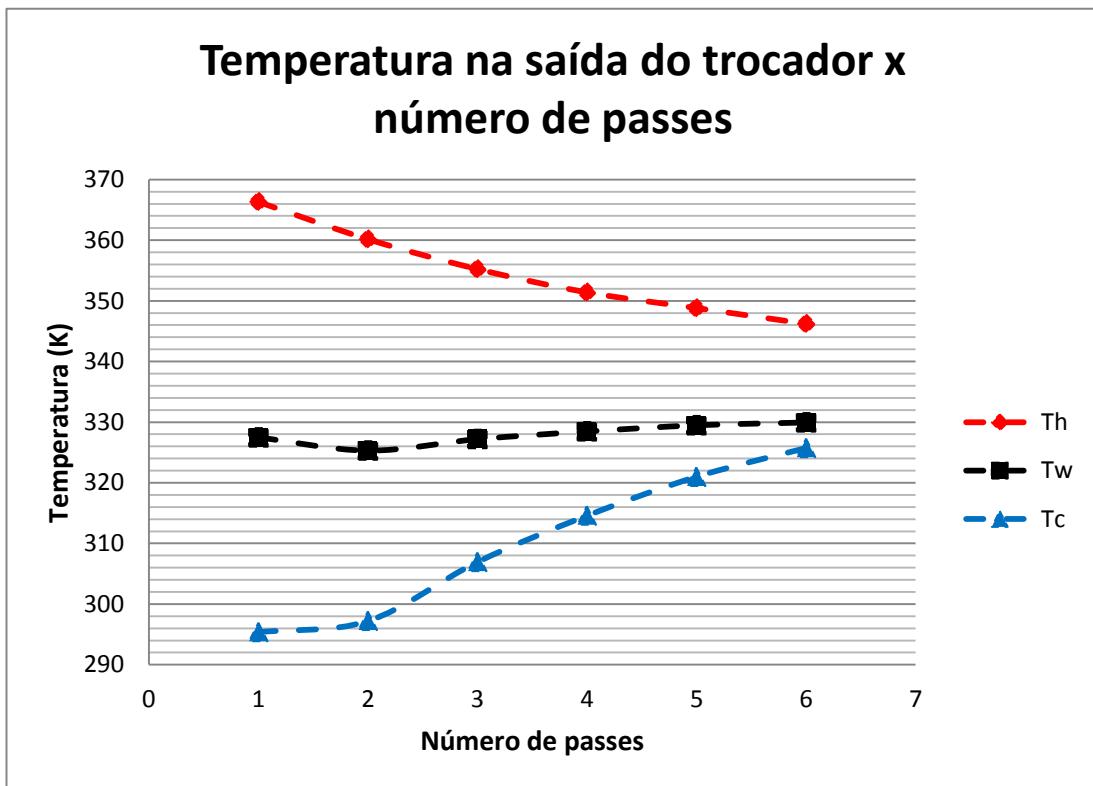


Figura 5.5 - Gráfico da variação da Temperatura final com os passes

Outro resultado notável é que a temperatura alcançada na saída de T_h na condição de trocador de área 20x20mm com 4 passes é bastante próxima do que o alcançado no trocador de 40x40mm sem passes adicionais (Ambos equipamentos com áreas de troca total iguais)

6. CONCLUSÕES

Com o modelo encontrado e as simulações realizadas, podemos chegar a uma conclusão inicial clara. Quando comparada a resposta do trocador em fluxo cruzado com a de um trocador de outro tipo – Corrente paralela (fig. 6.1) ou contracorrente - fica visível que a resposta não se difere tanto entre os modelos. Mesmo com as diferenças construtivas, o sistema responde de maneira similar em todos os casos. Inicialmente uma variação rápida das temperaturas devido às grandes diferenças de temperaturas entre os fluidos e a parede e em seguida, uma variação lenta até se chegar ao regime.

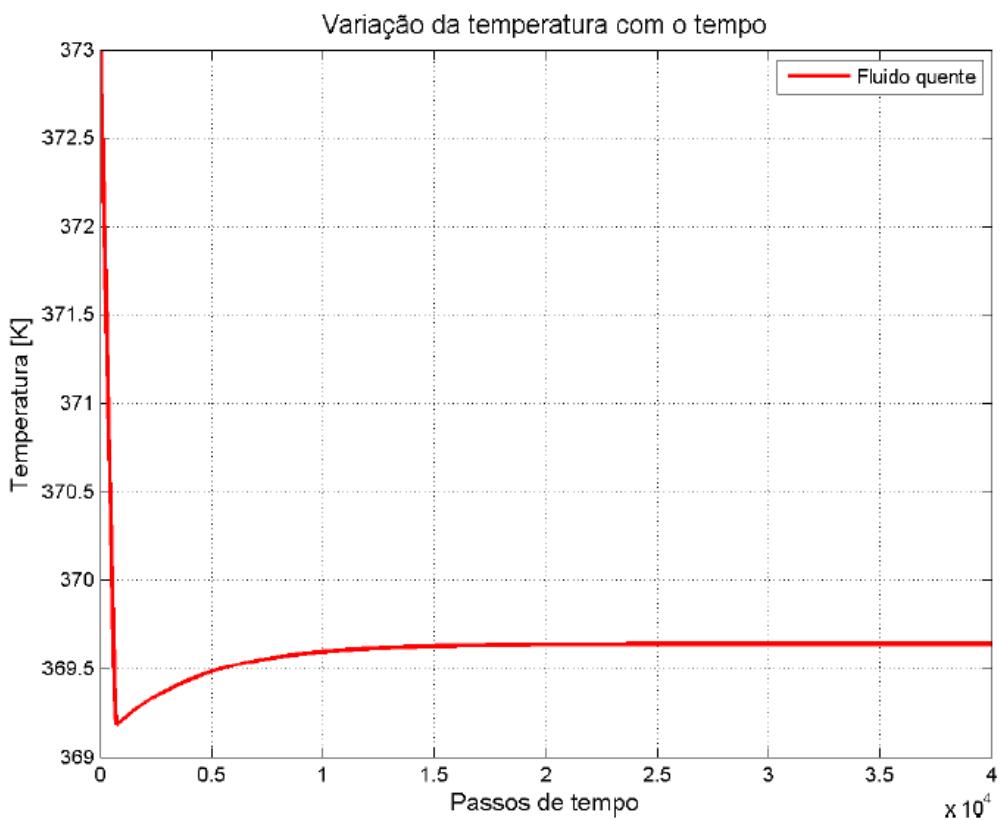


Figura 6.1 - Resposta de Temp H em um trocador de corrente paralela (BEATO, MONTE, 2012)

Para que a resposta desse tipo de trocador ficasse consideravelmente diferente da resposta de um trocador de fluxo paralelo, foi necessário um aumento significativo da dimensão do trocador. Nas simulações mostradas nesse trabalho, foi utilizado um trocador de dimensões básicas de 0,4m x 0,4m. Mapas de temperatura mais complexos só foram encontrados quando utilizado trocadores de dimensões muito maiores. Levando em consideração que isso é um modelo teórico e trocadores reais com modelo físico próximo ao estudado até aqui não chegam a possuir grandes dimensões, é apropriado dizer que esses resultados diferentes não chegam a se repetir em um problema real.

Quanto aos parâmetros do problema, foram encontrados dois parâmetros principais que regem o sistema. Os coeficientes de troca de calor h_h e h_c , que geram diferenças significativas nas temperaturas de regime e o calor específico da parede C_w que gera variações do tempo de resposta do sistema. Embora não tenha sido feita uma comparação da variação da massa da parede m_w , é possível afirmar pelo modelo matemático encontrado que esta terá um efeito de magnitude igual a variação de C_w .

Por fim, é importante deixar claro que os modelos utilizados nesse trabalho ainda podem ser complementados. No modelo inicial, foi feita uma hipótese de que no escoamento somente as temperaturas iriam variar no espaço. Isso acaba por tornar o modelo matemático bastante limitado, só sendo possível seu uso com superfícies de troca como placas planas, impedindo o modelo de ser adaptado para trocadores de calor com tubos e outros modelos. Outra possível adição nesse problema é um avanço na programação para incluir passes dos dois fluidos na mesma simulação, mas isso necessitaria uma programação mais complicada além de um tempo de cálculo inconveniente, considerando que algumas simulações realizadas nesse trabalho já consumiram um tempo razoável que ao mesmo tempo que

atrasava a análise, dificultava a solução de problemas dada a espera necessária entre cada tentativa de simulação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMES, W. F. *Nonlinear Partial Differential Equations in Engineering*. New York: Academic Press, Section 7, 1965. 25 onwards.

BEATO, A. B. M.; MONTE, C. Q. M. *Análise E Simulação Numérica De Um Trocador De Calor Em Regime Transitório*. São Paulo, 2012

CHEN, H. -T.; CHEN, K. -C. *Simple method for transient response of gas-to-gas cross-flow heat exchangers with neither gas mixed*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24(11), pp. 2891-2898, 1991.

HAITHAM M. S. BAHADARAH , N. K. ANAND & H. C. Chen (2005) *A Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer over a Bank of Flat Tubes, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 48:4, 359-385.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. 6^a ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 425, 2008.

SILAIPILLAYARPUTHUR, K; IDEM, S. *Transient Performance Model for a Multipass Cross-Flow Heat Exchanger*, Heat Transfer Engineering, 35:1, 15-24. (2014)

SMITH, E. M. *Thermal Design of Heat Exchangers: A Numerical Approach: Direct Sizing and Stepwise Rating*, John. 1^a ed. John Wiley & Sons, 1997. 418 p.

SPIGA, M.; SPIGA, G. *Step response of the crossflow heat exchanger with finite wall capacitance*, International Journal of Heat and Mass Transfer, **35**(2), pp. 559-565, 1992.

VAITEKUNAS, D. A. *A Generic Dynamics Model For Crossflow Heat Exchangers With One Fluid Mixed*, McGill University, Montréal, Canada, 1990.

APÊNDICE A – Linhas de comando da simulação (MATLAB)

```
clear all

%% Variaveis do escoamento

hh = 2800; % W/m2.K
hc = 3100;

Ch = 2200; % J/kg.K
Cc = 4180;
Cw = 900; % Aluminio %

mh = 0.3; % kg/s
mc = 0.4;
Mw = 0.002*0.4*0.4*2700; % kg

uh = 2; % m/s
uc = 3;

Lx = 0.4; % m
Ly = 0.4;

Thzero = 273+100; % K
Tczero = 273+20;
Twzero = 273+30; %

%% Constantes de calculo

S = Lx*Ly; % m2

E = (hh*S*uh) / (mh*Ch*Lx);
F = (hh*S) / (Mw*Cw);
G = (hc*S) / (Mw*Cw);
H = (hc*S*uc) / (mc*Cc*Ly);

T = 10.0; % s

DeltaT = 0.0002; % s
DeltaX = 0.005; % m
DeltaY = 0.005; %

%% Pontos de cálculo

x = 0:DeltaX:Lx; xl = 0:DeltaX:(Lx - DeltaX);
y = 0:DeltaY:Ly; yl = 0:DeltaY:(Ly - DeltaY);
t = 0:DeltaT:T;

N = size(x,2);
M = size(y,2);
P = size(t,2);
```

```

ThetaH = zeros(N,M); AuxH = ThetaH; Malhah2 = ThetaH; Malhah3 =
ThetaH; Malhah4 = ThetaH; Malhah5 = ThetaH; Malhah6 = ThetaH;
Malhah7 = ThetaH; Malhah8 = ThetaH; Malhah9 = ThetaH;
ThetaW = zeros(N,M); AuxW = ThetaW; Malhaw2 = ThetaW; Malhaw3 =
ThetaW; Malhaw4 = ThetaW; Malhaw5 = ThetaW; Malhaw6 = ThetaW;
Malhaw7 = ThetaW; Malhaw8 = ThetaW; Malhaw9 = ThetaW;
ThetaC = zeros(N,M); AuxC = ThetaC; Malhac2 = ThetaC; Malhac3 =
ThetaC; Malhac4 = ThetaC; Malhac5 = ThetaC; Malhac6 = ThetaC;
Malhac7 = ThetaC; Malhac8 = ThetaC; Malhac9 = ThetaC;%%

Mw1 = zeros(N-1,M-1); Mw2 = Mw1; Mw3 = Mw1; Mw4 = Mw1; Mw5 = Mw1;
Mw6 = Mw1; Mw7 = Mw1; Mw8 = Mw1; Mw9 = Mw1; Mwf = Mw1;
Mh1 = zeros(N-1,M-1); Mh2 = Mw1; Mh3 = Mw1; Mh4 = Mw1; Mh5 = Mw1;
Mh6 = Mw1; Mh7 = Mw1; Mh8 = Mw1; Mh9 = Mw1; Mhf = Mw1;
Mc1 = zeros(N-1,M-1); Mc2 = Mw1; Mc3 = Mw1; Mc4 = Mw1; Mc5 = Mw1;
Mc6 = Mw1; Mc7 = Mw1; Mc8 = Mw1; Mc9 = Mw1; Mcf = Mw1;

t1 = 1; t2 = 1+(P-1)*0.02; t3 = 1+(P-1)*0.05; t4 = 1+(P-1)*0.075; t5
= 1+(P-1)*0.1; t6 = 1+(P-1)*0.2; t7 = 1+(P-1)*0.4; t8 = 1+(P-1)*0.5;
t9 = 1+(P-1)*0.7;

%% Condições iniciais e condições de contorno

ThetaH(:,:,1) = Thzero;
ThetaW(:,:,1) = Twzero;
ThetaC(:,:,1) = Tczero;

Malhaw1 = ThetaW;
Malhac1 = ThetaC;
Malhah1 = ThetaH;

%% Calculos

s = 1;
for s=1:P
    AuxH = ThetaH;
    AuxW = ThetaW;
    AuxC = ThetaC;

    for j=2:M
        for i=2:N
            ThetaH(i,j) = AuxH(i,j) + DeltaT*((-1)*uh*(AuxH(i,j)-
AuxH(i,j-1))/(DeltaX) - (E*(AuxH(i,j)-AuxW(i,j))));;
            ThetaW(i,j) = AuxW(i,j) + DeltaT*(F*(AuxH(i,j)-AuxW(i,j))-
G*(AuxW(i,j)-AuxC(i,j)));}
            ThetaC(i,j) = AuxC(i,j) + DeltaT*((-1)*uc*(AuxC(i,j)-
AuxC(i-1,j))/(DeltaY) - (H*(AuxC(i,j)-AuxW(i,j))));;

        end
    end

    % funções de temp no tempo em pontos diversos
    TfH1(s) = ThetaH(1,M-1);
    TfH2(s) = ThetaH(0.2*(N-1),M-1);

```

```

Tfh3(s) = ThetaH(0.4*(N-1),M-1);
Tfh4(s) = ThetaH(0.6*(N-1),M-1);
Tfh5(s) = ThetaH(0.8*(N-1),M-1);
Tfhf(s) = ThetaH(N-1,M-1);

Tfc1(s) = ThetaC(N-1,1);
Tfc2(s) = ThetaC(N-1,0.2*(M-1));
Tfc3(s) = ThetaC(N-1,0.4*(M-1));
Tfc4(s) = ThetaC(N-1,0.6*(M-1));
Tfc5(s) = ThetaC(N-1,0.8*(M-1));
Tfcf(s) = ThetaC(N-1,(M-1));

Tfw1(s) = ThetaW(N-1,1);
Tfw2(s) = ThetaW(N-1,0.2*(M-1));
Tfw3(s) = ThetaW(N-1,0.4*(M-1));
Tfw4(s) = ThetaW(N-1,0.6*(M-1));
Tfw5(s) = ThetaW(N-1,0.8*(M-1));
Tfwf(s) = ThetaW(N-1,(M-1));

Tfw_1(s) = ThetaW(1,M-1);
Tfw_2(s) = ThetaW(0.2*(N-1),M-1);
Tfw_3(s) = ThetaW(0.4*(N-1),M-1);
Tfw_4(s) = ThetaW(0.6*(N-1),M-1);
Tfw_5(s) = ThetaW(0.8*(N-1),M-1);
Tfw_f(s) = ThetaW(N-1,M-1);

% Malhas em pontos do tempo
if s == t2
    Malhaw2 = ThetaW; Malhac2 = ThetaC; Malhah2 = ThetaH;
end
if s == t3
    Malhaw3 = ThetaW; Malhac3 = ThetaC; Malhah3 = ThetaH;
end
if s == t4
    Malhaw4 = ThetaW; Malhac4 = ThetaC; Malhah4 = ThetaH;
end
if s == t5
    Malhaw5 = ThetaW; Malhac5 = ThetaC; Malhah5 = ThetaH;
end
if s == t6
    Malhaw6 = ThetaW; Malhac6 = ThetaC; Malhah6 = ThetaH;
end
if s == t7
    Malhaw7 = ThetaW; Malhac7 = ThetaC; Malhah7 = ThetaH;
end
if s == t8
    Malhaw8 = ThetaW; Malhac8 = ThetaC; Malhah8 = ThetaH;
end
if s == t9
    Malhaw9 = ThetaW; Malhac9 = ThetaC; Malhah9 = ThetaH;
end

end

%% Correção dos gráficos de malha

```

```

for i=1:N-1
    for j=1:M-1
        Mw1(i,j)=Malhaw1(i+1,j+1); Mc1(i,j)=Malhac1(i+1,j+1);
Mh1(i,j)=Malhah1(i+1,j+1);
        Mw2(i,j)=Malhaw2(i+1,j+1); Mc2(i,j)=Malhac2(i+1,j+1);
Mh2(i,j)=Malhah2(i+1,j+1);
        Mw3(i,j)=Malhaw3(i+1,j+1); Mc3(i,j)=Malhac3(i+1,j+1);
Mh3(i,j)=Malhah3(i+1,j+1);
        Mw4(i,j)=Malhaw4(i+1,j+1); Mc4(i,j)=Malhac4(i+1,j+1);
Mh4(i,j)=Malhah4(i+1,j+1);
        Mw5(i,j)=Malhaw5(i+1,j+1); Mc5(i,j)=Malhac5(i+1,j+1);
Mh5(i,j)=Malhah5(i+1,j+1);
        Mw6(i,j)=Malhaw6(i+1,j+1); Mc6(i,j)=Malhac6(i+1,j+1);
Mh6(i,j)=Malhah6(i+1,j+1);
        Mw7(i,j)=Malhaw7(i+1,j+1); Mc7(i,j)=Malhac7(i+1,j+1);
Mh7(i,j)=Malhah7(i+1,j+1);
        Mw8(i,j)=Malhaw8(i+1,j+1); Mc8(i,j)=Malhac8(i+1,j+1);
Mh8(i,j)=Malhah8(i+1,j+1);
        Mw9(i,j)=Malhaw9(i+1,j+1); Mc9(i,j)=Malhac9(i+1,j+1);
Mh9(i,j)=Malhah9(i+1,j+1);
        Mwf(i,j)=ThetaW(i+1,j+1); Mcf(i,j)=ThetaC(i+1,j+1);
Mhf(i,j)=ThetaH(i+1,j+1);
    end
end

%% GERAÇÃO DE GRÁFICOS
% 0 - graficos no tempo
% 1 - gráficos da supef Tw no tempo
% 2 - gráficos da supef Th no tempo
% 3 - gráficos da supef Tc no tempo

fprintf = 5;

%Gráfico de temp/t em seis cortes paralelos ao escoamento + surface
da temp
%final

if fprintf == 0

figure (1)
plot(t,Tfh1,'r');
hold on;
plot(t,Tfh2,'y');
plot(t,Tfh3,'g');
plot(t,Tfh4,'c');
plot(t,Tfh5,'b');
plot(t,Tfhf,'m');
grid on;
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('TempH x Tempo em cortes parelelos ao fluxo do fluido
quente');
legend('T zero', 'T a 0.2*L', 'T a 0.4*L', 'T a 0.6*L', 'T a 0.8*L',
'T na saída');
hold off;
saveas(1,'ThetaH_tempo_cortesTf', 'png');

figure (2)

```

```

plot(t,Tfc1,'r');
hold on;
plot(t,Tfc2,'y');
plot(t,Tfc3,'g');
plot(t,Tfc4,'c');
plot(t,Tfc5,'b');
plot(t,Tfcf,'m');
grid on;
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('TempC x Tempo em cortes parelelos ao fluxo do fluido frio');
legend('T zero', 'T a 0.2*L', 'T a 0.4*L', 'T a 0.6*L', 'T a 0.8*L',
'T na saída');
hold off;
saveas(2,'ThetaC_tempo_cortesTf', 'png');

figure (3)
plot(t,Tfw1,'r');
hold on;
plot(t,Tfw2,'y');
plot(t,Tfw3,'g');
plot(t,Tfw4,'c');
plot(t,Tfw5,'b');
plot(t,Tfwf,'m');
grid on;
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('TempW x Tempo em cortes parelelos ao fluxo do fluido frio');
legend('T zero', 'T a 0.2*L', 'T a 0.4*L', 'T a 0.6*L', 'T a 0.8*L',
'T na saída');
hold off;
saveas(3,'ThetaW_tempo_cortes_Y_Tf', 'png');

figure (4)
plot(t,Tfw_1,'r');
hold on;
plot(t,Tfw_2,'y');
plot(t,Tfw_3,'g');
plot(t,Tfw_4,'c');
plot(t,Tfw_5,'b');
plot(t,Tfw_f,'m');
grid on;
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('TempW x Tempo em cortes parelelos ao fluxo do fluido
quente');
legend('T zero', 'T a 0.2*L', 'T a 0.4*L', 'T a 0.6*L', 'T a 0.8*L',
'T na saída');
hold off;
saveas(4,'ThetaW_tempo_cortes_X_Tf', 'png');

figure (5)
plot(t,Tfwf,'k');
hold on;
plot(t,Tfcf,'b');
plot(t,Tfhf,'r');
grid on;
xlabel('Tempo[s]')

```

```

ylabel('Temperatura[K]')
title('TempC/TempW/TempH x Temp na saída do trocador');
legend('Temp W', 'Temp C', 'Temp H');
saveas(5,'Comparação_temps', 'png');

end

%Surface em 10 passos do tempo para Tw

if fprintf == 1

figure (1)
surf(xl,yl,Mw1);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=0s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(1,'ThetaW_tempo_M1', 'png');

figure (2)
surf(xl,yl,Mw2);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=0.2s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(2,'ThetaW_tempo_M2', 'png');

figure (3)
surf(xl,yl,Mw3);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=0.5s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(3,'ThetaW_tempo_M3', 'png');

figure (4)
surf(xl,yl,Mw4);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=0.75s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(4,'ThetaW_tempo_M4', 'png');

figure (5)
surf(xl,yl,Mw5);

```

```

grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=1s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(5,'ThetaW_tempo_M5', 'png');

figure (6)
surf(xl,yl,Mw6);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=2s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(6,'ThetaW_tempo_M6', 'png');

figure (7)
surf(xl,yl,Mw7);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=4s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(7,'ThetaW_tempo_M7', 'png');

figure (8)
surf(xl,yl,Mw8);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=5s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(8,'ThetaW_tempo_M8', 'png');

figure (9)
surf(xl,yl,Mw9);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante t=7s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(9,'ThetaW_tempo_M9', 'png');

figure (10)
surf(xl,yl,Mwf);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');

```

```

ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tw [K]');
title ('Temperatura Tw no instante final')
axis([0 0.4 0 0.4 290 345]);
saveas(10,'ThetaW_tempo_Mf', 'png');

end

%Surface em 10 passos do tempo para Th

if fprintf == 2

figure (1)
mesh(xl,yl,Mh1);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=0s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(1,'ThetaH_tempo_M1', 'png');

figure (2)
mesh(xl,yl,Mh2);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=0.2s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(2,'ThetaH_tempo_M2', 'png');

figure (3)
mesh(xl,yl,Mh3);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=0.4s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(3,'ThetaH_tempo_M3', 'png');

figure (4)
mesh(xl,yl,Mh4);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=0.7s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(4,'ThetaH_tempo_M4', 'png');

figure (5)

```

```

mesh(xl,yl,Mh5);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=1s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(5,'ThetaH_tempo_M5', 'png');

figure (6)
mesh(xl,yl,Mh6);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=2s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(6,'ThetaH_tempo_M6', 'png');

figure (7)
mesh(xl,yl,Mh7);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=4s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(7,'ThetaH_tempo_M7', 'png');

figure (8)
mesh(xl,yl,Mh8);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=5s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(8,'ThetaH_tempo_M8', 'png');

figure (9)
mesh(xl,yl,Mh9);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante t=7s')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(9,'ThetaH_tempo_M9', 'png');

figure (10)
mesh(xl,yl,Mhf);
grid on;
box on;

```

```

xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Th [K]');
title ('Temperatura Th no instante final')
axis([0 0.4 0 0.4 340 375]);
saveas(10,'ThetaH_tempo_Mf', 'png');

end

%Surface em 10 passos do tempo para Tc

if fprintf == 3

figure (1)
surf(xl,yl,Mc1);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=0s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(1,'ThetaC_tempo_M1', 'png');

figure (2)
surf(xl,yl,Mc2);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=0.2s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(2,'ThetaC_tempo_M2', 'png');

figure (3)
surf(xl,yl,Mc3);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=0.5s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(3,'ThetaC_tempo_M3', 'png');

figure (4)
surf(xl,yl,Mc4);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=0.7s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(4,'ThetaC_tempo_M4', 'png');

```

```

figure (5)
surf(xl,yl,Mc5);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=1s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(5,'ThetaC_tempo_M5', 'png');

figure (6)
surf(xl,yl,Mc6);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=2s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(6,'ThetaC_tempo_M6', 'png');

figure (7)
surf(xl,yl,Mc7);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=4s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(7,'ThetaC_tempo_M7', 'png');

figure (8)
surf(xl,yl,Mc8);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=5s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(8,'ThetaC_tempo_M8', 'png');

figure (9)
surf(xl,yl,Mc9);
grid on;
box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante t=7s')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(9,'ThetaC_tempo_M9', 'png');

figure (10)
surf(xl,yl,Mcf);
grid on;

```

```

box on;
xlabel ('Coordenada X [m]');
ylabel ('Coordenada Y [m]');
zlabel ('Temperatura Tc [K]');
title ('Temperatura Tc no instante final')
axis([0 0.4 0 0.4 290 310]);
saveas(10,'ThetaC_tempo_Mf', 'png');

end

if fprintf == 4

vh1 = Mhf(1,:);
vh2 = Mhf(16,:);
vh3 = Mhf(32,:);
vh4 = Mhf(48,:);
vh5 = Mhf(64,:);
vh6 = Mhf(80,:);

figure (1)
plot(xl,vh1,'r',xl,vh2,'y',xl,vh3,'g',xl,vh4,'c',xl,vh5,'b',xl,vh6,'m');
grid on;
xlabel('Distância X [m]');
ylabel('Temperatura[K]');
title('Cortes do mapa de Temp H no ultimo instante de simulação / Temp H x Distância da entrada (X)');
saveas(1,'TempH_cortes_mapa_final', 'png');

vc1 = Mcf(:,1);
vc2 = Mcf(:,16);
vc3 = Mcf(:,32);
vc4 = Mcf(:,48);
vc5 = Mcf(:,64);
vc6 = Mcf(:,80);

figure (2)
plot(yl,vc1,'r',yl,vc2,'y',yl,vc3,'g',yl,vc4,'c',yl,vc5,'b',yl,vc6,'m');
grid on;
xlabel('Distância Y [m]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('Cortes do mapa de Temp C no ultimo instante de simulação / Temp C x Distância da entrada (Y)');
saveas(2,'TempC_cortes_mapa_final', 'png');

vw1 = Mwf(:,1);
vw2 = Mwf(:,16);
vw3 = Mwf(:,32);
vw4 = Mwf(:,48);
vw5 = Mwf(:,64);
vw6 = Mwf(:,80);

figure (3)
plot(yl,vw1,'r',yl,vw2,'y',yl,vw3,'g',yl,vw4,'c',yl,vw5,'b',yl,vw6,'m');

```

```

grid on;
xlabel('Distância Y [m]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('Cortes do mapa de Temp W no ultimo instante de simulação / 
Temp W x Distância da entrada (Y)');
saveas(3,'TempW_cortes_mapa_final_Y', 'png');

vw_1 = Mwf(1,:);
vw_2 = Mwf(16,:);
vw_3 = Mwf(32,:);
vw_4 = Mwf(48,:);
vw_5 = Mwf(64,:);
vw_6 = Mwf(80,:);

figure (4)
plot(xl,vw_1,'r',xl,vw_2,'y',xl,vw_3,'g',xl,vw_4,'c',xl,vw_5,'b',xl,
vw_6,'m');
grid on;
xlabel('Distância X [m]')
ylabel('Temperatura[K]')
title('Cortes do mapa de Temp W no ultimo instante de simulação / 
Temp W x Distância da entrada (X)');
saveas(4,'TempW_cortes_mapa_final_X', 'png');

end

```