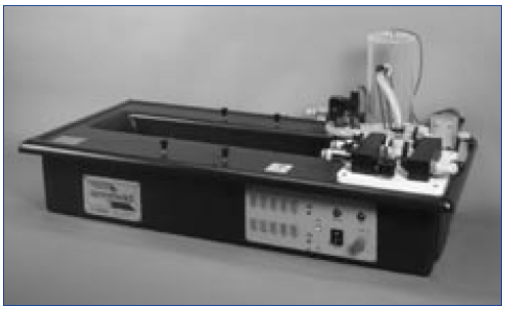
Capitulo 4 – Validação Experimental do Modelo Matemático do Trocador de Calor

Esse capítulo apresenta uma das contribuições importantes do presente trabalho. NOVAZZI (2006) em sua tese de doutorado desenvolveu o modelo matemático do trocador de calor discretizado (conforme apresentado anteriormente no Capítulo 2, item 2.8), apresentando os estudos por ele desenvolvidos em simulador (*Matlab*/*Simulink*). Sendo assim, o Capítulo 4 desta tese contribui complementando o trabalho desenvolvido por NOVAZZI (2006), apresentando dados práticos obtidos com a planta piloto e comparando com os dados gerados pelo modelo matemático. O critério de erro quadrático determinará a qualidade entre os dados provenientes da planta piloto e de simulação. Além disso, serão apresentadas as dinâmicas envolvidas no modelo matemático a partir de simulações realizadas em *Matlab/Simulink*.

4.1. Validação experimental com o TC da *Armfield*

Para a validação experimental do modelo matemático, foi utilizado um kit didático para estudo de trocadores de calor, da empresa inglesa *Armfield*. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Energética do Centro Universitário da FEI.

O kit didático dispõe de toda a instrumentação e facilidades para o desenvolvimento de estudos na área de troca térmica: fonte de geração de água quente, transmissores de temperatura instalados na entrada e na saída de cada ponto do trocador e um sistema de aquisição de dados, para a coleta de informações dos ensaios realizados. Tem-se na Figura 4.1 uma visão geral do kit e também do trocador 1-1 casco tubo utilizado.



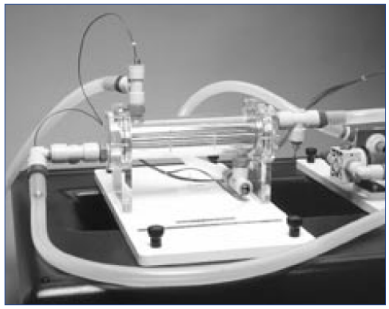


Figura 4.1 – Sistema de troca térmica *Armfield* e o TC casco e tubo (fonte www.armfield.co.uk).

O kit didático não dispõe de um sistema de geração de água fria e, dessa forma, utilizou-se como fonte fria a água disponível da torneira do laboratório à temperatura ambiente. Já para a fonte quente, o kit possui um sistema de aquecimento resistivo, sendo possível o emprego de uma pequena malha de controle para regular a temperatura da água quente de entrada do trocador.

O desenvolvimento deste item foi baseado no procedimento experimental fornecido pelo fabricante do kit didático. Os valores de temperatura e de vazão empregados, assim como os dados de parametrização do modelo, são apresentados pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados do Ensaio Realizado no TC 1-1 *Armfield.*

Dados de Construção Física e de Operação em Regime Permanente	
Temperatura de entrada da água fria (TC_{IN})	24ºC
Temperatura de entrada da água quente (TH_{IN})	45ºC
Temperatura de saída da água fria (TC_{OUT})	27,2ºC
Temperatura de saída da água quente (TH_{OUT})	50ºC
Vazão de água fria (m_C)	1,54l.min^{-1}
Vazão de água quente (m_H)	1,56l.min^{-1}
Área de troca térmica (A_{TC})	0,02m^2
Coef. global de troca térmica (U) (valor inicial)	1000 W.m^{-2}.K^{-1}
Densidade fluido frio / quente (ρ_C, ρ_H)	1000 kg.m^{-3}
Calor específico, fluido frio / quente (C_{PC}, C_{PH})	4180 J.kg^{-1}.K^{-1}
Número de células de troca térmica (n)	50 células

Os valores apresentados na Tabela 4.1 são dados de regime permanente obtidos após o equipamento estar ligado por um intervalo de tempo suficiente. Além da parametrização referente aos dados de processo e de construção do trocador de calor, é necessário informar também o número de células a ser empregado no trocador de calor, uma vez que o modelo matemático foi discretizado em n estágios de troca térmica. Esse número de estágios é extremamente importante, pois a escolha dele irá influenciar diretamente na precisão da resposta apresentada pelo modelo matemático.

Segundo OGATA (2003), “é importante que o modelo mostre a influência de parâmetros distribuídos, isto é, aqueles que dão origem a equações diferenciais

parciais". No caso particular do modelo proposto, as variações das temperaturas quentes e frias estão relacionadas com a posição axial ao longo do trocador e com o tempo.

NOVAZZI (2006) desenvolveu o estudo sobre a influência do número de células do modelo. Segundo ele, a alteração do número de células do modelo influencia diretamente na resposta que o modelo irá apresentar: quanto maior for o número de estágios empregado no modelo, uma semelhança maior é observada entre os formatos do sinal da entrada e da saída do trocador.

Para os estudos a serem apresentados nesse tópico e para os demais estudos que envolverem a utilização do modelo do trocador de calor, será adotado o número de estágios igual a 50, sugerido por NOVAZZI (2006), levando em consideração a precisão na resposta e o tempo gasto em simulação.

Com o objetivo de realizar o estudo da validação do modelo matemático, uma variação do tipo degrau a partir do valor nominal foi imposta na temperatura de entrada quente, e os dados das temperaturas de entrada e saída quente e fria coletados pelo sistema de aquisição. Os resultados práticos obtidos são apresentados pelos gráficos das Figuras 4.2 e 4.3, que mostram os perfis de temperatura de entrada e saída do trocador, para uma variação positiva de 10ºC em TH_{IN} (de 45ºC para 55ºC).

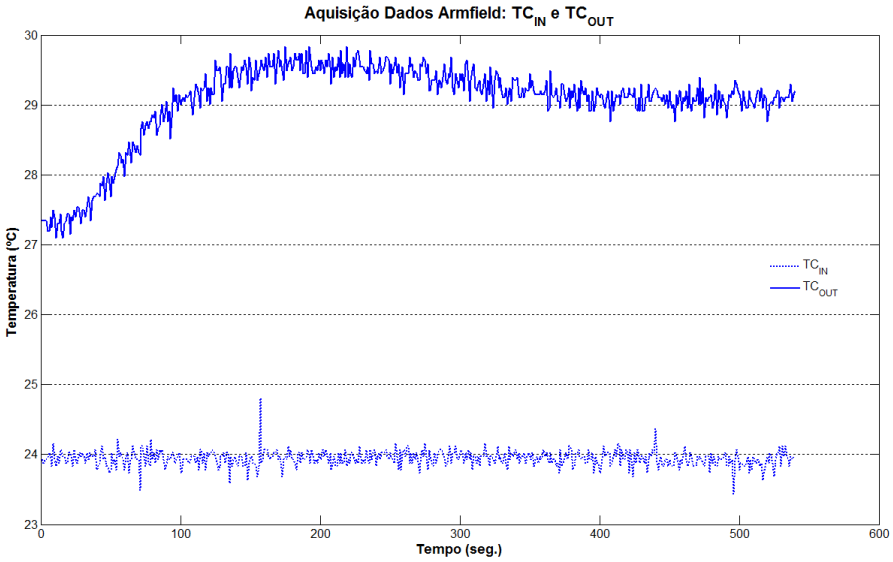


Figura 4.2 – Resposta TC 1-1: Mudança de *set point* em TH_{IN} – Efeito sobre TC_{OUT}.

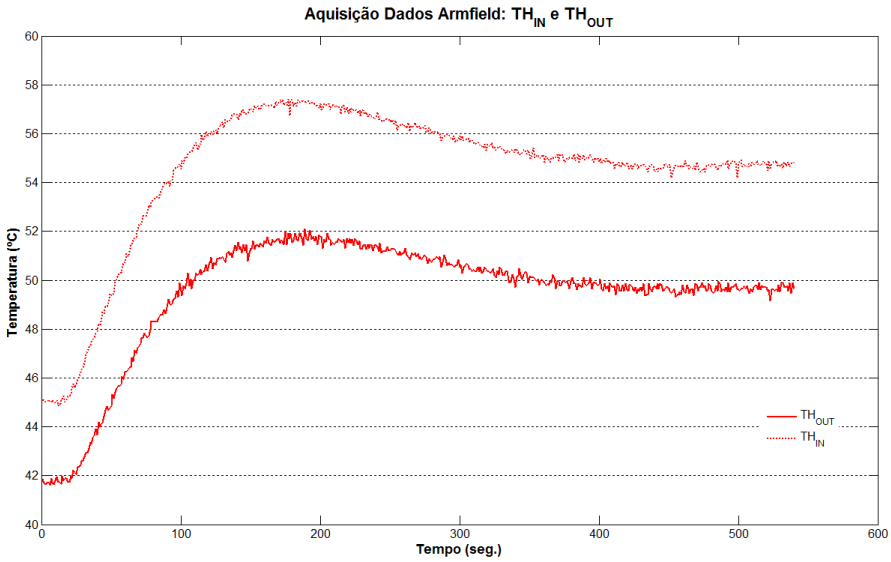


Figura 4.3 – Resposta TC 1-1: Mudança de *setpoint* em TH_{IN} – Efeito sobre TH_{OUT}.

Analisando as Figuras 4.2 e 4.3 é possível concluir que, com o aumento da temperatura de entrada do fluido quente (TH_{IN}), as temperaturas de saída do fluido frio e do fluido quente também aumentaram. Esse comportamento já era esperado, pois a temperatura de entrada fria manteve-se constante e, dessa forma, uma maior quantidade de calor do fluido quente é transmitida ao fluido frio, justificando o comportamento apresentado pelas variáveis do processo.

A partir dos resultados apresentados, utilizou-se o modelo matemático desenvolvido por NOVAZZI (2006), com o objetivo de estudar o comportamento do trocador de calor em simulador (*Matlab/Simulink*), comparando a sua resposta simulada obtida com os resultados experimentais.

Sendo assim, utilizando os resultados do ensaio em regime permanente apresentados anteriormente na Tabela 4.1, configurou-se o modelo matemático com os dados disponíveis de processo e de construção do trocador de calor. Uma proposta de metodologia para a análise e validação do modelo matemático foi elaborada, baseada nos seguintes procedimentos:

- ✓ Ajuste e parametrização inicial do modelo matemático, definindo os dados do processo a serem obtidos, os dados experimentais e de construção do trocador de calor real que será ensaiado;

- ✓ Aquisição de dados do processo real, impondo perturbações nas variáveis de processo, através da mudança de valores (*setpoint*) em regime permanente, sendo essa mudança executada apenas em uma variável por vez;
- ✓ Simulação em Matlab/Simulink empregando o modelo matemático ajustado e devidamente parametrizado, utilizando como sinal de entrada do modelo os dados coletados do trocador de calor real;
- ✓ Comparação das temperaturas de saída do fluído quente e do fluído frio do modelo com os dados coletados durante o ensaio, adotando-se o erro quadrático como medida de qualidade do modelo;
- ✓ Novos ajustes devem ser realizados no coeficiente global de troca térmica, caso o erro seja muito elevado.

Através da metodologia apresentada para a validação do modelo, a primeira simulação em *Matlab/Simulink* é apresentada pela Figura 4.4. Ela mostra os perfis das temperaturas de saída quente e fria, simulados e reais, usando o coeficiente global de troca térmica U = 1100 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

O valor inicial do coeficiente global utilizado foi obtido em função das características construtivas do trocador de calor, fornecidas pelo manual do fabricante. Esse coeficiente representa a “capacidade” do trocador de calor de resfriar o fluido quente e aquecer o fluido frio, sendo que quanto maior for o seu valor, maior será a diferença entre essas temperaturas na saída do trocador.

Uma rápida análise das Figuras 4.4 e 4.5 permite concluir que o modelo matemático desenvolvido por NOVAZZI (2006) representa de forma bastante fiel as variações das temperaturas de saída de um trocador de calor real, apresentando um erro quadrático baixo (< 1) para ambas as temperaturas.

Com o objetivo de verificar a influência do coeficiente global de troca térmica nos valores das temperaturas de saída quente e fria do trocador, novas simulações em *Matlab/Simulink* foram realizadas, aumentando e diminuindo o valor do coeficiente, utilizando o mesmo conjunto de dados das temperaturas reais do trocador empregado na primeira simulação. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam as curvas de resposta das temperaturas quente e fria, real e simulada, respectivamente, com o valor desse coeficiente alterado para um valor maior (U = 1600 [$W.m^{-2}.K^{-1}$]).

Já as Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as curvas de resposta das temperaturas com o valor desse coeficiente alterado para um valor menor (U = 800 [$W.m^{-2}.K^{-1}$]).

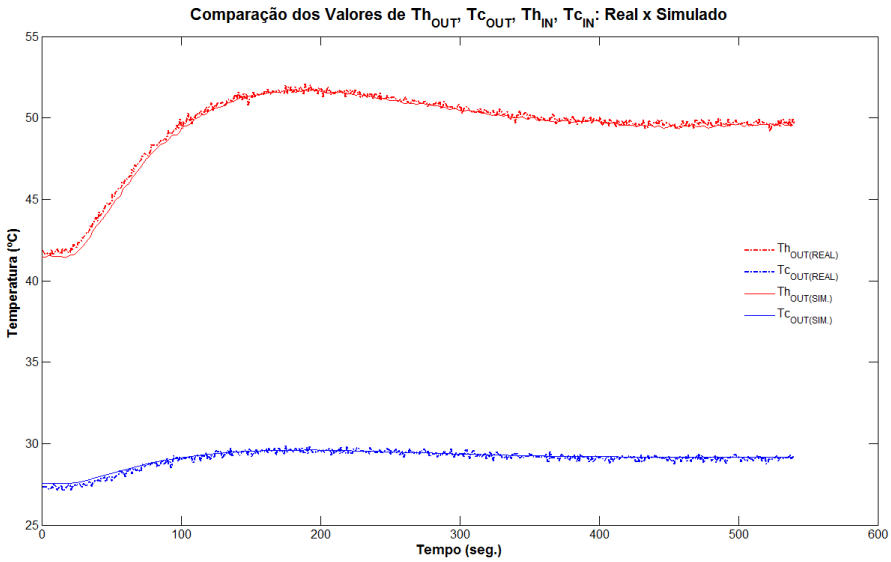


Figura 4.4 – Comparação das curvas T_{HOT} e T_{COLD}: real x simulado, U = 1100 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

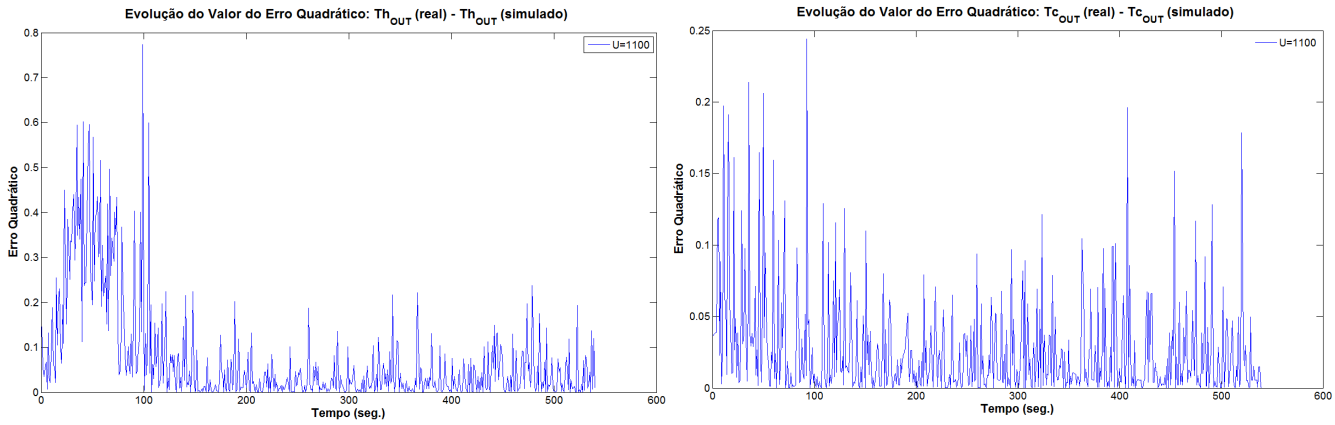


Figura 4.5 – Erro quadrático: T_{HOT} e T_{COLD} para U = 1100 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

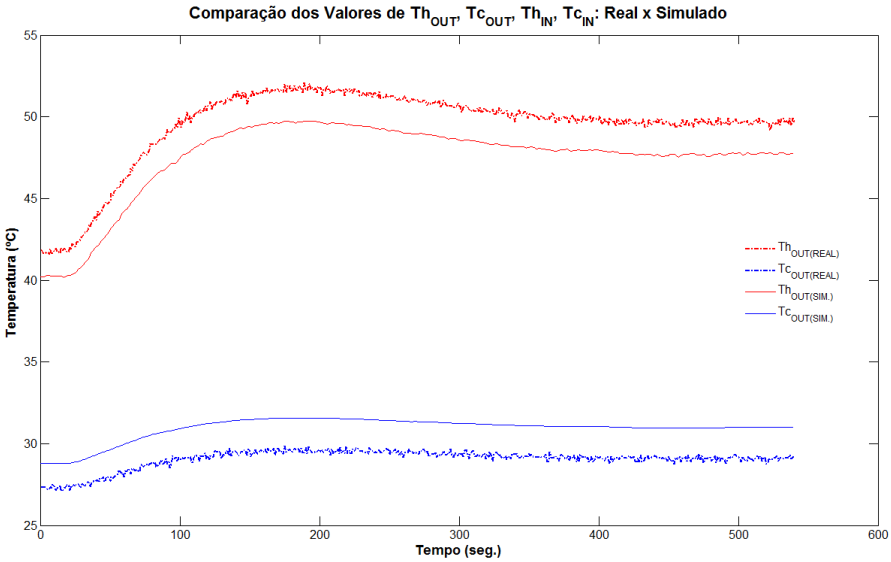


Figura 4.6 – Comparação das curvas T_{HOT} e T_{COLD}: real x simulado, U = 1600 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

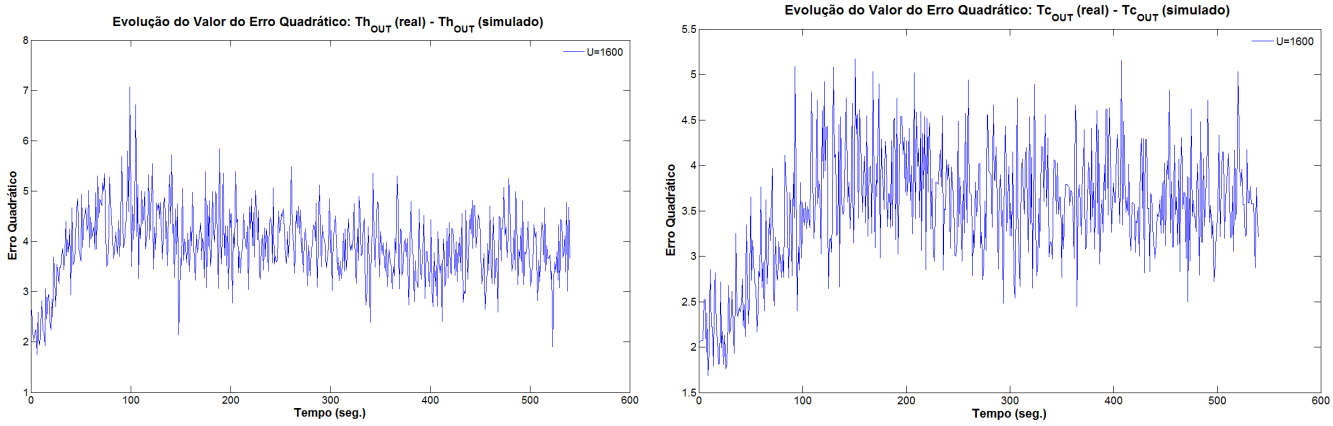


Figura 4.7 – Erro quadrático: T_{HOT} e T_{COLD} para U = 1600 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

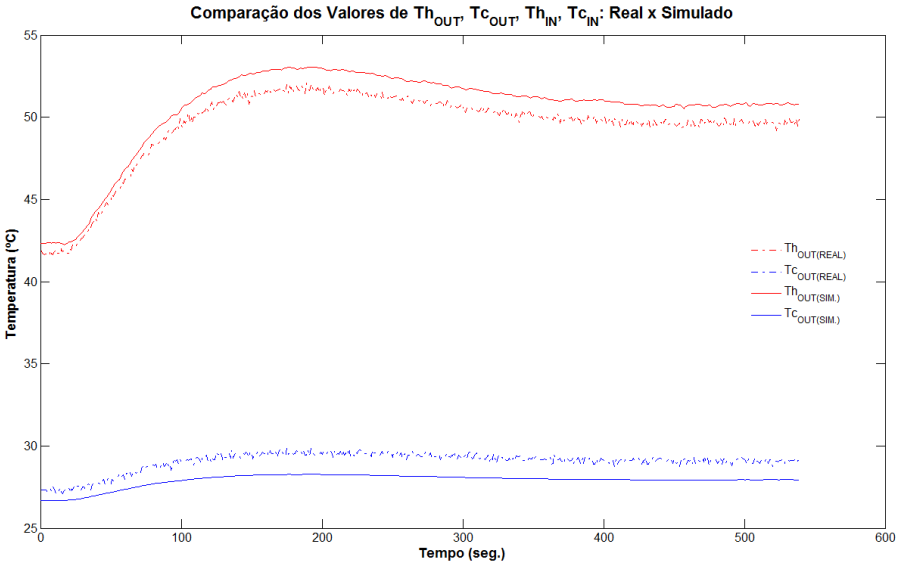


Figura 4.8 – Comparação das curvas T_{HOT} e T_{COLD}: real x simulado, U = 800 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

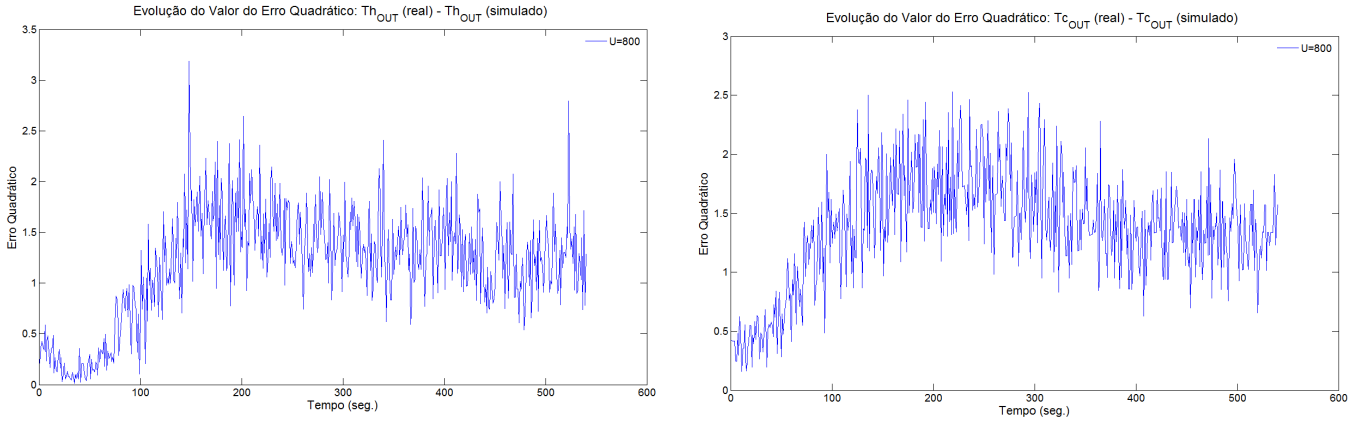


Figura 4.9 – Erro quadrático: T_{HOT} e T_{COLD} para U = 800 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

O aumento do valor do coeficiente provoca alterações em ambas as temperaturas de saída, quente e fria. Na temperatura de saída quente é observado um valor menor que o nominal, e na temperatura de saída fria, um valor maior que o nominal. A justificativa desse fenômeno é que a eficiência do trocador, na ação de realizar a troca térmica, aumenta com a mudança do coeficiente global para um valor maior. Quando o valor do coeficiente global diminui, o efeito esperado é que a eficiência do trocador diminua, fazendo com que a temperatura de saída quente resulte maior que a nominal e a de saída fria, menor que a nominal.

4.2. Validação experimental com o TC da RTC

4.2.1. Validação do TC da Linha 1

Para o desenvolvimento deste tópico, foram utilizados como referência os procedimentos do item 4.1, onde é apresentada a validação matemática do trocador de calor do kit didático da *Armfield.*

Dessa forma, realizou-se uma aquisição de dados do equipamento, em uma determinada condição de operação, apresentada pela Tabela 4.2. Utilizou-se o mesmo procedimento apresentado, onde será realizado o ajuste do coeficiente global de troca térmica (U).

Tabela 4.2 – Dados da condição de operação e construção física do trocador de calor 1.

Dados de Construção Física e de Operação em Regime Permanente	
Temperatura de Entrada da Água Fria (TC_{IN})	21,5ºC
Temperatura de Entrada da Água Quente (TH_{IN})	52ºC
Temperatura de Saída da Água Fria (TC_{OUT})	25,9ºC
Temperatura de Saída da Água Quente (TH_{OUT})	47,1ºC
Vazão de Água Fria (m_C)	0,16l.s^{-1}
Vazão de Água Quente (m_H)	0,16l.s^{-1}
Área de Troca Térmica (A_{TC})	0,1m^2
Coef. global de troca térmica (U) (valor inicial)	1000 W.m^{-2}.K^{-1}
Densidade fluido frio / quente (ρ_C, ρ_H)	1000 kg.m^{-3}
Calor específico, fluido frio / quente (C_{PC}, C_{PH})	4180 J.kg^{-1}.K^{-1}
Número de células de troca térmica (n)	50 células

A análise dinâmica foi realizada no trocador a partir de uma variação em degrau no valor da temperatura quente de 52ºC para 57ºC no instante t=700s. A Figura 4.10 e a Figura 4.11 mostram as aquisições realizadas nesse primeiro ensaio, referentes aos perfis de temperatura da linha quente e da linha fria, respectivamente.

Tomando como referência os vetores dos sinais de entrada (TH_{IN} e TC_{IN}) da planta, esses sinais foram introduzidos no modelo do trocador no *Simulink,* gerando dois vetores de temperatura de saída simulados ($TH_{OUT_SIMULADO}$ e $TC_{OUT_SIMULADO}$). A comparação entre os sinais de saída adquiridos e os sinais de saída simulados é apresentada pelas Figuras 4.12 e 4.13. Já a Figura 4.14 mostra o erro quadrático

entre os valores simulados e reais do processo ajustado para as temperaturas quente e fria de saída com o valor do coeficiente global de troca térmica (*U*) fixado em 1300 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

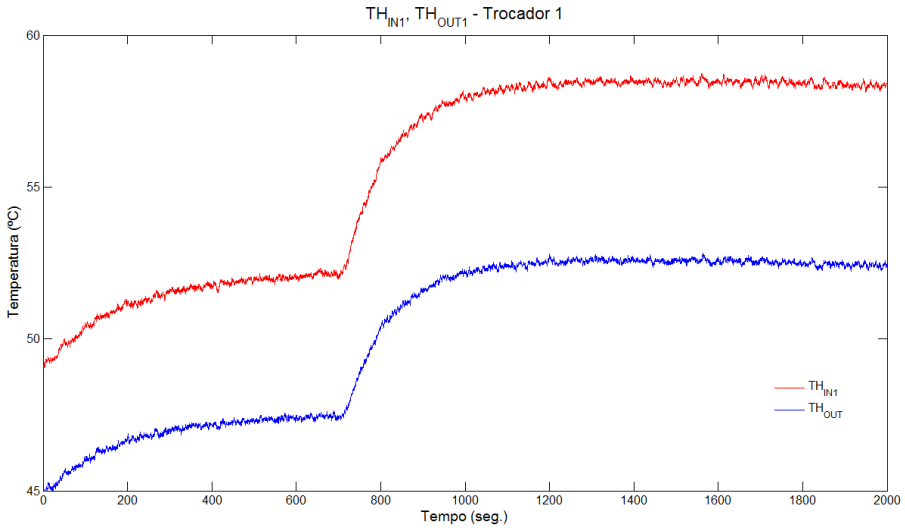


Figura 4.10 – Variação nas temperaturas de entrada e saída quente: Trocador TC1.

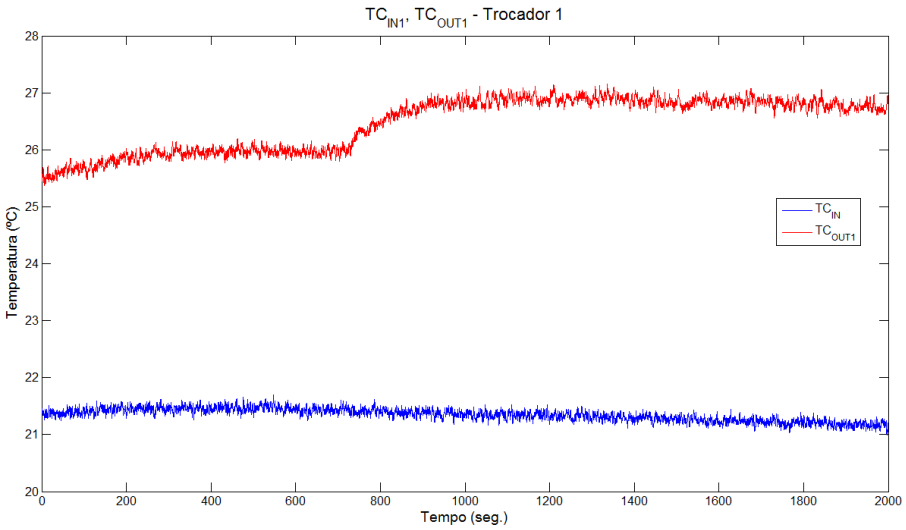


Figura 4.11 – Variação nas temperaturas de entrada e saída fria: Trocador TC1.

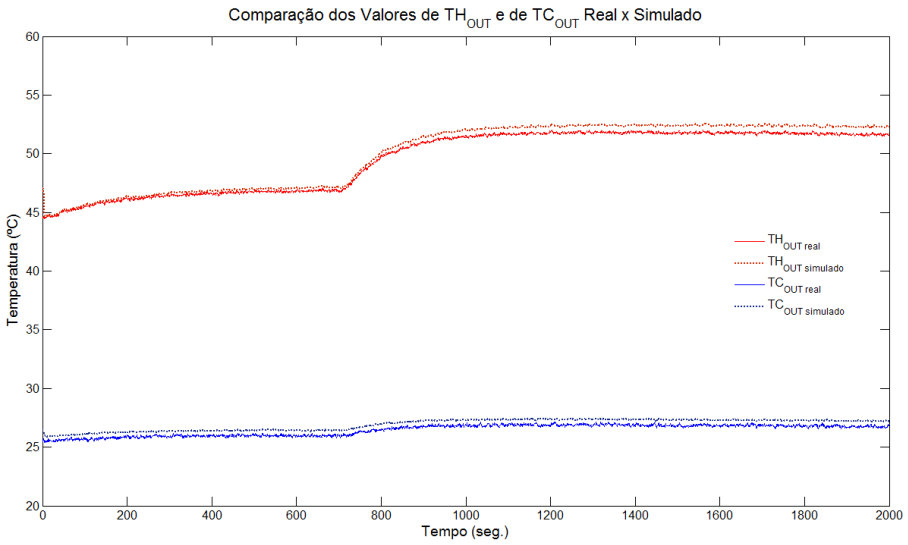


Figura 4.12 – Perfil das temperaturas de saída quente e fria, real e simulada: Trocador TC1.

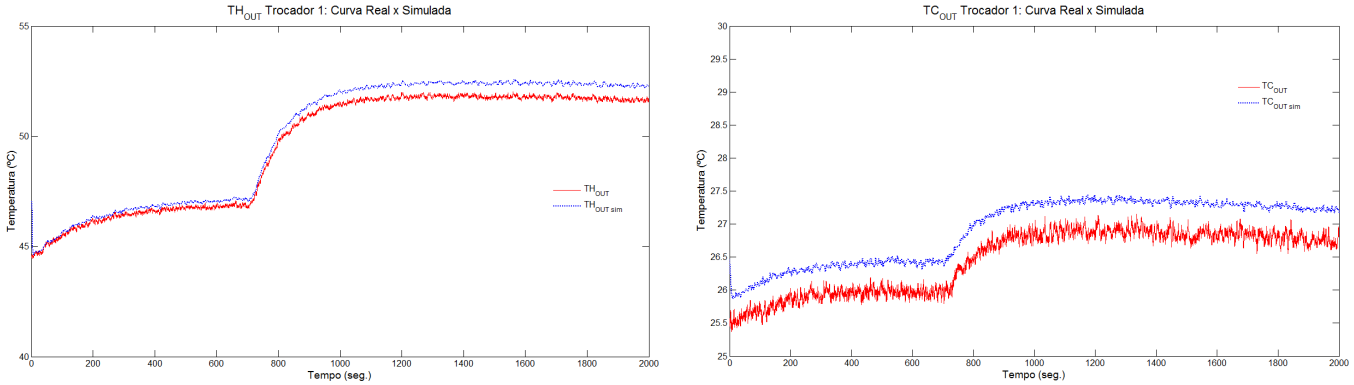


Figura 4.13 – Perfil das temperaturas de saída quente e fria, real e simulada: Trocador TC1.

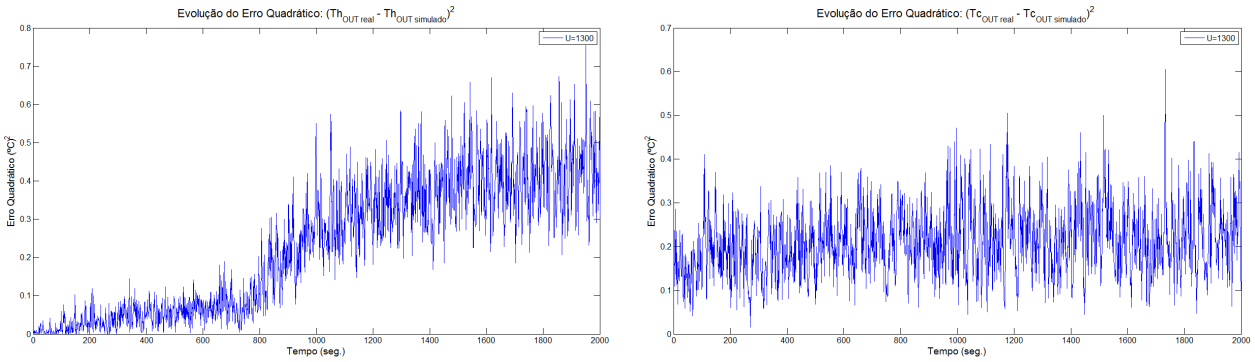


Figura 4.14 – Erro quadrático para as saídas quente e fria: Trocador TC1.

Analisando as Figuras 4.13 e 4.14, nota-se que existe uma diferença maior nos perfis de temperatura fria do que nos perfis de temperatura quente. Essa diferença justifica-se pela ausência no modelo em *Matlab/Simulink*, da parcela de energia dissipada para o meio ambiente, fazendo com que a temperatura de saída fria simulada atinja valores mais elevados de temperatura do que a saída fria real do trocador de calor da rede. Essa diferença não ocorreu no trocador de calor da *Armfield* porque as tubulações e a área exposta do kit didático é muito menor que a área da RTC construída.

4.2.2. Validação do TC da Linha 2

Para o desenvolvimento desse tópico, foram novamente utilizados como referência, os procedimentos desenvolvidos para a validação do trocador da linha 1 onde novamente o ajuste paramétrico foi realizado no valor do coeficiente global de troca térmica (*U*). A Tabela 4.3 detalha as condições de operação que o ensaio foi realizado.

Tabela 4.3 – Dados da condição de operação e construção física do trocador de calor 2

Dados de Construção Física e de Operação em Regime Permanente	
Temperatura de Entrada da Água Fria (TC_{IN})	21ºC
Temperatura de Entrada da Água Quente (TH_{IN})	55,7ºC
Temperatura de Saída da Água Fria (TC_{OUT})	25,5ºC
Temperatura de Saída da Água Quente (TH_{OUT})	50ºC
Vazão de Água Fria (m_C)	0,16l.s^{-1}
Vazão de Água Quente (m_H)	0,16l.s^{-1}
Área de Troca Térmica (A_{TC})	0,1m^2
Coef. global de troca térmica (*U*) (valor inicial)	1000 W.m^{-2}.K^{-1}
Densidade fluido frio / quente (ρ_C, ρ_H)	1000 kg.m^{-3}
Calor específico, fluido frio / quente (C_{PC}, C_{PH})	4180 J.kg^{-1}.K^{-1}
Número de células de troca térmica (*n*)	50 células

A análise dinâmica foi realizada no trocador a partir de uma variação em degrau no valor da temperatura quente de 56ºC para 63ºC, no instante *t*=700s. A Figura 4.15 e a Figura 4.16 mostram as aquisições realizadas nesse primeiro ensaio, referentes aos perfis de temperatura da linha quente e da linha fria, respectivamente.

Assim como no item 4.2.1, tomando como referência os vetores dos sinais de entrada (TH_{IN} e TC_{IN}) da planta física, esses sinais foram introduzidos no modelo do trocador no *Simulink* gerando dois vetores de temperatura de saída simulados ($TH_{OUT_SIMULADO}$ e $TC_{OUT_SIMULADO}$). A comparação entre os sinais de saída aquisitados e os sinais de saída simulados é apresentada pelas Figuras 4.17 e 4.18. Já a Figura 4.19 mostra o erro quadrático entre os valores simulados e reais do processo para a temperatura quente e fria, respectivamente, com o valor do coeficiente global de troca térmica ajustado para 1300 [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

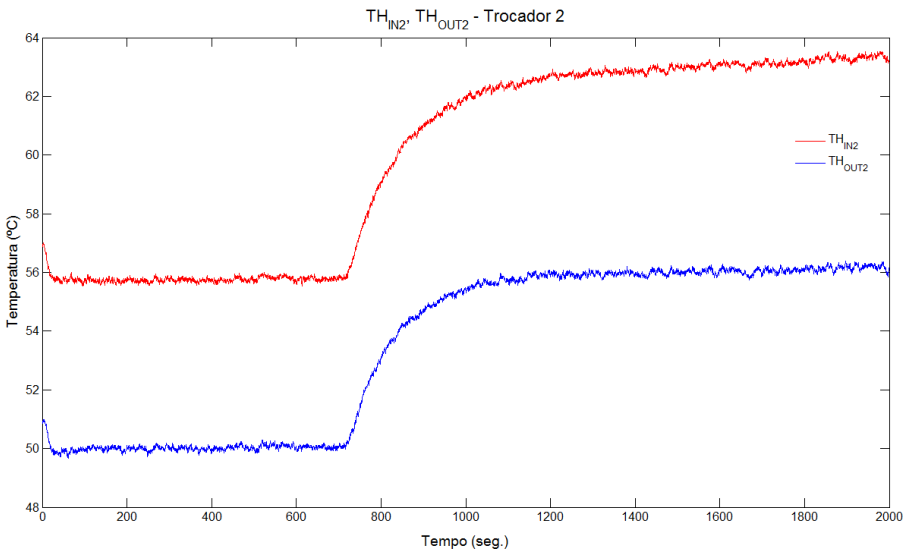


Figura 4.15 – Variação nas temperaturas de entrada e saída quente: Trocador TC2.

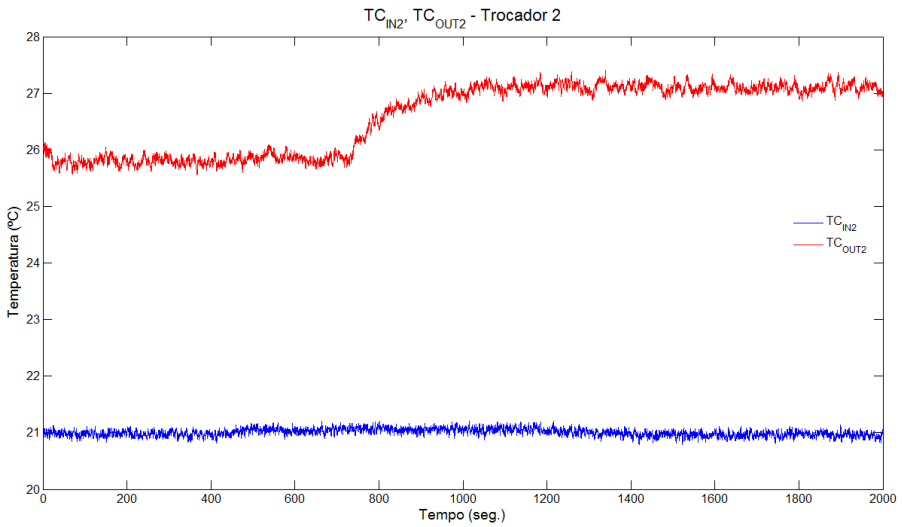


Figura 4.16 – Variação nas temperaturas de entrada e saída fria: Trocador TC2.

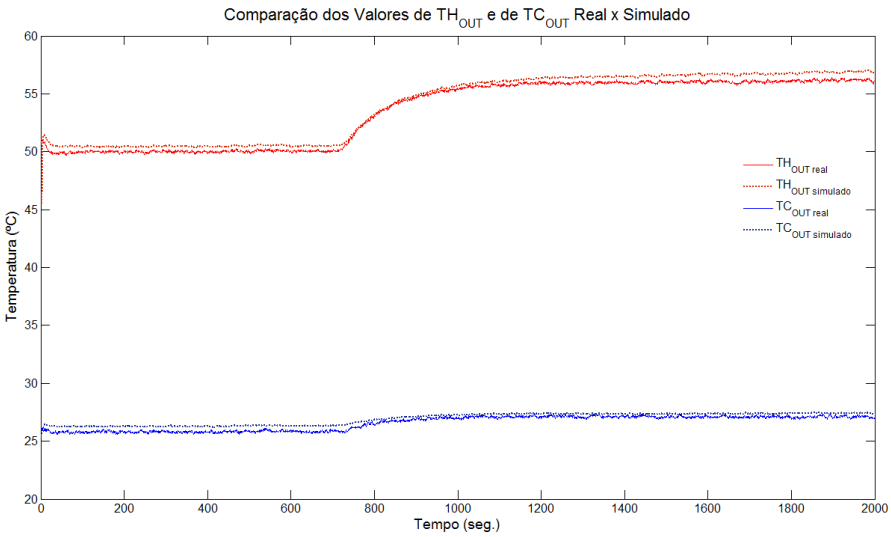


Figura 4.17 – Perfil das temperaturas de entrada e saída quente e fria, real e simulada: Trocador TC2.

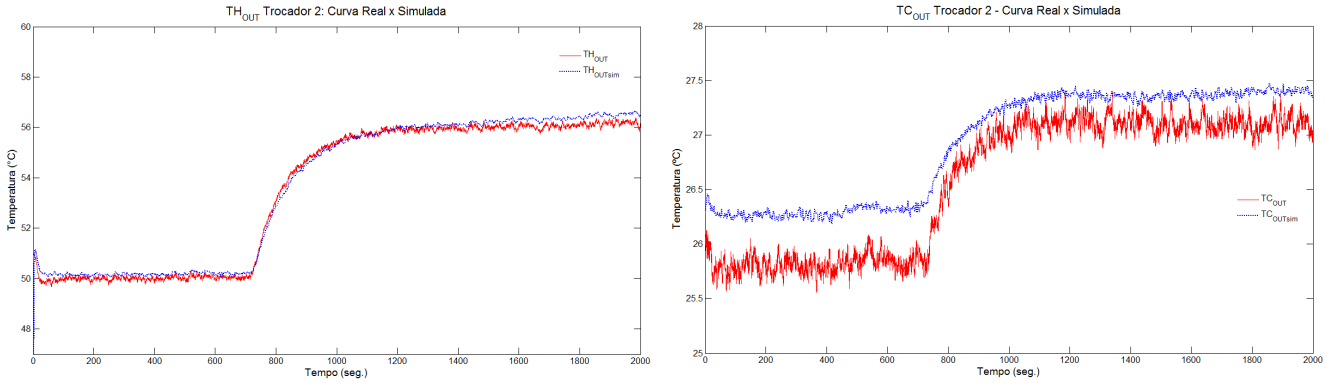


Figura 4.18 – Perfil das temperaturas saída quente e fria, real e simulada: Trocador TC2.

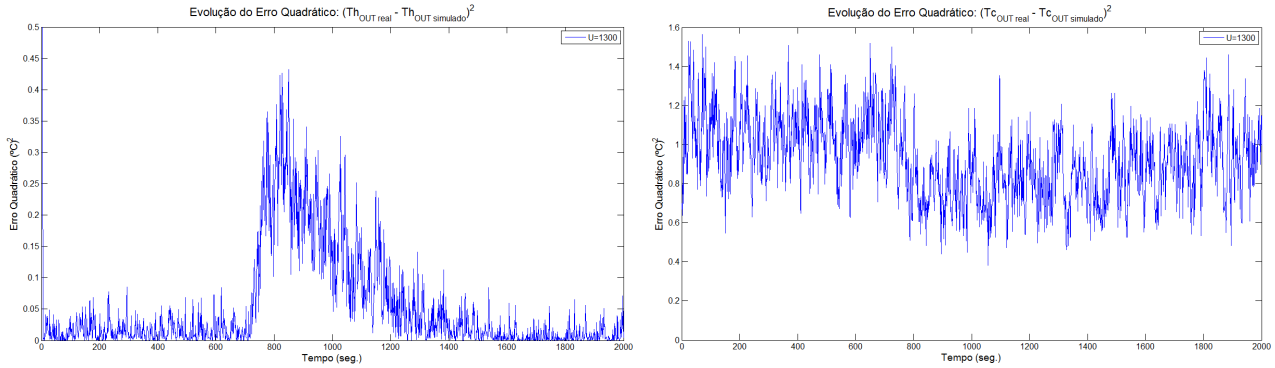


Figura 4.19 – Erro quadrático para as saídas quente e fria: Trocador TC2.

A mesma observação já realizada no item 4.2.1 é novamente verificada nesta seção, onde, analisando as Figuras 4.18 e 4.19, nota-se que existe uma diferença maior nos perfis de temperatura fria do que nos perfis de temperatura quente, justificado pela ausência no modelo em *Matlab/Simulink* da parcela de energia dissipada para o meio ambiente, fazendo com que a temperatura de saída fria simulada atinja valores mais elevados do que a saída fria real do trocador de calor da rede.

4.3. Validação experimental da RTC

A partir do ajuste no coeficiente global de troca térmica dos trocadores de calor 1 e 2 da RTC do laboratório, realizados no item 4.2, realizou-se uma aquisição aplicando algumas variações nas temperaturas de entrada quente de cada linha. Os vetores de entrada de cada linha quente e também da linha fria adquiridos foram introduzidos no modelo da RTC no *Matlab/Simulink* gerando os vetores de temperatura de saída simulados ($TH_{OUT_1_SIM}$, $TC_{OUT_1_SIM}$, $TH_{OUT_2_SIM}$, $TC_{OUT_2_SIM}$). A Figura 4.20 e a Figura 4.21 mostram os perfis de temperatura de entrada e de saída de cada trocador da RTC durante o ensaio realizado. A Tabela 4.4 apresenta os dados referentes às vazões quente e fria e também o valor do coeficiente global de troca térmica de cada trocador.

Tabela 4.4 – Dados da condição de operação e construção física da RTC

Dados de Construção Física e de Operação em Regime Permanente	
Vazão de Água Quente, Linha 1 (m_{H_1})	0,16l.s^{-1}
Vazão de Água Quente, Linha 2 (m_{H_2})	0,16l.s^{-1}
Vazão de Água Fria (m_C)	0,16l.s^{-1}
Área de Troca Térmica, Trocador 1 e 2 (A_{TC})	0,1m^2
Coef. Global Troca Térmica, Trocador 1 e 2 (U)	1300W.m^{-2}.K^{-1}
Densidade fluido frio / quente (ρ_C, ρ_H)	1000 kg.m^{-3}
Calor específico, fluido frio / quente (C_{PC}, C_{PH})	4180 J.kg^{-1}.K^{-1}
Número de células de troca térmica (n)	50 células

A comparação entre as temperaturas de saída adquiridas e as temperaturas de saída simuladas é apresentada pelas Figuras 4.22 e 4.23 para a linha quente 1 e para a linha quente 2, respectivamente.

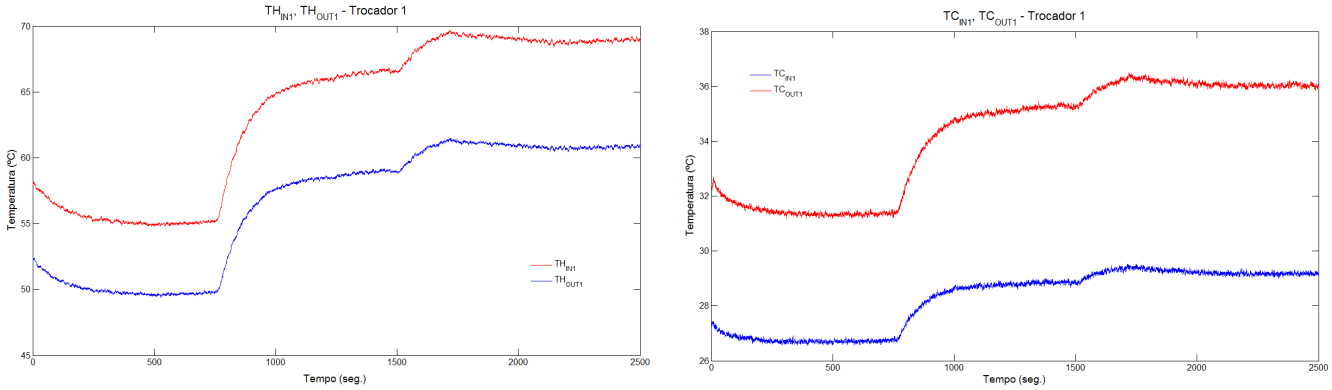


Figura 4.20 – Perfil das temperaturas de entrada e saída quente e fria: Trocador TC1.

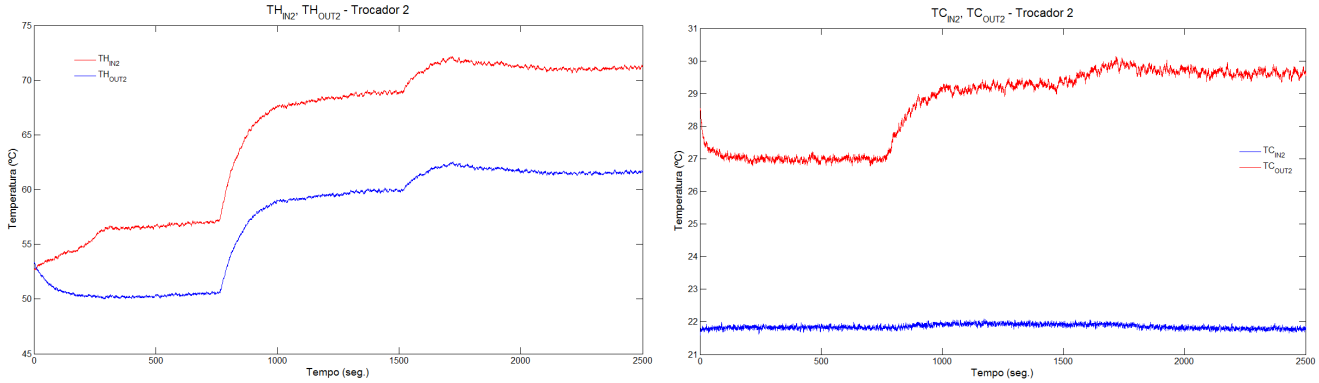


Figura 4.21 – Perfil das temperaturas de entrada e saída quente e fria: Trocador TC2.

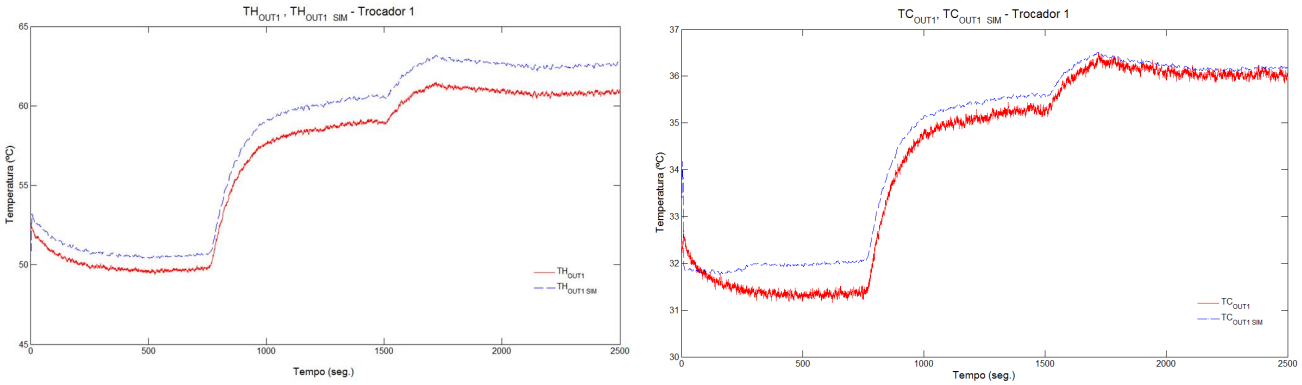


Figura 4.22 – Perfil das temperaturas de saída quente e fria, real x simulada: Trocador TC1.

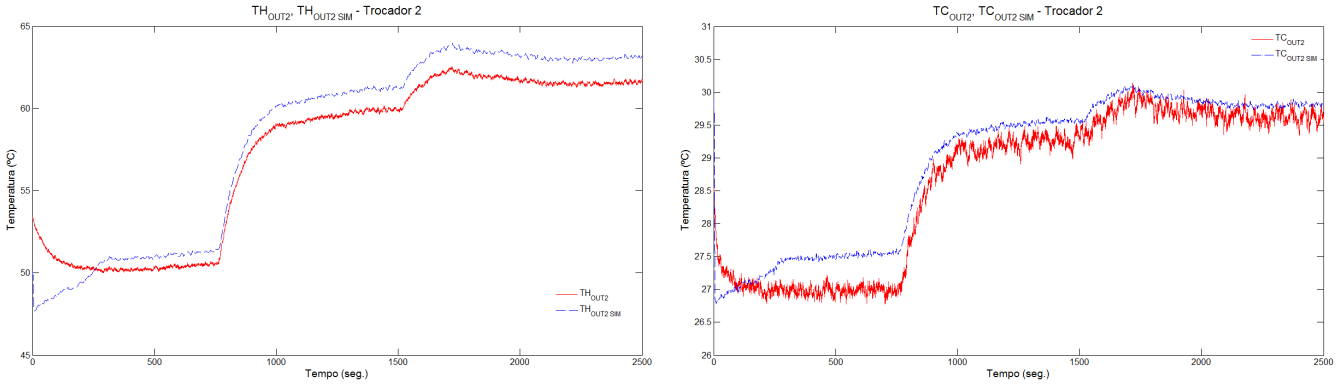


Figura 4.23 – Perfil das temperaturas de saída quente e fria, real x simulada: Trocador TC2.

Novamente as simulações apresentaram uma pequena diferença com os valores reais aquisitados da RTC. Analisando as Figuras 4.22 e 4.23 percebe-se que as perdas na linha fria em ambos os trocadores foram mais significativas que as perdas na linha quente, o que também é justificado pela parcela de perda de energia para o meio ambiente. Como o modelo matemático não leva em consideração essa parcela de perda, as temperaturas de saída fria tendem a assumir valores mais elevados em simulação: no simulador, considera-se que apenas ocorra a troca de calor com a linha quente, o que não ocorre na prática devido à parcela de energia perdida para o meio ambiente.