IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESTADOS ESTACIONÁRIOS ACOPLADA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR

DANILO KOERICH PRÉVE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA ESCOLA DE QUÍMICA DA UFRJ.

ORIENTADORES

PROF. MAURÍCIO BEZERRA DE SOUZA JR., D.SC.

PROF. ARGIMIRO RESENDE SECCHI, D.SC.

ESCOLA DE QUÍMICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

2018

IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESTADOS ESTACIONÁRIOS ACOPLADA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR

DANILO KOERICH PRÉVE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ESCOLA DE QUÍMICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO 2018

Préve, Danilo Koerich

P944i Identificação automática de estados estacionários acoplada a avaliação do desempenho de trocadores de calor / Danilo Koerich Préve. -- Rio de Janeiro, 2018.

196 f.

Orientador: Maurício Bezerra de Souza Junior.

Coorientador: Argimiro Resende Secchi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2018.

1. Processamento de sinais. 2. Identificação de estados estacionários. 3. Reconciliação de dados. 4. Tese. (Mestrado – UFRJ/EQ). 5. Maurício Bezerra de Souza Junior e Argimiro Resende Secchi. I. Souza Junior, Maurício Bezerra de, orient. II. Secchi, Argimiro Resende, coorient. III. Título.

IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESTADOS ESTACIONÁRIOS ACOPLADA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR

DANILO KOERICH PRÉVE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA ESCOLA DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.SC).

APROVADO POR:

Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.
Orientador

Prof. Argimiro Resende Secchi, D.Sc.
Coorientador

Profª. Márcia Peixoto Vega Domiciano, D.Sc.

Profª.Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus professores orientadores, Maurício Bezerra de Souza Jr. e Argimiro Resende Secchi, pela confiança, paciência, compreensão e todo o suporte durante esse período.

Aos meus pais, Mirian e Renato, por toda educação, valores e suportes imprescindíveis para trilhar essa jornada.

Aos meus irmãos, Felipe e Marina, pelos indescritíveis momentos de alegria.

À minha namorada, Gabriéli, pela compreensão e paciência.

Aos meus amigos, que tornaram essa e todas as jornadas mais agradáveis. Menção honrosa ao Rodrigo Peralta, pelo convívio e incentivo na realização do mestrado.

Aos colegas e amigos da Radix, que apoiaram a realização da dissertação, possibilitando minha ausência no trabalho quando necessário.

Resumo:

PRÉVE, Danilo Koerich. Identificação automática de estados estacionários acoplada a avaliação do desempenho de trocadores de calor. Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Junior e Argimiro Resende Secchi. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos).

De modo a minimizar o consumo de energia em uma planta de processo equipada com trocadores de calor, o operador precisa saber como evitar a redução da recuperação de calor durante o período de operação. Dessa forma, é importante monitorar o desempenho da troca térmica de trocadores de calor. No presente estudo, um modelo dinâmico, baseado em células, de trocador de calor foi utilizado com o objetivo de avaliar o desempenho desses equipamentos, por meio do monitoramento do coeficiente global de troca térmica. Foram propostos dois métodos de detecção de estados estacionários baseados na metodologia de reconciliação de dados e seus resultados foram comparados com um método de referência. Para tanto, inicialmente, investigou-se o modelo dinâmico, variando-se o número de células e comparando-se a utilização da força motriz de troca térmica dada pela diferença linear de temperatura e a dada pela diferença de temperatura média logarítmica, empregando-se um exemplo de trocador de calor da literatura, como planta. Os métodos para a identificação de estados estacionários foram comparados, tendo sido avaliados diferentes comprimentos de janelas móveis, considerando dados de planta sem erros e com erros aleatórios em dois níveis distintos de variância. Os dois métodos propostos apresentaram excelentes resultados quando considerados dados sem erros aleatórios. Já para as avaliações considerando erros aleatórios nas medidas, o método baseado na função objetivo da reconciliação de dados apresentou o maior percentual de detecção de estados estacionários, seguido do método de referência. As metodologias propostas também resultaram em estimativas do coeficiente de transferência de calor com menores erros percentuais.

Abstract:

PRÉVE, Danilo Koerich. Steady state automatic identification coupled with heat exchangers performance evaluation. Supervisors: Maurício Bezerra de Souza Junior and Argimiro Resende Secchi. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2018. M.Sc. Dissertation (Graduate Program on Engineering of Chemical and Biochemical Processes).

In order to minimize energy consumption in a process plant with heat exchangers, the operator has to avoid reducing heat recovery during the plant operation. Thus, it is important to monitor the heat transfer performance of heat exchangers. In this study, a cell-based dynamic HX model was used to evaluate the performance of heat exchangers by monitoring the overall heat transfer coefficient. Two methods of steady-state detection were proposed based on the data reconciliation methodology and their results were compared with a reference method. Initially, the dynamic HX model was investigated by varying the number of cells and comparing the use of the heat transfer driving force given by the linear difference of temperature and that given by the logarithmic mean temperature difference, using an example of a heat exchanger from literature as the process plant. The methods for steady-state identification were compared and different lengths of moving windows were evaluated, considering plant data without errors, as well as plant data with random errors at two different variance levels. The two proposed methods presented excellent results when considering plant data without random errors. For the evaluations considering random errors in the measurements, the method based on the objective function of data reconciliation methodology presented the highest percentage of steady state detection, followed by the reference method. The proposed methodologies also resulted in estimates of overall heat transfer coefficients with lower error percentage.

Sumário:

1 Introdução 1
1.1 Motivação e Objetivos 1
1.2 Estrutura da Dissertação 2
2 Revisão Bibliográfica 4
2.1 Apresentação 4
2.2 Modelagem Dinâmica de Trocadores de Calor 4
2.3 Erros em Dados Temporais 6
2.4 Detecção de Estados Estacionários 7
2.5 Reconciliação de Dados 8
3 Metodologia 10
3.1 Modelos Dinâmicos de Trocador de Calor 10
3.1.1 Modelo de Células 10
3.1.2 Cálculo da Diferença de Temperatura na Célula 12
3.1.3 Parâmetros e Modelos Avaliados 13
3.2 Simulação Dinâmica do Trocador de Calor 13
3.2.1 Definição do Trocador de Calor 13
3.2.2 Perturbações nas Variáveis de Entrada 14
3.2.3 Geração de Erros Aleatórios 15
3.3 Aplicação de Janelas Móveis de Dados no Tempo 15
3.4 Detecção de Estados Estacionários 17
3.4.1 Reconciliação de Dados 17
3.4.2 Método 1: Avaliação da Função Objetivo da Reconciliação de Dados 18
3.4.3 Método 2: Avaliação do Desvio entre Variáveis Medidas e Reconciliadas 19
3.4.4 Metodologia de Detecção de Estados Estacionários de Referência 19
3.4.5 Resultado Correto Esperado para Detecção de Estados Estacionários 21
3.4.6 Métodos de Avaliação do Desempenho de Detecção de Estados Estacionários 21
3.5 Avaliação da Troca Térmica nos Estados Estacionários Detectados 23
4 Resultados e Discussão 24
4.1 Avaliação dos Modelos Dinâmicos de Trocador de Calor 24
4.1.1 Avaliação de Estados Estacionários 24
4.1.2 Avaliação de Respostas Dinâmicas 42
4.1.3 Avaliação do Tempo de Simulação 45

4.1.4 Definição do Modelo a ser Utilizado 47
4.2 Resultados Dinâmicos do Trocador de Calor 48
4.2.1 Resultados Sem Erros Aleatórios 48
4.2.2 Resultados Com Erros Aleatórios 52
4.3 Aplicação de Janelas Móveis de Dados no Tempo 55
4.3.1 Variação da Frequência de Amostragem dos Dados 56
4.3.2 Variação do Comprimento da Janela Móvel de Dados 61
4.3.3 Comparação entre Janelas Móveis com Média do Tipo Passado e Média do Tipo Simétrica 65
4.3.4 Variação do Nível dos Erros Aleatórios nos Dados Gerados 70
4.4 Reconciliação de Dados 74
4.4.1 Reconciliação dos Resultados Corretos 75
4.4.2 Reconciliação dos Resultados com Erros Regulares 81
4.4.3 Reconciliação dos Resultados com Erros Acentuados 86
4.4.4 Reconciliação dos Resultados com Janela Móvel sobre Erros Regulares 90
4.4.5 Reconciliação dos Resultados com Janela Móvel sobre Erros Acentuados 95
4.5 Detecção de Estados Estacionários 100
4.5.1 Definição dos Períodos Estacionários Corretos 100
4.5.2 Detecção de Estados Estacionários com Método 1: Avaliação da Função Objetivo da Reconciliação de Dados 102
4.5.3 Detecção de Estados Estacionários com Método 2: Avaliação do Desvio entre Variáveis Medidas e Reconciliadas 127
4.5.4 Detecção de Estados Estacionários com Metodologia Aceita na Literatura 154
4.5.5 Comparação dos Métodos de Detecção de Estados Estacionários 157
4.6 Avaliação da Troca Térmica nos Estados Estacionários Detectados 160
5 Conclusões e Sugestões 164
5.1 Conclusões 164
5.2 Sugestões 167
6 Referências Bibliográficas 168

Lista de Figuras:

Figura 3.1 – Diagrama de modelo de células de trocador de calor. 10
Figura 3.2 – Janela de tempo com dados passados. 16
Figura 3.3 – Janela de tempo com dados passados e futuros (simétrica). 16
Figura 4.1 – Comparação das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 1. 26
Figura 4.2 – Comparação do erro das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 1. 27
Figura 4.3 – Comparação do erro percentual das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 1. 27
Figura 4.4 – Comparação das taxas de fluxo de calor variando o número de células para cenário 1. 29
Figura 4.5 – Diferença absoluta da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 1. 30
Figura 4.6 – Diferença percentual da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 1. 30
Figura 4.7 – Comparação das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 2. 32
Figura 4.8 – Comparação do erro das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 2. 33
Figura 4.9 – Comparação do erro percentual das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 2. 33
Figura 4.10 – Comparação das taxas de fluxo de calor variando o número de células para cenário 2. 35
Figura 4.11 – Diferença absoluta da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 2. 35
Figura 4.12 – Diferença percentual da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 2. 36
Figura 4.13 – Comparação das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 3. 38
Figura 4.14 – Comparação do erro das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 3. 38
Figura 4.15 – Comparação do erro percentual das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 3. 39
Figura 4.16 – Comparação das taxas de fluxo de calor variando o número de células para cenário 3. 41
Figura 4.17 – Diferença absoluta da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 3. 41
Figura 4.18 – Diferença percentual da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 3. 42
Figura 4.19 – Resultados dinâmicos da temperatura de saída da corrente quente para o modelo $\Delta \boldsymbol{TML}$. 43

Figura 4.20 – Resultados dinâmicos da temperatura de saída da corrente quente para o modelo $\Delta \boldsymbol{Tcte}$. 44
Figura 4.21 – Gráfico do tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor. 46
Figura 4.22 – Gráfico da razão do tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor. 46
Figura 4.23 – Vazão volumétrica das correntes quente e fria para o tempo total de simulação. 49
Figura 4.24 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria para o tempo total de simulação. 49
Figura 4.25 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 0 e 1560 segundos. 50
Figura 4.26 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 1560 e 3120 segundos. 50
Figura 4.27 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 3120 e 4560 segundos. 51
Figura 4.28 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 4560 e 6060 segundos. 51
Figura 4.29 – Temperaturas de entrada das correntes quente e fria com erros regulares. 52
Figura 4.30 – Temperaturas de entrada das correntes quente e fria com erros acentuados. ... 53
Figura 4.31 – Temperaturas de saída das correntes quente e fria com erros regulares. 53
Figura 4.32 – Temperaturas de saída das correntes quente e fria com erros acentuados. 54
Figura 4.33 – Vazão volumétrica das correntes quente e fria com erros regulares. 54
Figura 4.34 – Vazão volumétrica das correntes quente e fria com erros acentuados..... 55
Figura 4.35 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação degrau na temperatura. 57
Figura 4.36 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação rampa na temperatura. 58
Figura 4.37 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para estado estacionário na temperatura. 58
Figura 4.38 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação degrau na vazão. 59
Figura 4.39 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação rampa na vazão. 60
Figura 4.40 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para estado estacionário na vazão. 60
Figura 4.41 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação degrau na temperatura. 62
Figura 4.42 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação rampa na temperatura. 62
Figura 4.43 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para estado estacionário na temperatura. 63
Figura 4.44 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação degrau na vazão. 64
Figura 4.45 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação rampa na vazão. 64

Figura 4.46 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para estado estacionário na vazão. 65
Figura 4.47 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação degrau na temperatura. 66
Figura 4.48 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação rampa na temperatura. 67
Figura 4.49 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para estado estacionário na temperatura. 67
Figura 4.50 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação degrau na vazão. 68
Figura 4.51 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação rampa na vazão. 69
Figura 4.52 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para estado estacionário na vazão. 69
Figura 4.53 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação degrau na temperatura. 71
Figura 4.54 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação rampa na temperatura. 71
Figura 4.55 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para estado estacionário na temperatura. 72
Figura 4.56 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação degrau na vazão. 73
Figura 4.57 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação rampa na vazão. 73
Figura 4.58 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para estado estacionário na vazão. 74
Figura 4.59 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos). 76
Figura 4.60 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos). 76
Figura 4.61 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos). 77
Figura 4.62 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos). 78
Figura 4.63 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados corretos). 79
Figura 4.64 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados corretos) 79
Figura 4.65 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados corretos). 80
Figura 4.66 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados corretos) 81
Figura 4.67 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares). 82

Figura 4.68 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares). 82
Figura 4.69 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares). 83
Figura 4.70 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares). 83
Figura 4.71 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros regulares). 84
Figura 4.72 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros regulares). 84
Figura 4.73 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros regulares). 85
Figura 4.74 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros regulares). 85
Figura 4.75 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados). 86
Figura 4.76 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados). 87
Figura 4.77 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados). 87
Figura 4.78 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados). 88
Figura 4.79 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados). 88
Figura 4.80 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados). 89
Figura 4.81 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados). 89
Figura 4.82 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados). 90
Figura 4.83 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 91
Figura 4.84 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 92
Figura 4.85 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 92
Figura 4.86 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 93
Figura 4.87 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 93
Figura 4.88 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 94
Figura 4.89 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 94

Figura 4.90 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares). 95
Figura 4.91 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados). 96
Figura 4.92 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados). 96
Figura 4.93 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados) 97
Figura 4.94 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados). 97
Figura 4.95 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados). 98
Figura 4.96 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados) 98
Figura 4.97 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados). 99
Figura 4.98 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados) 99
Figura 4.99 – Pontos transientes corretos para as temperaturas de entrada e saída. 100
Figura 4.100 – Pontos transientes corretos para as vazões volumétricas. 101
Figura 4.101 – Regiões corretas de operação em estado estacionário e estado transiente. ... 101
Figura 4.102 – Máximos valores da função objetivo na reconciliação de dados com valores corretos. 102
Figura 4.103 – Função objetivo da reconciliação de dados com valores corretos. 103
Figura 4.104 – Método 1: Função Objetivo para resultados sem erros aleatórios..... 104
Figura 4.105 – Método 1: Erros de Detecção para resultados sem erros aleatórios..... 105
Figura 4.106 – Método 1: Função Objetivo para resultados com erros aleatórios regulares. . 106
Figura 4.107 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios regulares. 106
Figura 4.108 – Método 1: Função Objetivo para resultados com erros aleatórios acentuados. 108
Figura 4.109 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios acentuados. 108
Figura 4.110 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 1)..... 110
Figura 4.111 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 1)..... 110
Figura 4.112 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 2)..... 112
Figura 4.113 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 2)..... 112
Figura 4.114 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 3)..... 114
Figura 4.115 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 3)..... 114
Figura 4.116 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 4)..... 116
Figura 4.117 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 4)..... 116
Figura 4.118 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 5)..... 118
Figura 4.119 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 5)..... 118
Figura 4.120 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 6)..... 120
Figura 4.121 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 6)..... 120

Figura 4.122 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 7)..... 122
Figura 4.123 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 7)..... 122
Figura 4.124 – Comparação dos percentuais de detecção com Método 1. 125
Figura 4.125 – Comparação dos erros tipo I e tipo II com Método 1. 126
Figura 4.126 – Comparação da função objetivo com Método 1. 126
Figura 4.127 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados sem erros aleatórios. 128
Figura 4.128 – Método 2: Desvios da vazão para resultados sem erros aleatórios. 128
Figura 4.129 – Método 2: Erros de Detecção para resultados sem erros aleatórios..... 129
Figura 4.130 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com erros aleatórios regulares..... 130
Figura 4.131 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com erros aleatórios regulares. 131
Figura 4.132 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios regulares. 131
Figura 4.133 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com erros aleatórios acentuados. 133
Figura 4.134 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com erros aleatórios acentuados. 133
Figura 4.135 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios acentuados. 134
Figura 4.136 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 1). 135
Figura 4.137 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 1)..... 135
Figura 4.138 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 1)..... 136
Figura 4.139 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 2). 137
Figura 4.140 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 2)..... 138
Figura 4.141 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 2)..... 138
Figura 4.142 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 3). 140
Figura 4.143 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 3)..... 140
Figura 4.144 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 3)..... 141
Figura 4.145 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 4). 142
Figura 4.146 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 4)..... 142
Figura 4.147 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 4)..... 143
Figura 4.148 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 5). 144
Figura 4.149 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 5)..... 145
Figura 4.150 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 5)..... 145
Figura 4.151 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 6). 147
Figura 4.152 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 6)..... 147
Figura 4.153 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 6)..... 148
Figura 4.154 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 7). 149

Figura 4.155 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 7)..... 149
Figura 4.156 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 7)..... 150
Figura 4.157 – Comparação dos percentuais de detecção com Método 2. 153
Figura 4.158 – Comparação dos erros tipo I e tipo II com Método 2. 153
Figura 4.159 – Comparação da função objetivo com Método 2. 154
Figura 4.160 – Método CAO: Detecção de pontos estacionários na vazão. 155
Figura 4.161 – Método CAO: Detecção de pontos transientes na vazão..... 155
Figura 4.162 – Método CAO: Detecção de pontos estacionários na temperatura. 156
Figura 4.163 – Método CAO: Detecção de pontos transientes na temperatura. 156
Figura 4.164 – Método CAO: Erros de detecção. 157
Figura 4.165 – Comparação dos percentuais de detecção com Método 1, Método 2 e Método CAO. 158
Figura 4.166 – Comparação dos erros tipo I e tipo II com Método 1, Método 2 e Método CAO. 159
Figura 4.167 – Comparação da função objetivo com Método 1, Método 2 e Método CAO. ... 159
Figura 4.168 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 1 com Dados Corretos (Sem Erros Aleatórios). 160
Figura 4.169 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 2 com Dados Corretos (Sem Erros Aleatórios). 161
Figura 4.170 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 1 com Janela Móvel aplicada a dados com erros aleatórios. 161
Figura 4.171 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 2 com Janela Móvel aplicada a dados com erros aleatórios. 162
Figura 4.172 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método CAO aplicado a dados com erros aleatórios. 162

Lista de Tabelas:

Tabela 3.1 – Cálculo da diferença de temperatura média logarítmica. 12
Tabela 3.2 – Dados do modelo de trocador de calor. 13
Tabela 3.3 – Perturbações nas variáveis de entrada. 14
Tabela 3.4 – Desvios padrão para geração de erros aleatórios “regulares”. 15
Tabela 3.5 – Desvios padrão para geração de erros aleatórios “acentuados”. 15
Tabela 3.6 – Janelas móveis de dados avaliadas. 16
Tabela 3.7 – Parâmetros para avaliação das metodologias de detecção de estados estacionários. 22
Tabela 4.1 – Cenários considerados na avaliação dos modelos dinâmicos em estado estacionário. 24
Tabela 4.2 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 1.25
Tabela 4.3 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo $\Delta\boldsymbol{TML}$. 25
Tabela 4.4 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo $\Delta\boldsymbol{Tcte}$. 26
Tabela 4.5 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta\boldsymbol{TML}$. 28
Tabela 4.6 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta\boldsymbol{Tcte}$. 29
Tabela 4.7 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 2.31
Tabela 4.8 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo $\Delta\boldsymbol{TML}$. 31
Tabela 4.9 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo $\Delta\boldsymbol{Tcte}$. 32
Tabela 4.10 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta\boldsymbol{TML}$ 34
Tabela 4.11 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta\boldsymbol{Tcte}$ 34
Tabela 4.12 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 3. 37
Tabela 4.13 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo $\Delta\boldsymbol{TML}$. 37
Tabela 4.14 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo $\Delta\boldsymbol{Tcte}$. 37
Tabela 4.15 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta\boldsymbol{TML}$ 40
Tabela 4.16 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta\boldsymbol{Tcte}$ 40
Tabela 4.17 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor na avaliação de resposta dinâmica. 43
Tabela 4.18 – Resultados da avaliação de tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor. 45
Tabela 4.19 – Resultados da avaliação de tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor. 48
Tabela 4.20 – Casos para avaliação da frequência de amostragem das janelas móveis. 56
Tabela 4.21 – Casos para avaliação do comprimento das janelas móveis. 61
Tabela 4.22 – Casos para avaliação do tipo de média das janelas móveis. 65
Tabela 4.23 – Casos para avaliação do nível de erro das janelas móveis. 70

Tabela 4.24 – Comparação dos resultados de detecção com Método 1. 125
Tabela 4.25 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados sem erros aleatórios. 129
Tabela 4.26 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com erros aleatórios regulares. 130
Tabela 4.27 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com erros aleatórios acentuados. 132
Tabela 4.28 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 1). 136
Tabela 4.29 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 2). 137
Tabela 4.30 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 3). 139
Tabela 4.31 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 4). 143
Tabela 4.32 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 5). 144
Tabela 4.33 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 6). 146
Tabela 4.34 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 7). 150
Tabela 4.35 – Comparação dos resultados de detecção com Método 2. 152
Tabela 4.36 – Parâmetros otimizados para metodologia CAO. 154

Lista de Abreviaturas:

HX	*Heat Exchanger* (Trocador de Calor)
GT	*Global Test* (Teste Global)
MT	*Measurement test* (Teste de Medida)
NT	*Nodal Test* (Teste nodal)
GLR	*Generalized Likelihood Ratio* (Razão de Verossimilhança Generalizada)
PCT	*Principal Component Test* (Teste do componente Principal)
FO	Função Objetivo
SS	*Steady State* (Estado Estacioário)
NSS	*Non-Steady State* (Estado não-estacionário)

Lista de Símbolos:

Símbolos latinos

$m_{Q,Célula}$	Massa de fluido quente dentro da célula
$m_{F,Célula}$	Massa de fluido frio dentro da célula
$C_{P,Q}$	Calor específico da corrente quente
$C_{P,F}$	Calor específico da corrente fria
$T_Q^{Saída}$	Temperatura de saída da corrente quente
$T_F^{Saída}$	Temperatura de saída da corrente fria
t	Tempo
$\dot{m}_Q$	Vazão mássica da corrente quente
$\dot{m}_F$	Vazão mássica da corrente fria
$T_Q^{Entrada}$	Temperatura de entrada da corrente quente
$T_F^{Entrada}$	Temperatura de entrada da corrente fria
U	Coeficiente global de troca térmica
$A_{Célula}$	Área de troca térmica da célula
ΔT_{FM}	Diferença de temperatura força motriz da troca térmica
$V_{Q,Célula}$	Volume de fluido quente dentro da célula
$V_{F,Célula}$	Volume de fluido frio dentro da célula
$\dot{V}_Q$	Vazão volumétrica da corrente quente
$\dot{V}_F$	Vazão volumétrica da corrente fria
ΔT_{ML}	Diferença de temperatura média logarítmica
R	Razão das variâncias de ruído estimadas da metodologia “CAO”
s_1^2 e s_2^2	Variâncias de ruído estimadas da metodologia “CAO”
$R_{crítico}$	Parâmetro ajustável para determinação do limite entre pontos estacionários e transientes da metodologia “CAO”
X_{f_i}	Valor da estimativa da média da variável no tempo atual da metodologia “CAO”
$X_{f_{i-1}}$	Valor da estimativa da média da variável no tempo passado da metodologia “CAO”
X_i	Valor medido da variável no tempo atual da metodologia “CAO”
X_{i-1}	Valor medido da variável no tempo passado da metodologia “CAO”
Q	Calor trocado

Símbolos gregos

ρ_Q	Massa específica da corrente quente
ρ_F	Massa específica da corrente fria
σ_i^2	Variância de cada variável medida
λ_1, λ_2 e λ_3	Parâmetros de ponderação dos filtros auto-regressivos de média móvel exponencialmente ponderada da metodologia "CAO"
$v_{f,i}^2$	Filtro para cálculo da estimativa do desvio médio quadrático entre valor atual medido da variável (X_i) e valor da estimativa da média da variável ($X_{f_{i-1}}$) da metodologia "CAO"
$\delta_{f,i}^2$	Filtro para cálculo da estimativa do desvio médio quadrático entre valor atual medido da variável (X_i) e valor anteriormente medido da variável (X_{i-1}) da metodologia "CAO"

Índices

N	Número de variáveis medidas

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Objetivos

O acúmulo de depósitos indesejados nas superfícies de troca térmica de um trocador de calor é geralmente chamado de *fouling*. As sérias consequências financeiras e de desempenho fizeram com que o *fouling* se tornasse uma importante área de estudo (MOHANTY et al., 2014).

Em plantas reais, o *fouling* é um problema crônico, que requer: a instalação de equipamentos de troca térmica super dimensionados, queima de mais combustível para compensar trocas térmicas reduzidas, redução da produção devido à manutenção e limpeza periódica de equipamentos e custos adicionais com intervenções de limpeza (MARKOWSKI et al., 2013).

Com o objetivo de avaliar o desempenho de trocadores de calor, por meio do monitoramento do coeficiente global de troca térmica em estado estacionário, foi utilizado no presente estudo um modelo dinâmico de trocador de calor, de forma a reproduzir os resultados obtidos em plantas de processo.

Como a avaliação do coeficiente global de troca térmica foi realizada com conjuntos de dados de processo em estado estacionário, foram propostas duas novas metodologias de detecção de estado estacionário aplicadas a trocadores de calor.

Observou-se que as metodologias de detecção de estado estacionário encontradas na literatura objetivam a avaliação da estacionariedade das variáveis de forma individual, por meio de testes estatísticos (CAUMO, 2006; LE ROUX et al., 2008; MEJIA et al., 2010). Dessa forma, para realizar avaliações em operações unitárias com metodologias válidas apenas com conjuntos de dados em estado estacionário, faz-se necessária a avaliação da estacionariedade de todas as variáveis utilizadas.

Neste estudo foram propostas duas metodologias de detecção de estado estacionário com base na avaliação da adequação dos dados de campo aos balanços de energia em estado estacionário (para o caso considerado de trocadores de calor), por meio da técnica de reconciliação de dados. Dessa forma, foram propostas novas metodologias que garantem que o estado estacionário do ponto de vista do balanço de energia seja satisfeito, o que é primordial na avaliação do desempenho de equipamentos quando são utilizadas equações válidas apenas em estado estacionário.

Apesar da grande quantidade de aplicações da reconciliação de dados (ROMAGNOLI et al., 2000), não foram encontrados estudos propondo a utilização da metodologia na detecção de estados estacionários, o que caracteriza a contribuição do presente estudo.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação apresenta os capítulos dispostos como segue.

O capítulo de Revisão Bibliográfica apresenta uma avaliação da modelagem dinâmica de trocadores de calor, avaliação da presença de erros em dados obtidos por meio de instrumentos em plantas de processo, metodologias de detecção de estado estacionário e finalidades do uso de técnicas de reconciliação de dados.

O capítulo de Metodologia apresenta em detalhes como foram desenvolvidos os estudos, incluindo a modelagem dinâmica do trocador de calor, a definição dos parâmetros do trocador, perturbações nas variáveis de entrada e geração de erros aleatórios adicionados às variáveis. Ainda, são definidas as janelas móveis consideradas para redução dos erros aleatórios. Na sequência é apresentada a metodologia utilizada para reconciliação de dados, bem como as duas metodologias propostas de detecção de estados estacionários. A metodologia de detecção de estados estacionários aceita na literatura, utilizada como base de comparação para as metodologias propostas, é também apresentada. Finalmente, são definidas as metodologias de avaliação do desempenho de detecção de estados estacionários e definido como é realizado o cálculo do coeficiente global de troca térmica do trocador de calor nos estados estacionários identificados.

O capítulo de Resultados e Discussões apresenta uma avaliação completa dos resultados obtidos com o modelo dinâmico de trocador de calor, definição do número de células do modelo e consideração de força motriz da tranferência de calor que apresentou melhores resultados. Os resultados dinâmicos, sem erros e com erros aleatórios também são apresentados. A aplicação de diferentes janelas móveis é detalhadamente avaliada quanto aos resultados obtidos na redução dos erros aleatórios. Foi realizada também a reconciliação de dados e detecção de estados estacionários com as duas metodologias propostas, considerando dados de planta sem erros, com erros aleatórios em dois níveis distintos de variância e com a aplicação de sete diferentes casos de janelas móveis. Os resultados obtidos na detecção de estados estacionários

foram comparados com uma metodologia aceita pela literatura. Por fim foi calculado o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor para todos os instantes detectados como estacionários e foram avaliados os resultados para definir qual metodologia resultou em melhores estimativas.

O capítulo de Conclusões e Sugestões apresenta as conclusões finais da dissertação, bem como sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Apresentação

Este capítulo apresenta inicialmente, na Seção 2.2, uma breve avaliação da importância do monitoramento do coeficiente de troca térmica de trocadores de calor para a indústria. Na sequência é apontada a importância do modelo dinâmico de trocador de calor na geração de dados de planta para o presente estudo, bem como o modelo dinâmico que foi selecionado com base na literatura.

São apresentadas, na Seção 2.3, informações relevantes sobre a presença de erros em valores medidos em campo, incluindo erros aleatórios e erros grosseiros, assim como informações sobre a utilização de filtros na redução de erros aleatórios. Na Seção 2.4 é apresentada uma avaliação da importância da detecção de estados estacionários. Também são apresentadas referências que discutem o tema e as metodologias existentes de detecção automática de estados estacionários.

Por fim, a Seção 2.5 apresenta uma avaliação da aplicação da reconciliação de dados, com enfoque nas aplicações recentes da metodologia na indústria brasileira. É apresentada também a proposta dessa dissertação, que objetiva utilizar a metodologia de reconciliação de dados na detecção de estados estacionários.

2.2 Modelagem Dinâmica de Trocadores de Calor

O acúmulo de depósitos indesejados nas superfícies de troca térmica de um trocador de calor é geralmente chamado de *fouling*. O *fouling* é um grande problema em trocadores de calor, ainda sem solução, desde sua invenção. As sérias consequências financeiras e de desempenho fizeram com que o *fouling* se tornasse uma importante área de estudo (MOHANTY et al., 2014).

De forma a minimizar o consumo de energia em uma planta de processo equipada com trocadores de calor, o operador precisa saber como evitar a redução da recuperação de calor durante o período de operação da planta. Em plantas reais, o *fouling* é um problema crônico, que requer: a instalação de equipamentos de troca térmica super dimensionados, queima de mais combustível para compensar trocas térmicas reduzidas, redução da produção devido à manutenção e limpeza periódica de

equipamentos e custos adicionais com intervenções de limpeza (MARKOWSKI et al., 2013). Dessa forma, diversos são os estudos que objetivam o monitoramento do desempenho de troca térmica de trocadores de calor (ASTORGA-ZARAGOZA, et al. 2007; ASTORGA-ZARAGOZA, et al. 2008; PALMER, et al., 2016; MOHANTY et al., 2014; MARKOWSKI et al., 2013).

Com o objetivo de avaliar o desempenho de trocadores de calor, por meio do monitoramento do coeficiente global de troca térmica, foi utilizado no presente estudo um modelo dinâmico de trocador de calor, de forma a reproduzir os resultados obtidos em plantas de processo.

Trocadores de calor frequentemente operam em condições variadas. Seu uso apropriado em redes de trocadores de calor, assim como cálculos relacionados à manutenção e confiabilidade, requerem modelos adequados para estimar seus comportamentos dinâmicos. Modelos dinâmicos baseados em células são frequentemente utilizados para representar trocadores de calor com diversos arranjos (VERBANOV et al., 2010).

Modelos de células podem resultar em um grande número de equações, porém as equações são muito simples e a abordagem oferece flexibilidade de modelagem para acomodar qualquer tipo de trocador de calor por superfície de troca, com qualquer arranjo de correntes. A complexidade do modelo pode ser controlada pelo número de células, possibilitando um equilíbrio entre acurácia e a habilidade de modelar sistemas grandes e complexos, como redes de trocadores de calor (VERBANOV et al., 2010). Dada essas características, o modelo de células é bastante utilizado na modelagem dinâmica de trocadores de calor (MATHISEN et al., 1994; VERBANOV et al., 2010; VARGA et al., 1995; MARKOWSKI et al., 2013; WEYER et al., 2000; SALAU, 2004).

Uma avaliação sobre as diferentes considerações possíveis sobre a força motriz de troca térmica utilizada nos modelos de células pode ser encontrado em SALAU (2004). O presente estudo avaliou e comparou a utilização da força motriz dada pela diferença linear de temperatura e da força motriz dada pela diferença de temperatura média logarítmica.

2.3 Erros em Dados Temporais

Na avaliação de dados de processos industriais, com base em medições de instrumentos instalados em campo, é comum assumir que os valores medidos apresentam erros. Os erros podem ser classificados entre aleatórios ou grosseiros/sistemáticos, sendo que a diferença entre o valor medido e o valor real pode ser representado de forma geral por:

$$Valor\ Medido = Valor\ Real + Erro\ Aleatório + Erro\ Grosseiro \quad (2.1)$$

Erros aleatórios não podem ser completamente eliminados e estão sempre presentes nas medidas. Como o próprio nome indica, nem a magnitude nem o sinal podem ser preditos, de forma que, se a medição é repetida com o mesmo instrumento sob condições idênticas de processo, um valor diferente pode ser obtido dependendo do efeito do erro aleatório. Erros grosseiros, por outro lado, estão associados a eventos não aleatórios, significando que, se a medição é repetida com o mesmo instrumento sob condições idênticas de processo, a contribuição do erro grosseiro para o valor medido será a mesma. Erros grosseiros estão relacionados, portanto, ao mau funcionamento de instrumentos (devido à instalação imprópria dos instrumentos de medida), falta de calibração, corrosão nos sensores e depósitos de sólidos. Mantendo bons procedimentos de instalação e manutenção, é possível assegurar que erros grosseiros não estejam presentes nas medidas, pelo menos por algum tempo (CAUMO, 2006).

Nos instrumentos de medição é razoável assumir que: (i) os erros são positivos e negativos, com uma distribuição aleatória em torno de um valor zero de forma simétrica; (ii) quanto maior o valor absoluto do erro, menor a probabilidade de sua ocorrência. Essas condições são satisfeitas pela distribuição normal, logo é coerente a utilização desse modelo de distribuição para analisar os dados obtidos por sensores em plantas industriais (MARCELLOS, 2013)

Os erros aleatórios considerados no presente estudo foram gerados seguindo uma distribuição normal. Para a redução do erro aleatório presente nos dados obtidos dos instrumentos de campo, antecedendo à utilização dos mesmos dados por outras metodologias, como por exemplo na detecção de estados estacionários e reconciliação de dados, podem ser utilizados filtros. Alguns tipos de filtros usualmente empregados são filtros exponenciais, de média móvel e polinomiais (CAUMO, 2006). No presente

estudo foram utilizados filtros de média móvel, pela aplicação de janelas móveis de dados no tempo.

2.4 Detecção de Estados Estacionários

Técnicas em tempo real baseadas em modelos, como reconciliação de dados, detecção de erros grosseiros ou otimização em tempo real, ganharam significativa importância ao longo dos últimos anos, de modo que a identificação de tendências nas medidas de processo para aplicações como em detecção de estados estacionários tem sido uma tarefa importante. Estes modelos são geralmente estacionários, o que justifica a importância de conhecer quais são, de fato, os dados de processo estacionários (CAUMO, 2006).

A estacionariedade é uma das mais importantes e comuns suposições feitas a cerca de um processo. Dependendo desta suposição, pode-se seguir um tratamento completamente diferente do processo estudado (NARASIMHAN et al., 1986). Normalmente, a avaliação da estacionariedade pode ser realizada por inspeção visual. Entretanto, existem testes estatísticos para numericamente indicar esta característica (MARCELLOS, 2013). Pode-se verificar na literatura a existência de uma grande quantidade de estudos e propostas de metodologias de detecção de estado estacionário (NARASIMHAN et al., 1986; CAO et al., 1995; JIANG et atl., 2003; CAUMO, 2006; LE ROUX et al., 2008; MEJIA et al, 2010; MARCELLOS, 2013; KELLY et al., 2013; KORBEL et al, 2014).

Alguns dos trabalhos citados apresentam avaliações dos métodos mais utilizados para detecção de estados estacionários. Destacam-se as revisões desenvolvidas por CAUMO (2006), LE ROUX et al. (2008) e MEJIA et al. (2010).

De acordo com MEJIA et al. (2010), um dos métodos de identificação de estados estacionários mais utilizados é o proposto por CAO et al. (1995). Este método foi utilizado no presente artigo como referência para comparação dos resultados obtidos pelos métodos de detecção de estado estacionário propostos. A descrição e o equacionamento do método proposto por CAO et al. (1995) são apresentados na Seção 3.4.4.

É importante destacar que a detecção da estacionariedade de variáveis para a engenharia química está relacionada ao interesse em detectar a estacionariedade de processos ou operações unitárias, implicando em conclusões referentes aos balanços de

massa, energia e quantidade de movimento, como descrito por KELLY et al. (2013): "o termo *estado estacionário* implica que o processo está operando próximo a algum estado estável ou dentro de uma região estacionária, no qual pode ser assumido que o acúmulo ou variação da massa, energia e quantidade de movimento são estatisticamente insignificantes ou negligenciáveis".

Observou-se que as metodologias de detecção de estado estacionário encontradas na literatura objetivam a avaliação da estacionariedade das variáveis de forma individual e, subsequentemente, assumem que os processos e operações unitárias estão operando em estado estacionário por conta da estacionariedade das variáveis de entrada e saída.

Neste estudo foram propostas duas metodologias de detecção de estado estacionário com base na avaliação da adequação dos dados de campo aos balanços de energia em estado estacionário (para o caso considerado de trocadores de calor), por meio de reconciliação de dados. Dessa forma propuseram-se novas metodologias simples, que garantam que o estado estacionário do ponto de vista de balanços de energia, massa e quantidade de movimento seja satisfeito, o que é primordial na avaliação do desempenho de equipamentos quando são utilizadas equações válidas apenas em estado estacionário. O desempenho dos trocadores de calor foi avaliado aqui por meio do cálculo do coeficiente global de troca térmica.

2.5 Reconciliação de Dados

A reconciliação de dados consiste em um tratamento matemático que objetiva melhorar a qualidade dos dados representantes de um processo experimental ou industrial qualquer, fazendo-os obedecer um modelo pré-concebido do processo. Os primeiros trabalhos datam da década de 1960 e sua importância como ferramenta auxiliar de trabalho do engenheiro é indiscutível para o monitoramento de um processo industrial, para o levantamento de dados experimentais em laboratório ou na planta e para a identificação de parâmetros de um modelo (OLIVEIRA JUNIOR, 2006).

A técnica de reconciliação de dados é comumente utilizada em conjunto com metodologias de detecção de erros grosseiros. Como descrito por MIAO et al. (2011), os métodos mais utilizados para reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros são o teste global (*global test – GT*), o teste de medida (*measurement test – MT*), o teste

nodal (*nodal test – NT*), a razão de verossimilhança generalizada (*generalized likelihood ratio – GLR*) e o teste do componente principal (*principal component test – PCT*).

Por se tratar de uma metodologia já bastante fundamentada, é possível encontrar na literatura uma extensa avaliação da mesma, com aplicações indo além do fechamento dos balanços de massa e energia. O estudo de OLIVEIRA JUNIOR (2006) utiliza a reconciliação de dados na estimação de parâmetros em modelos de processo. JIANG et al. (2014) utilizaram a reconciliação de dados para o monitoramento em tempo real do desempenho de uma turbina a vapor. AMAND et al. (2011) aplicaram a técnica de reconciliação de dados no monitoramento e detecção de falhas em uma planta de síntese de amônia com dados modelados. MIAO et al. (2011) utilizaram reconciliação de dados para detecção de vazamentos e *bias* em uma rede de trocadores de calor. FARIAS (2009) realizou uma avaliação de diferentes técnicas de reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros. OZYURT et al. (2004) também apresentaram metodologias de reconciliação de dados com detecção de erros grosseiros. PRATA et al. (2009) estudaram a reconciliação de dados dinâmica e não linear em conjunto com a estimativa de parâmetros baseada em otimização por enxame de partículas.

No Brasil, a reconciliação de dados já é estudada há mais de 30 anos. CASTIER et al. (1988) utilizaram a reconciliação de dados para o fechamento dos balanços de massa e energia de um destilaria, no Brasil, para produção de álcool a partir da cana-de-açúcar. TEIXEIRA (1997) estudou a reconciliação de dados com detecção de erros grosseiros para sistemas com restrições não lineares.

Um estudo foi realizado por LIPORACE et al. (2007) com o objetivo de avaliar, em tempo real, a presença de *fouling* e o desempenho de trocadores de calor, utilizando também a reconciliação de dados. Os dados de planta utilizados na etapa de reconciliação foram obtidos por médias dos valores em uma janela de 1 hora de operação, quando o processo encontrava-se em "condições aproximadamente estacionárias". Não foi informada a metodologia utilizada para determinar se o processo encontrava-se em condições estacionárias, o que leva a crer que a avaliaçãou foi realizada por inspeção visual.

Apesar da grande quantidade de aplicações da reconciliação de dados, não foram encontrados estudos propondo a utilização da metodologia na detecção de estados estacionários. O presente estudo propõe e avalia duas metodologias de reconciliação de dados aplicadas a detecção de estados estacionários em trocadores de calor, com objetivo final de monitoramento do coeficiente global de troca térmica dos mesmos.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelos Dinâmicos de Trocador de Calor

3.1.1 Modelo de Células

Para a simulação dinâmica do trocador de calor foi selecionada a abordagem de um modelo de células, baseado no descrito por VERBANOV et al. (2010). O modelo consiste na divisão do trocador de calor em células, que por sua vez são definidas como dois tanques perfeitamente agitados trocando calor através de uma parede em comum.

As hipóteses consideradas no desenvolvimento do modelo matemático são: (a) a área de troca térmica total do trocador de calor é igualmente dividida entre todas as células; (b) as propriedades dos fluidos (massa específica e calor específico) são iguais para todas as células, sendo calculadas na temperatura média dos valores de entrada e saída da corrente do trocador; (c) os tanques perfeitamente agitados estão totalmente cheios e não apresentam acúmulo, isso é, a massa de fluido que entra é igual à massa de fluido que sai do tanque; (d) não existe perda de calor para o meio; (e) não existe troca de calor na direção da corrente (axial) tanto no fluido quanto na parede; (f) o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor é constante e igual para todas as células; (g) a massa da parede é considerada desprezível e, por sua vez, a capacitância térmica da mesma é desconsiderada. Um diagrama representando um modelo de células de trocador de calor operando em contra-corrente é apresentado na Figura 3.1.

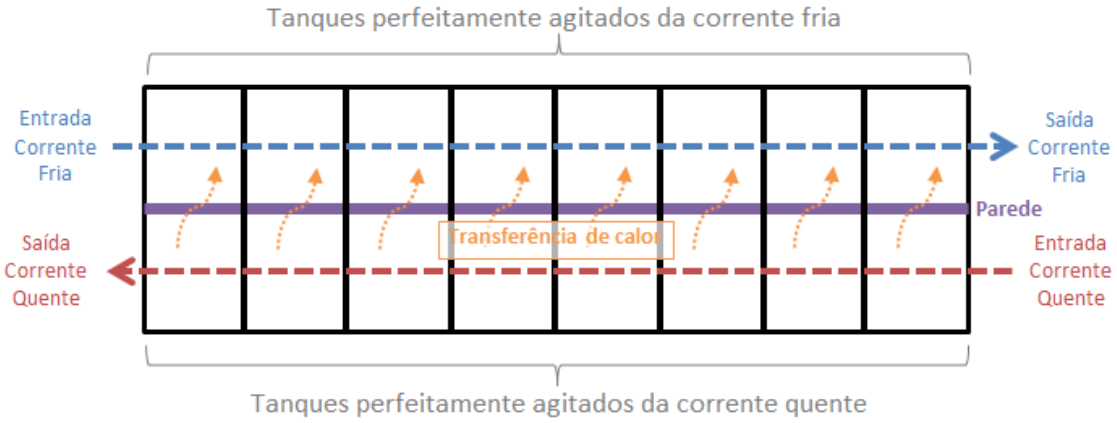

Figura 3.1 – Diagrama de modelo de células de trocador de calor.

Para cada célula, as seguintes equações foram consideradas:

$$m_{Q,Célula}.C_{P,Q}.\frac{dT_Q^{Saída}}{dt} = \dot{m}_Q.C_{P,Q}\,(T_Q^{Entrada} - T_Q^{Saída}) - U.A_{Célula}.\Delta T_{FM} \quad (3.1)$$

$$m_{F,Célula}.C_{P,F}.\frac{dT_F^{Saída}}{dt} = \dot{m}_F.C_{P,F}\,(T_F^{Entrada} - T_F^{Saída}) + U.A_{Célula}.\Delta T_{FM} \quad (3.2)$$

em que

$m_{Q,Célula}$ / $m_{F,Célula}$	Massa de fluido quente/frio dentro da célula, [kg]
$C_{P,Q}$ / $C_{P,F}$	Calor específico da corrente quente/fria, [J/kg.°C]
$T_Q^{Saída}$ / $T_F^{Saída}$	Temperatura de saída da corrente quente/fria na célula, [°C]
t	Tempo, [s]
$\dot{m}_Q$ / $\dot{m}_F$	Vazão mássica da corrente quente/fria, [kg/s]
$T_Q^{Entrada}$ / $T_F^{Entrada}$	Temperatura de entrada da corrente quente/fria na célula, [°C]
U	Coeficiente global de troca térmica, [W/m².°C]
$A_{Célula}$	Área de troca térmica da célula, [m²]
ΔT_{FM}	Diferença de temperatura força motriz da troca térmica, [°C]

Sendo mais conveniente referir-se ao volume das células e à vazão volumétrica, as Equações (3.1) e (3.2) foram reescritas da seguinte forma:

$$V_{Q,Célula}.\rho_Q.C_{P,Q}.\frac{dT_Q^{Saída}}{dt} = \dot{V}_Q.\rho_Q.C_{P,Q}\,(T_Q^{Entrada} - T_Q^{Saída}) - U.A_{Célula}.\Delta T_{FM} \quad (3.3)$$

$$V_{F,Célula}.\rho_F.C_{P,F}.\frac{dT_F^{Saída}}{dt} = \dot{V}_F.\rho_F.C_{P,F}\,(T_F^{Entrada} - T_F^{Saída}) + U.A_{Célula}.\Delta T_{FM} \quad (3.4)$$

em que

$V_{Q,Célula}$ / $V_{F,Célula}$	Volume de fluido quente/frio dentro da célula, [m³]
$\dot{V}_Q$ / $\dot{V}_F$	Vazão volumétrica da corrente quente/fria, [m³/s]

Reorganizando as Equações (3.3) e (3.4), temos:

$$\frac{dT_Q^{Saída}}{dt} = \frac{\dot{V}_Q}{V_{Q,Célula}}\left(T_Q^{Entrada} - T_Q^{Saída}\right) - \frac{U.A_{Célula}}{V_{Q,Célula}.\rho_Q.C_{P,Q}}\Delta T_{FM} \quad (3.5)$$

$$\frac{dT_F^{Saída}}{dt} = \frac{\dot{V}_F}{V_{F,Célula}}\left(T_F^{Entrada} - T_F^{Saída}\right) + \frac{U.A_{Célula}}{V_{F,Célula}.\rho_F.C_{P,F}}\Delta T_{FM} \quad (3.6)$$

3.1.2 Cálculo da Diferença de Temperatura na Célula

Para o cálculo da diferença de temperatura, ΔT_{FM}, força motriz da troca térmica entre as correntes quente e fria dentro de uma mesma célula do modelo, foram consideradas as seguintes possibilidades:

- Diferença de temperatura constante dentro de uma mesma célula, $\Delta T_{FM} = \Delta T_{cte} = T_Q^{Saída} - T_F^{Saída}$, considerando que a temperatura das correntes quente e fria dentro de uma dada célula é igual à temperatura de saída das correntes quente e fria dessa mesma célula, respectivamente. Essa possibilidade representa o modelo usualmente referenciado na literatura, sendo que apresenta baixa exigência de poder computacional.
- Diferença de temperatura média logarítmica, $\Delta T_{FM} = \Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$, sendo que para a consideração de trocador de calor em contra-corrente tem-se que $\Delta T_1 = T_Q^{Entrada} - T_F^{Saída}$; $\Delta T_2 = T_Q^{Saída} - T_F^{Entrada}$.
  Essa possibilidade representa a solução analítica para um trocador de calor em estado estacionário com as propriedades físicas constantes, exigindo um maior poder computacional. Ainda, para evitar erros numéricos durante a execução do modelo, a diferença de temperatura média logarítmica foi calculada como descrito na Tabela 3.1 (SALAU, 2004).

Tabela 3.1 – Cálculo da diferença de temperatura média logarítmica.

Condição	Cálculo
SE $\Delta T_1 . \Delta T_2 \leq 0$	**ENTÃO** $\Delta T_{ML} = (\Delta T_1 + \Delta T_2)/2$
SENÃO, SE $\lvert\Delta T_1 - \Delta T_2\rvert > 0{,}05\ \lvert\Delta T_1\rvert$ ou $\lvert\Delta T_1 - \Delta T_2\rvert > 0{,}05\ \lvert\Delta T_2\rvert$	**ENTÃO** $\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$
SENÃO	**ENTÃO** $\Delta T_{ML} = 0{,}5\ .\ (\Delta T_1 + \Delta T_2)\ .\ (1 - (\Delta T_1 - \Delta T_2)^2/(\Delta T_1 . \Delta T_2)\ .\ (1 + (\Delta T_1 - \Delta T_2)^2/(\Delta T_1 . \Delta T_2)/2)/12)$

3.1.3 Parâmetros e Modelos Avaliados

Foram comparados os resultados obtidos pelos modelos dinâmicos de trocador de calor, variando o número de células de 3 a 500. Também foram comparados os resultados dos modelos com diferença de temperatura força motriz constante e média logarítmica. Determinou-se como requisito que os modelos dinâmicos apresentassem resultados que satisfizessem o balanço de energia quando em estado estacionário. Compararam-se ainda os tempos computacionais de simulação dos modelos, variando o número de células. Foi utilizado o *software* MATLAB (versão R2016a) em um computador pessoal com processador Intel(R) Core(TM) i5-6200U @ 2.3GHz 2.4GHz.

3.2 Simulação Dinâmica do Trocador de Calor

3.2.1 Definição do Trocador de Calor

Foi utilizado como base o trocador de calor água destilada / água bruta, apresentado por KERN (1965). Os dados utilizados no modelo são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados do modelo de trocador de calor.

Dado	Valor
Configuração	Contra-corrente
Área de troca térmica	46,7 m²
Volume interno total dos tubos	0,1681 m³
Volume total do casco	0,3523 m³
Fluido Tubos	Corrente Fria (água)
Fluido Casco	Corrente Quente (água)
Coeficiente global de troca térmica	1470 W/m².°C

O valor da densidade de ambas as correntes (quente e fria) em função da temperatura foi calculado com a correlação obtida em PERRY et al. (2007), válida para água entre 273,16K e 647,096K:

$$\rho[kg/m^3] = 18{,}015\,.\left(17{,}863 + 58{,}606\,.\,\tau^{0{,}35} - 95{,}396\,.\,\tau^{\frac{2}{3}} + 213{,}89\,.\,\tau - 141{,}26\,.\,\tau^{\frac{4}{3}}\right) \qquad (3.7)$$

em que

$$\tau = 1 - \frac{T[K]}{647{,}096} \qquad (3.8)$$

O valor do calor específico de ambas as correntes (quente e fria) em função da temperatura foi calculado com a correlação também obtida de PERRY et al. (2007), válida para água entre 273,16K e 533,15K:

$$C_p\left[\frac{J}{kg.K}\right] = \frac{276370 - 2090{,}1\,.\,\mathrm{T[K]} + 8{,}125.\,\mathrm{T[K]}^2 - 0{,}014116\,.\,\mathrm{T[K]}^3 + (9{,}3701.10^{-6})\,.\,\mathrm{T[K]}^4}{18{,}015} \quad (3.9)$$

3.2.2 Perturbações nas Variáveis de Entrada

As variáveis de entrada no modelo dinâmico de trocador de calor estudado são quatro:

- Temperatura de Entrada da Corrente Quente
- Vazão da Corrente Quente
- Temperatura de Entrada da Corrente Fria
- Vazão da Corrente Fria

Foram consideradas perturbações do tipo degrau e tipo rampa em todas as quatro variáveis de entrada, de acordo com o exposto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Perturbações nas variáveis de entrada.

Variável	Tempo (s)	Perturbação	Valor
Temperatura de Entrada da Corrente Quente	300	Degrau	-40°C
	600	Degrau	+10°C
	900 a 960	Rampa	+40°C (+40°C/minuto)
	1260 a 1320	Rampa	-20°C (-20°C/minuto)
Temperatura de Entrada da Corrente Fria	1620	Degrau	+20°C
	1920	Degrau	-5°C
	2220 a 2400	Rampa	+5°C (+1,7°C/minuto)
	2700 a 2880	Rampa	-15°C (-5°C/minuto)
Vazão da Corrente Quente	3180	Degrau	+0,0123185 m³/s
	3480	Degrau	-0,00615925 m³/s
	3780 a 3960	Rampa	+0,00123185 m³/s (+0,024637 m³/s/h)
	4260 a 4320	Rampa	-0,0098548 m³/s (-0,591288 m³/s/h)
Vazão da Corrente Fria	4620	Degrau	+0,0106119 m³/s
	4920	Degrau	-0,0035373 m³/s
	5220 a 5280	Rampa	+0,00884325 m³/s (+0,530595 m³/s/h)
	5580 a 5760	Rampa	-0,00530595 m³/s (-0,106119 m³/s/h)

3.2.3 Geração de Erros Aleatórios

Com o objetivo de reproduzir o comportamento de dados medidos por instrumentos em campo, foram adicionados erros aleatórios, seguindo distribuição normal, às temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria, bem como à vazão volumétrica das duas correntes. Foram considerados dois casos, um com erros menores (menor variância e desvio padrão) e outro com erros maiores (maior variância e desvio padrão), que serão chamados de erros "regulares" e erros "acentuados", respectivamente. Os desvios padrão considerados para a geração dos dados com erros "regulares" são apresentados na Tabela 3.4, enquanto os desvios padrão considerados para a geração dos dados com erros "acentuados" são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Desvios padrão para geração de erros aleatórios "regulares".

Variável	Tipo do Desvio Padrão	Desvio Padrão
Temperatura de Entrada Corrente Quente	Absoluto	0,2°C
Temperatura de Entrada Corrente Fria		
Temperatura de Saída Corrente Quente		
Temperatura de Saída Corrente Fria		
Vazão Corrente Quente	Percentual do Valor sem Erro	2%
Vazão Corrente Fria		

Tabela 3.5 – Desvios padrão para geração de erros aleatórios "acentuados".

Variável	Tipo do Desvio Padrão	Desvio Padrão
Temperatura de Entrada Corrente Quente	Absoluto	0,5°C
Temperatura de Entrada Corrente Fria		
Temperatura de Saída Corrente Quente		
Temperatura de Saída Corrente Fria		
Vazão Corrente Quente	Percentual do Valor sem Erro	5%
Vazão Corrente Fria		

3.3 Aplicação de Janelas Móveis de Dados no Tempo

Foram aplicadas janelas móveis de dados no tempo, sobre os resultados com erros aleatórios, calculando a média e a variância das variáveis dentro das janelas.

Foram avaliados os impactos de quatro parâmetros nos resultados das janelas de tempo:

- Comprimento da janela (tempo considerado);

- Frequência de amostragem das variáveis;
- Considera apenas dados passados (ver Figura 3.2) ou também dados futuros (Figura 3.3);
- Nível de erro dos dados amostrados (regular ou acentuado).

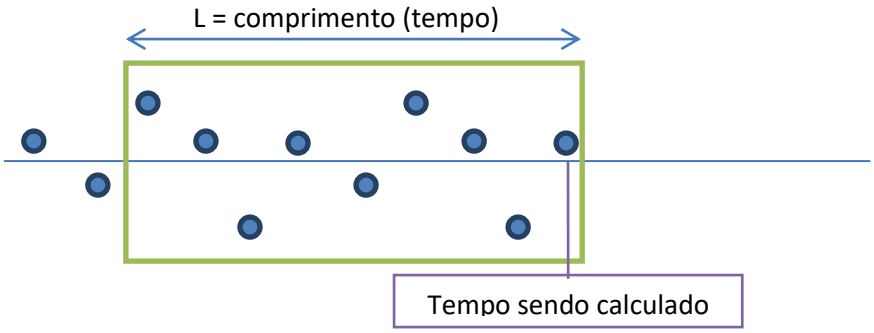

Figura 3.2 – Janela de tempo com dados passados.

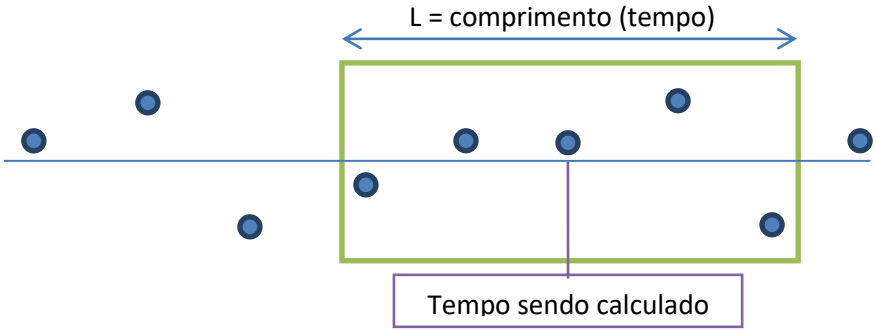

Figura 3.3 – Janela de tempo com dados passados e futuros (simétrica).

A avaliação dos quatro parâmetros citados acima foi realizada com os sete casos descritos na Tabela 3.6. Os resultados são apresentados na Seção 4.3.

Tabela 3.6 – Janelas móveis de dados avaliadas.

Caso	Frequência de Amostragem (s)	Comprimento da Janela (s)	Tipo de Média	Nível de Erro
1	**1**	30	Passado	Regular
2	5	30	Passado	Regular
3	**15**	30	Passado	Regular
4	5	**10**	Passado	Regular
5	5	**60**	Passado	Regular
6	5	30	**Simétrica**	Regular
7	5	30	Passado	**Acentuado**

3.4 Detecção de Estados Estacionários

A condição de estacionariedade para dados de processo considerada no presente estudo, e que se busca detectar, é a descrita por KELLY et al. (2013): "o termo *estado estacionário* implica que o processo está operando próximo a algum estado estável ou dentro de uma região estacionária, no qual pode ser assumido que o acúmulo ou variação da massa, energia e quantidade de movimento são estatisticamente insignificantes ou negligenciáveis".

Foram propostas duas metodologias de detecção de estados estacionários baseadas na metodologia de reconciliação de dados. Os resultados foram comparados com uma metodologia de referência da literatura, proposta por CAO et al. (1995), e com os resultados corretos esperados para os dados gerados.

3.4.1 Reconciliação de Dados

A reconciliação de dados é um problema de otimização, obedecendo às restrições de balanço de massa e/ou energia do sistema, minimizando o erro entre as variáveis medidas e os valores que satisfazem às restrições de balanço. Foi utilizado o algoritmo de pontos interiores existente no *software* MATLAB na solução do problema de minimização.

A restrição considerada na reconciliação de dados do trocador de calor foi o balanço de energia no estado estacionário das correntes quente e fria, desconsiderando mudanças de fase e perdas de calor para o meio externo.

$$\dot{m}_Q . C_{P,Q} . \left(T_Q^{Entrada} - T_Q^{Saída}\right) = \dot{m}_F . C_{P,F} . \left(T_F^{Saída} - T_F^{Entrada}\right) \tag{3.10}$$

A função objetivo utilizada na minimização, que mede o erro entre as variáveis medidas e os valores que satisfazem às restrições de balanço de energia, é do tipo Mínimos Quadrados Ponderados, em que os termos são poderados pela variância das medidas. Dessa forma, variáveis com menores erros aletórios (menores variâncias) recebem maior peso que variáveis com erros aleatórios maiores (maiores variâncias).

$$FO = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left(x_i - x_i^{medido}\right)^2}{\sigma_i^2}, \text{ em que N = número de variáveis medidas = 6} \tag{3.11}$$

Como a função objetivo requer o valor da variância de cada variável medida (temperatura de entrada corrente quente, temperatura de entrada corrente fria, temperatura de saída corrente quente, temperatura de saída corrente fria, vazão corrente quente e vazão corrente fria), bem como o valor da variável, optou-se por aplicar janelas de tempo móveis nas variáveis medidas, de forma a reduzir o erro aleatório e estimar o valor da variância com base em dados de campo, ou seja, a variância não é um parâmetro ajustável, mas sim calculado.

3.4.2 Método 1: Avaliação da Função Objetivo da Reconciliação de Dados

Este método baseia-se na avaliação do valor da função objetivo da reconciliação de dados em estado estacionário. A função objetivo apresenta valores elevados quando os dados medidos se distanciam do estado estacionário, o que possibilita a identificação de estados estacionários e transientes.

$$SE\ FO\ \leq FO^{Limite\ Estacionário} \rightarrow Trocador\ em\ Estado\ Estacionário$$

$$SE\ FO\ > FO^{Limite\ Estacionário} \rightarrow Trocador\ em\ Estado\ Transiente$$

O valor limite da função objetivo, que determina se os pontos encontram-se em estado estacionário ou transiente, foi otimizado de modo a maximizar as detecções corretas tanto de estados estacionários quanto de estados transientes. A função objetivo maximizada com o propósito de otimizar a detecção correta de estados estacionários e transientes é apresentada na Equação (3.12). Pode-se observar que o valor máximo da função objetivo é igual a 2, quando todos os pontos estacionários e transientes são corretamente identificados.

$$FO^{otimização} = \left(\begin{matrix} Pontos\ Estacionários \\ \frac{Corretamente\ Identificados}{Total\ de\ Pontos} \\ Estacionários \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} Pontos\ Transientes \\ \frac{Corretamente\ Identificados}{Total\ de\ Pontos} \\ Transientes \end{matrix} \right) \quad (3.12)$$

Um ponto vantajoso dessa metodologia é a simplicidade, com apenas um parâmetro ajustável na definição da detecção de estados estacionários e transientes para a operação unitária em estudo (trocador de calor).

3.4.3 Método 2: Avaliação do Desvio entre Variáveis Medidas e Reconciliadas

Este método baseia-se na avaliação do desvio entre o valor das variáveis medidas e o valor das variáveis reconciliadas. Maiores desvios indicam que as variáveis medidas se distanciam de uma solução para o balanço de energia em estado estacionário, utilizado pela metodologia de reconciliação de dados.

O valor limite do desvio entre as variáveis medidas e reconciliadas, que determina se os pontos encontram-se em estado estacionário ou transiente, foi otimizado de modo a maximizar as detecções corretas tanto de estados estacionários quanto de estados transientes, utilizando a mesma função objetivo descrita na Seção 3.4.2 e Equação (3.12). O estado estacionário do trocador de calor para o método 2 depende da estacionariedade de todas as seis variáveis medidas simultaneamente.

$$SE\ \left|x_i - x_i^{medido}\right| \leq \Delta x_i^{Limite\ Estacionário} \rightarrow Variável\ x_i\ em\ Estado\ Estacionário$$
$$SE\ \left|x_i - x_i^{medido}\right| > \Delta x_i^{Limite\ Estacionário} \rightarrow Variável\ x_i\ em\ Estado\ Transiente$$

$$SE\ Variáveis\ x_1\ e\ x_2\ e\ x_3\ e\ x_4\ e\ x_5\ e\ x_6\ em\ Estado\ Estacionário$$
$$\rightarrow Trocador\ em\ Estado\ Estacionário$$
$$SE\ Variáveis\ x_1\ ou\ x_2\ ou\ x_3\ ou\ x_4\ ou\ x_5\ ou\ x_6\ em\ Estado\ Transiente$$
$$\rightarrow Trocador\ em\ Estado\ Transiente$$

3.4.4 Metodologia de Detecção de Estados Estacionários de Referência

Com o objetivo de comparar as metodologias propostas, foi implementada uma metodologia de referência para a detecção de estados estacionários com ruído. A metodologia selecionada foi proposta por CAO et al. (1995), referenciada nesta dissertação como metodologia "CAO".

Como descrito por MEJIA et al. (2010), "seu princípio consiste na análise comparativa do valor da razão, R, das variâncias de ruído estimadas, s_1^2 e s_2^2, com um valor crítico de projeto $R_{crítico}$". Ainda de acordo com esses autores, "Quando $R \leq R_{crítico}$ a média da variável do processo é constante e o ruído é independente e uniformemente distribuído, então o modo estacionário é identificado (SS); caso contrário é identificado como modo não-estacionário (NSS) já que a média da variável do processo não é constante e/ou o ruído tem uma alta autocorrelação. Além do $R_{crítico}$, este método precisa do ajuste dos parâmetros de ponderação dos filtros auto-regressivos

de média móvel exponencialmente ponderada, λ_1, λ_2 e λ_3, limitados entre $0 < \lambda_i < 1$". O equacionamento da metodologia CAO é mostrado abaixo:

$$s_{1,i}^2 = \frac{2-\lambda_1}{2} v_{f,i}^2 \tag{3.13}$$

$$s_{2,i}^2 = \frac{\delta_{f,i}^2}{2} \tag{3.14}$$

$$R_i = \frac{s_{1,i}^2}{s_{2,i}^2} = \frac{(2-\lambda_1)}{\delta_{f,i}^2} v_{f,i}^2 \tag{3.15}$$

Para o cálculo da razão R_i, tem-se:

$$v_{f,i}^2 = \lambda_2 \left(X_i - X_{f_{i-1}}\right)^2 + (1-\lambda_2) v_{f,i-1}^2 \tag{3.16}$$

$$X_{f_i} = \lambda_1 X_i + (1-\lambda_1) X_{f_{i-1}} \tag{3.17}$$

$$\delta_{f,i}^2 = \lambda_3 (X_i - X_{i-1})^2 + (1-\lambda_3) \delta_{f,i-1}^2 \tag{3.18}$$

Por fim, a determinação dos pontos estacionários e transientes se dá pela comparação entre a razão calculada R_i e um parâmetro ajustável:

$$SE\ R_i \leq R_{crítico} \rightarrow Variável\ em\ Estado\ Estacionário$$

$$SE\ R_i > R_{crítico} \rightarrow Variável\ em\ Estado\ Transiente$$

em que

$s_{1,i}^2$	Estimativa 1 da variância do ruído.
$s_{2,i}^2$	Estimativa 2 da variância do ruído.
R_i	Razão entre estimativas 1 e 2 da variância do ruído.
$v_{f,i}^2$ / $v_{f,i-1}^2$	Filtro para cálculo da estimativa do desvio médio quadrático entre valor atual medido da variável (X_i) e valor da estimativa da média da variável ($X_{f_{i-1}}$).
$\delta_{f,i}^2$ / $\delta_{f,i-1}^2$	Filtro para cálculo da estimativa do desvio médio quadrático entre valor atual medido da variável (X_i) e valor anteriormente medido da variável (X_{i-1}).
X_{f_i} / $X_{f_{i-1}}$	Valor da estimativa da média da variável no tempo atual (X_{f_i}) e no tempo passado ($X_{f_{i-1}}$).
X_i / X_{i-1}	Valor medido da variável no tempo atual (X_i) e no tempo passado (X_{i-1}).
λ_1	Parâmetro ajustável 1.
λ_2	Parâmetro ajustável 2.
λ_3	Parâmetro ajustável 3.
$R_{crítico}$	Parâmetro ajustável para determinação do limite entre pontos estacionários e transientes.

Os parâmetros da metodologia foram otimizados para cada uma das variáveis avaliadas, de modo a maximizar as detecções corretas tanto de estados estacionários quanto de estados transientes. O estado estacionário do trocador de calor para o método "CAO" depende da estacionariedade de todas as seis variáveis medidas simultaneamente.

$$SE\ Variáveis\ x_1\ e\ x_2\ e\ x_3\ e\ x_4\ e\ x_5\ e\ x_6\ em\ Estado\ Estacionário$$
$$\rightarrow Trocador\ em\ Estado\ Estacionário$$
$$SE\ Variáveis\ x_1\ ou\ x_2\ ou\ x_3\ ou\ x_4\ ou\ x_5\ ou\ x_6\ em\ Estado\ Transiente$$
$$\rightarrow Trocador\ em\ Estado\ Transiente$$

3.4.5 Resultado Correto Esperado para Detecção de Estados Estacionários

De forma a avaliar se a detecção de estados estacionários apresentou resultados corretos para cada um dos métodos e para cada uma das variáveis, foram definidos os resultados corretos esperados. A metodologia utilizou os resultados sem erros de medidas, comparando para cada um dos pontos medidos o valor atual com o valor ligeiramente anterior. Quando o valor apresentava desvio percentual menor do que 0,01%, o ponto foi considerado estacionário, enquanto que para desvios maiores ou iguais a 0,01% o ponto foi considerado transiente. O estado estacionário do trocador de calor depende da estacionariedade simultânea de todas as seis variáveis medidas.

3.4.6 Métodos de Avaliação do Desempenho de Detecção de Estados Estacionários

Definiram-se parâmetros para avaliação e comparação das metodologias de detecção de estados estacionários. Os mesmos são apresentados na Tabela 3.7. O cálculo dos parâmetros se dá pelas equações apresentadas na sequência.

$$Correto\ Geral\ (\%) = \frac{Pontos\ Corretamente\ Identificados}{Total\ de\ Pontos} \tag{3.19}$$

$$Estados\ Estacionários\ Identificados\ (\%) = \frac{Pontos\ Estacionários\ Corretamente\ Identificados}{Total\ de\ Pontos\ Estacionários} \quad (3.20)$$

$$Estados\ Transientes\ Identificados\ (\%) = \frac{Pontos\ Transientes\ Corretamente\ Identificados}{Total\ de\ Pontos\ Transientes} \quad (3.21)$$

$$Erro\ Tipo\ I\ /\ Falso\ Positivo\ (\%) = \frac{Pontos\ Identificados\ Como\ Estacionários\ que\ Eram\ Transientes}{Total\ de\ Pontos\ Identificados\ como\ Estacionários} \quad (3.22)$$

$$Erro\ Tipo\ II\ /\ Não\ Detecção\ (\%) = \frac{Pontos\ Identificados\ Como\ Transientes\ que\ Eram\ Estacionários}{Total\ de\ Pontos\ Identificados\ como\ Transientes} \quad (3.23)$$

Tabela 3.7 – Parâmetros para avaliação das metodologias de detecção de estados estacionários.

Parâmetro	Descrição
Correto Geral (%)	Percentual de pontos identificados corretamente (estacionários e/ou transientes) com relação ao total de pontos medidos.
Estados Estacionários Identificados (%)	Percentual de pontos estacionários corretamente identificados com relação ao total de pontos estacionários.
Estados Transientes Identificados (%)	Percentual de pontos transientes corretamente identificados com relação ao total de pontos transientes.
Erro Tipo I / Falso Positivo (%)	Percentual de pontos identificados como estacionários que eram transientes, com relação ao total de pontos identificados como estacionários.
Erro Tipo II / Não Detecção (%)	Percentual de pontos identificados como transientes que eram estacionários, com relação ao total de pontos identificados como transientes.

3.5 Avaliação da Troca Térmica nos Estados Estacionários Detectados

Como as metodologias propostas de detecção de estado estacionário apresentam em seus cálculos as equações de balanço de energia para o trocador de calor em estado estacionário (na etapa de reconciliação de dados), foram avaliados os resultados obtidos de estimativa do coeficiente global de troca térmica do trocador de calor. O valor calculado foi comparado com o valor real, utilizado como parâmetro do modelo. O cálculo do coeficiente global de troca térmica se deu pelas seguintes equações:

$$U_{calculado} = \frac{Q_{médio}}{A.\Delta \mathrm{T_{ML}}} \tag{3.24}$$

$$Q_{médio} = \frac{Q_{corrente\ quente} + Q_{corrente\ fria}}{2} \tag{3.25}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação dos Modelos Dinâmicos de Trocador de Calor

Foram avaliados os modelos dinâmicos de trocador de calor baseados em células, como disposto na Seção 3.1. Duas estratégias foram consideradas para o cálculo da diferença de temperatura entre as correntes quente e fria dentro de uma mesma célula: diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) e diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}).

Determinou-se como requisito que os modelos dinâmicos apresentassem resultados que satisfizessem o balanço de energia quando em estado estacionário. Compararam-se também os resultados da dinâmica entre dois estados estacionários. O número de células variou de 3 a 500.

4.1.1 Avaliação de Estados Estacionários

Dentre as perturbações nas variáveis de entrada apresentadas na Seção 3.2.2, foram avaliados os resultados estacionários para três cenários, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Cenários considerados na avaliação dos modelos dinâmicos em estado estacionário.

Cenário	Descrição
1	Maior diferença entre as temperaturas de entrada (55°C) com vazão das correntes quente e fria iguais a 88,69 m³/h e 127,34 m³/h, respectivamente. O estado estacionário é avaliado no tempo de simulação de 1260 segundos.
2	Maior vazão da corrente quente (133,04 m³/h), com vazão da corrente fria de 127,34 m³/h. As temperaturas de entrada são iguais a 55°C e 25°C. O estado estacionário é avaliado no tempo de simulação de 3479 segundos.
3	Maior vazão da corrente fria (184,65 m³/h), com vazão da corrente quente de 79,82 m³/h. As temperaturas de entrada são iguais a 55°C e 25°C. O estado estacionário é avaliado no tempo de simulação de 5580 segundos.

Variou-se o número de células entre 3 e 500. Os resultados obtidos com 500 células no modelo ΔT_{ML} foram considerados corretos para o cálculo do erro percentual nas demais simulações.

4.1.1.1 Cenário 1 – Maior diferença entre temperaturas de entrada

Observam-se na Tabela 4.2 os dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 1. Aguardou-se a estabilização das variáveis de saída do modelo, obtendo-se assim os resultados para as variáveis de saída no estado estacionário. Os resultados obtidos para a temperatura de saída das correntes quente e fria no estado estacionário, para o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}), são apresentados na Tabela 4.3. Os resultados para o modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}) são apresentados na Tabela 4.4. Os resultados de ambos os modelos para a temperatura de saída das correntes quente e fria são comparados na Figura 4.1, na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 1.

Corrente	Dado	Unidade	Valor
Quente	Temperatura de Entrada	°C	75
	Vazão Volumétrica	m³/h	88,69
Fria	Temperatura de Entrada	°C	20
	Vazão Volumétrica	m³/h	127,34

Tabela 4.3 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo ΔT_{ML}.

Número de Células no Modelo	Temperatura de Saída da Corrente Quente			Temperatura de Saída da Corrente Fria		
	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)
3	51,2576	0,0000	0,0000	36,2809	0,0000	0,0000
5	51,2576	0,0000	0,0000	36,2809	0,0000	0,0000
10	51,2576	0,0000	0,0000	36,2809	0,0000	0,0000
50	51,2576	0,0000	0,0000	36,2809	0,0000	0,0000
100	51,2576	0,0000	0,0000	36,2809	0,0000	0,0000
250	51,2576	0,0000	0,0000	36,2809	0,0000	0,0000
500	51,2576	(referência)	(referência)	36,2809	(referência)	(referência)

Tabela 4.4 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo ΔT_{cte}.

Número de Células no Modelo	Temperatura de Saída da Corrente Quente			Temperatura de Saída da Corrente Fria		
	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)
3	53,8050	2,5474	4,9697	34,5200	-1,7608	-4,8533
5	52,8552	1,5976	3,1168	35,1761	-1,1047	-3,0449
10	52,0845	0,8269	1,6132	35,7089	-0,5720	-1,5765
50	51,4278	0,1702	0,3320	36,1631	-0,1177	-0,3245
100	51,3430	0,0854	0,1666	36,2218	-0,0591	-0,1629
250	51,2918	0,0342	0,0668	36,2572	-0,0237	-0,0653
500	51,2747	0,0171	0,0334	36,2690	-0,0119	-0,0327

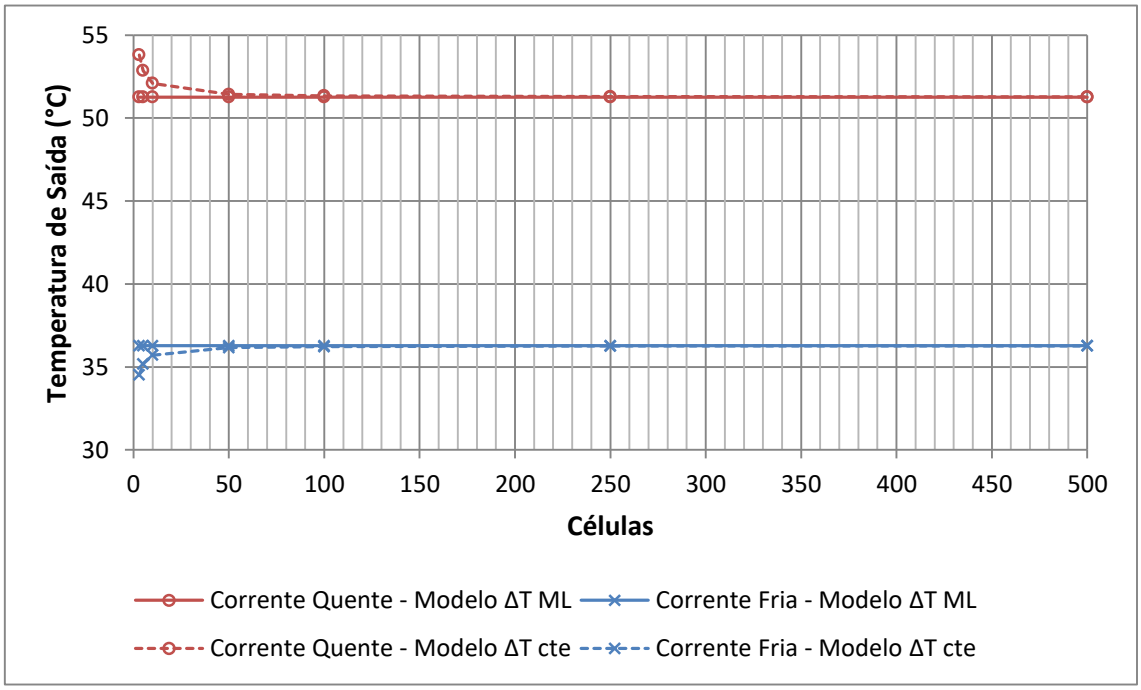

Figura 4.1 – Comparação das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 1.

É possível perceber que a temperatura de saída para as correntes quente e fria, considerando o modelo ΔT_{ML}, não apresenta variação com o aumento do número de células do modelo. Já a temperatura de saída das correntes quente e fria para o modelo ΔT_{cte} variou com o aumento no número de células do modelo, tendendo para os resultados obtidos com o modelo ΔT_{ML} à medida que o número de células aumenta.

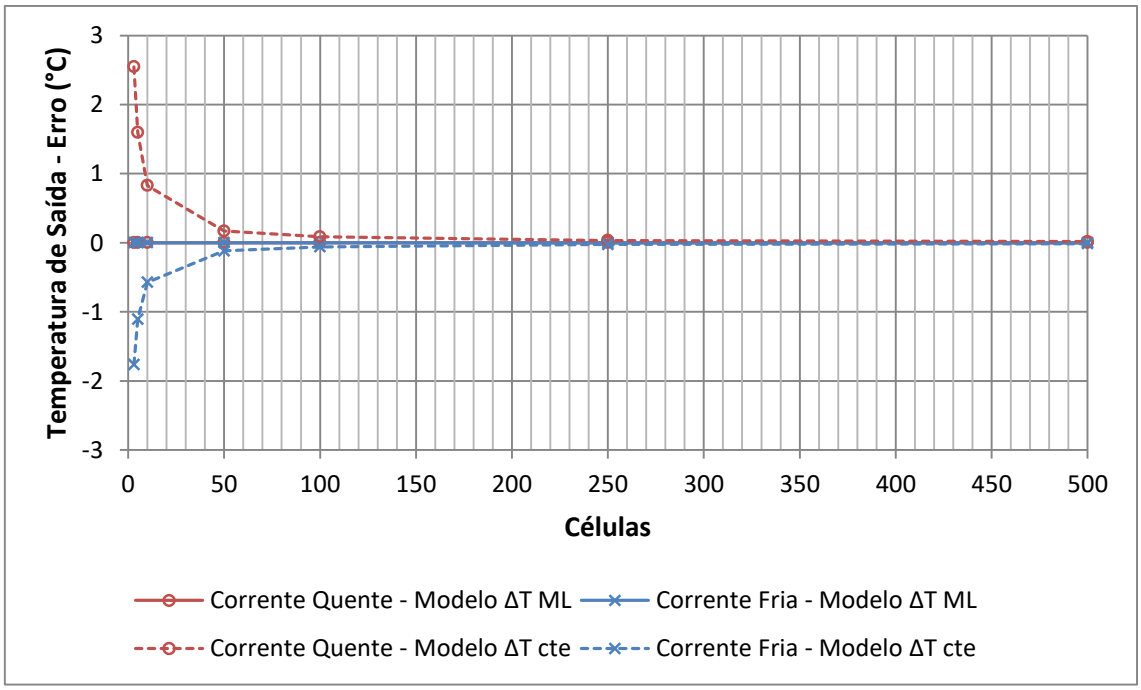

Figura 4.2 – Comparação do erro das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 1.

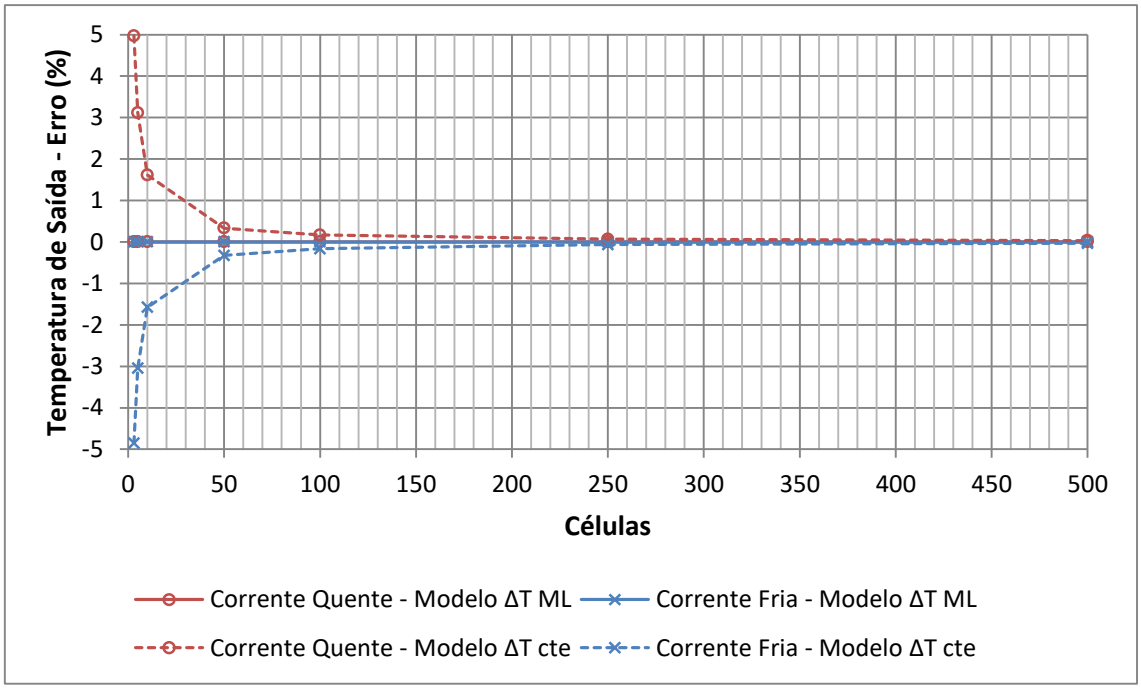

Figura 4.3 – Comparação do erro percentual das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 1.

Observando os erros para o modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}), com apenas três células no modelo foi obtido um erro de 2,55°C para a temperatura de saída da corrente quente, enquanto para a corrente fria o erro da

temperatura de saída foi de −1,76°C. Os valores apresentados correspondem a erros percentuais de 4,97% e −4,85%, respectivamente.

Quando avaliando os resultados para o modelo ΔT_{cte}de 500 células os erros são reduzidos para 0,017°C (temperatura de saída da corrente quente) e −0,012°C (temperatura de saída da corrente fria). Os erros percentuais são iguais a 0,03% e −0,01%, respectivamente.

Conclui-se que o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) no cálculo de calor trocado entre as correntes quente e fria dentro de uma mesma célula apresentou melhores resultados na predição das temperaturas de saída das correntes quente e fria. Mesmo no caso com apenas três células no modelo, os resultados não apresentaram erros quando comparados com os resultados de 500 células no modelo. Esse resultado já era esperado, pois, para o caso de propriedades físicas constantes, a média logarítmica é a solução analítica do trocador de calor.

Avaliou-se também a troca térmica entre as correntes quente e fria, bem como o fechamento do balanço de energia. Os resultados para o modelo que utiliza ΔT_{ML} são apresentados na Tabela 4.5, enquanto os resultados para o modelo com ΔT_{cte} são apresentados na Tabela 4.6. Uma comparação entre as taxas de fluxo de calor pode ser vista na Figura 4.4, enquanto a avaliação do balanço de energia pode ser visto na Figura 4.5 e na Figura 4.6.

Tabela 4.5 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta \boldsymbol{T_{ML}}$.

Número de Células no Modelo	Taxa de Fluxo de Calor (W)		Balanço de Energia	
	Corrente Quente	Corrente Fria	Diferença Absoluta (W)	Diferença Percentual (%)
3	2,393E+06	2,393E+06	2,40E-02	1,00E-06
5	2,393E+06	2,393E+06	4,48E-04	1,87E-08
10	2,393E+06	2,393E+06	3,41E-04	1,42E-08
50	2,393E+06	2,393E+06	1,53E-03	6,39E-08
100	2,393E+06	2,393E+06	5,32E-04	2,22E-08
250	2,393E+06	2,393E+06	5,44E-04	2,27E-08
500	2,393E+06	2,393E+06	1,31E-03	5,48E-08

Tabela 4.6 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo ΔT_{cte}.

Número de Células no Modelo	Taxa de Fluxo de Calor (W)		Balanço de Energia	
	Corrente Quente	Corrente Fria	Diferença Absoluta (W)	Diferença Percentual (%)
3	2,135E+06	2,135E+06	3,03E-04	1,42E-08
5	2,231E+06	2,231E+06	1,27E-04	5,70E-09
10	2,309E+06	2,309E+06	2,18E-04	9,44E-09
50	2,376E+06	2,376E+06	8,31E-05	3,50E-09
100	2,384E+06	2,384E+06	1,41E-04	5,92E-09
250	2,389E+06	2,389E+06	2,75E-04	1,15E-08
500	2,391E+06	2,391E+06	2,50E-05	1,05E-09

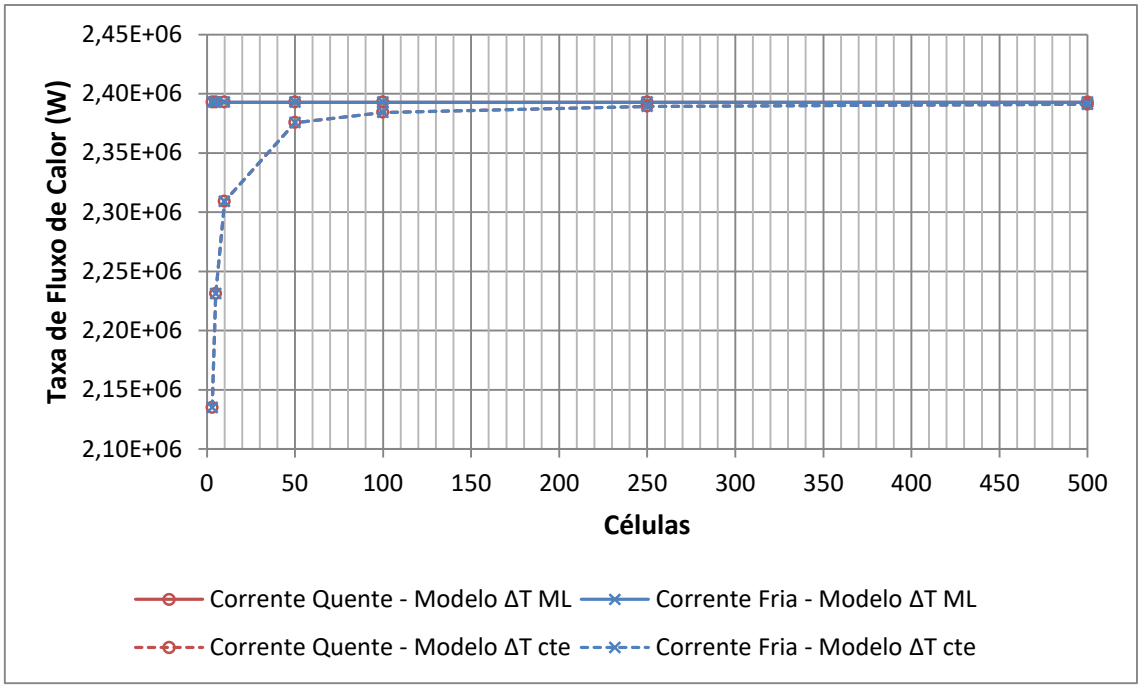

Figura 4.4 – Comparação das taxas de fluxo de calor variando o número de células para cenário 1.

Foi observado que a taxa de fluxo de calor para as correntes quente e fria com o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica não sofreu alterações com o aumento no número de células utilizadas. Já o modelo que considera a diferença de temperatura constante apresentou um aumento da taxa de fluxo de calor com o aumento no número de células, tendendo para o valor calculado com o modelo que considera ΔT_{ML}.

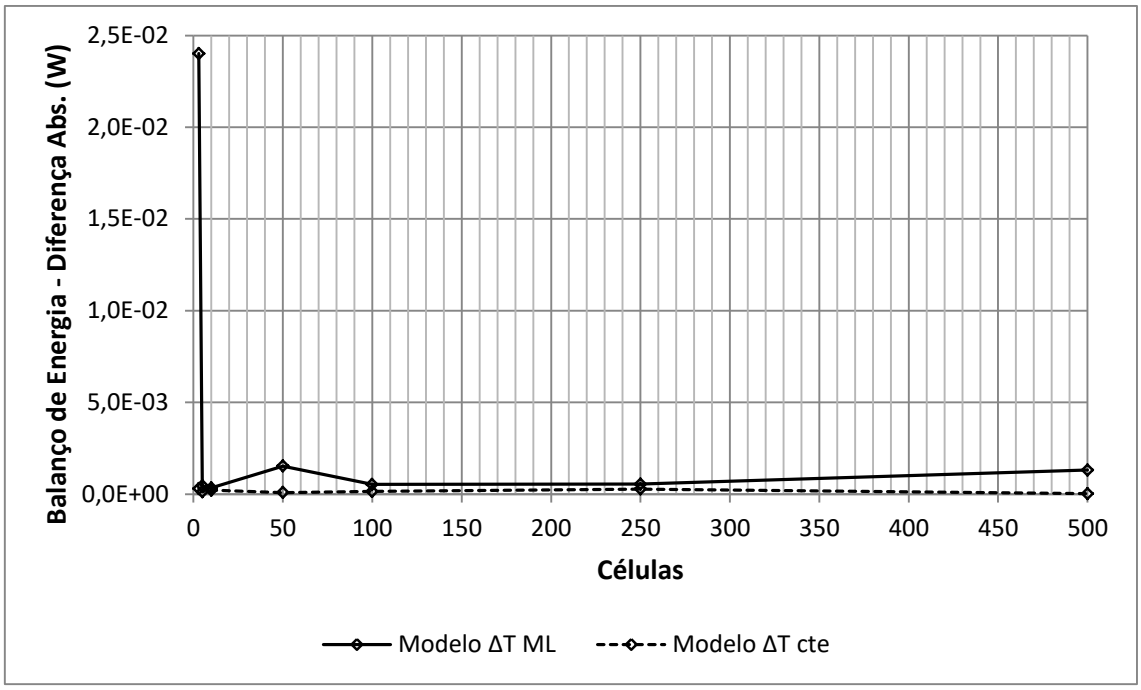

Figura 4.5 – Diferença absoluta da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 1.

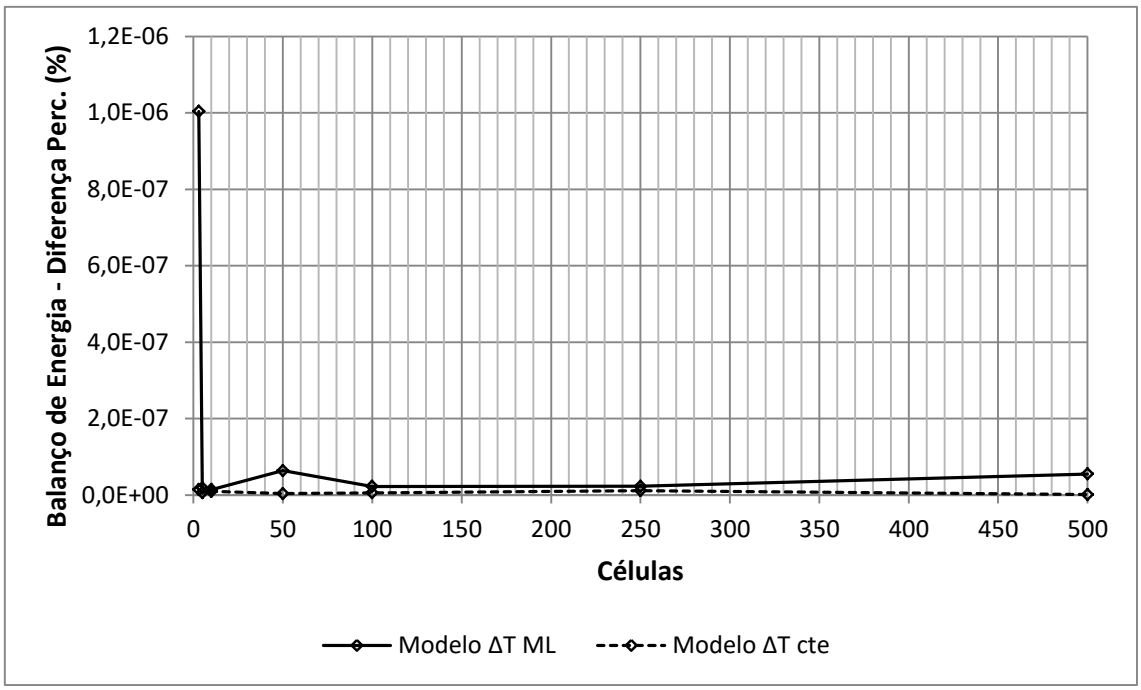

Figura 4.6 – Diferença percentual da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 1.

As diferenças calculadas entre as taxas de fluxo de calor das correntes quente e fria para todos os casos foram consideradas desprezíveis, com erro percentual igual ou

abaixo de $1{,}0\times10^{-6}$ %. Dessa forma, conclui-se que o balanço de energia foi satisfeito para todos os casos simulados.

4.1.1.2 Cenário 2 – Maior vazão da corrente quente

Observam-se na Tabela 4.7 os dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 2. Aguardou-se a estabilização das variáveis de saída do modelo, obtendo-se assim os resultados para as variáveis de saída no estado estacionário. Os resultados obtidos para a temperatura de saída das correntes quente e fria no estado estacionário, para o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}), são apresentados na Tabela 4.8. Os resultados para o modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}) são apresentados na Tabela 4.9. Os resultados de ambos os modelos para a temperatura de saída das correntes quente e fria são comparados na Figura 4.7, na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

Tabela 4.7 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 2.

Corrente	Dado	Unidade	Valor
Quente	Temperatura de Entrada	°C	55
	Vazão Volumétrica	m³/h	133,04
Fria	Temperatura de Entrada	°C	25
	Vazão Volumétrica	m³/h	127,34

Tabela 4.8 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo ΔT_{ML}.

Número de Células no Modelo	Temperatura de Saída da Corrente Quente			Temperatura de Saída da Corrente Fria		
	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)
3	45,7136	0,0000	0,0000	34,6086	0,0000	0,0000
5	45,7136	0,0000	0,0000	34,6086	0,0000	0,0000
10	45,7136	0,0000	0,0000	34,6086	0,0000	0,0000
50	45,7136	0,0000	0,0000	34,6086	0,0000	0,0000
100	45,7136	0,0000	0,0000	34,6086	0,0000	0,0000
250	45,7136	0,0000	0,0000	34,6086	0,0000	0,0000
500	45,7136	(referência)	(referência)	34,6086	(referência)	(referência)

Tabela 4.9 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo ΔT_{cte}.

Número de Células no Modelo	Temperatura de Saída da Corrente Quente			Temperatura de Saída da Corrente Fria		
	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)
3	46,5942	0,8805	1,9262	33,6938	-0,9148	-2,6433
5	46,2628	0,5492	1,2013	34,0380	-0,5706	-1,6488
10	45,9966	0,2829	0,6189	34,3145	-0,2940	-0,8496
50	45,7716	0,0580	0,1269	34,5483	-0,0603	-0,1742
100	45,7427	0,0291	0,0636	34,5783	-0,0302	-0,0874
250	45,7253	0,0117	0,0255	34,5965	-0,0121	-0,0350
500	45,7195	0,0058	0,0128	34,6025	-0,0061	-0,0175

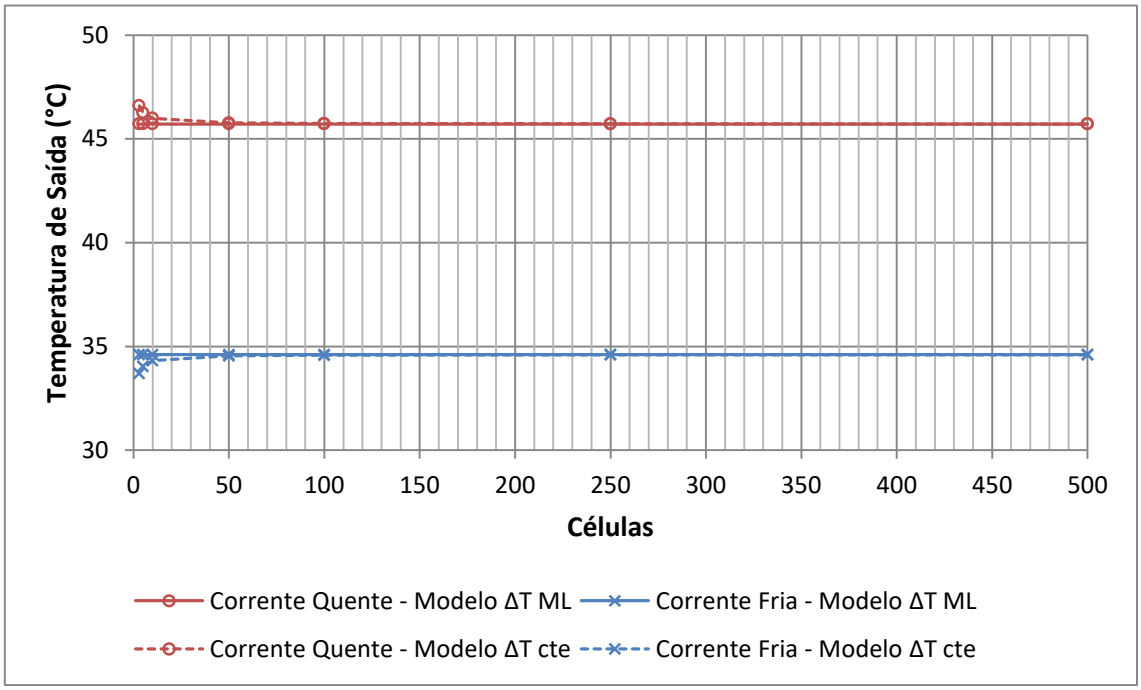

Figura 4.7 – Comparação das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 2.

É possível perceber que a temperatura de saída para as correntes quente e fria, considerando o modelo ΔT_{ML}, não apresenta variação com o aumento do número de células do modelo. Já a temperatura de saída das correntes quente e fria para o modelo ΔT_{cte} variou com o aumento no número de células do modelo, tendendo para os resultados obtidos com o modelo ΔT_{ML} à medida que o número de células aumenta.

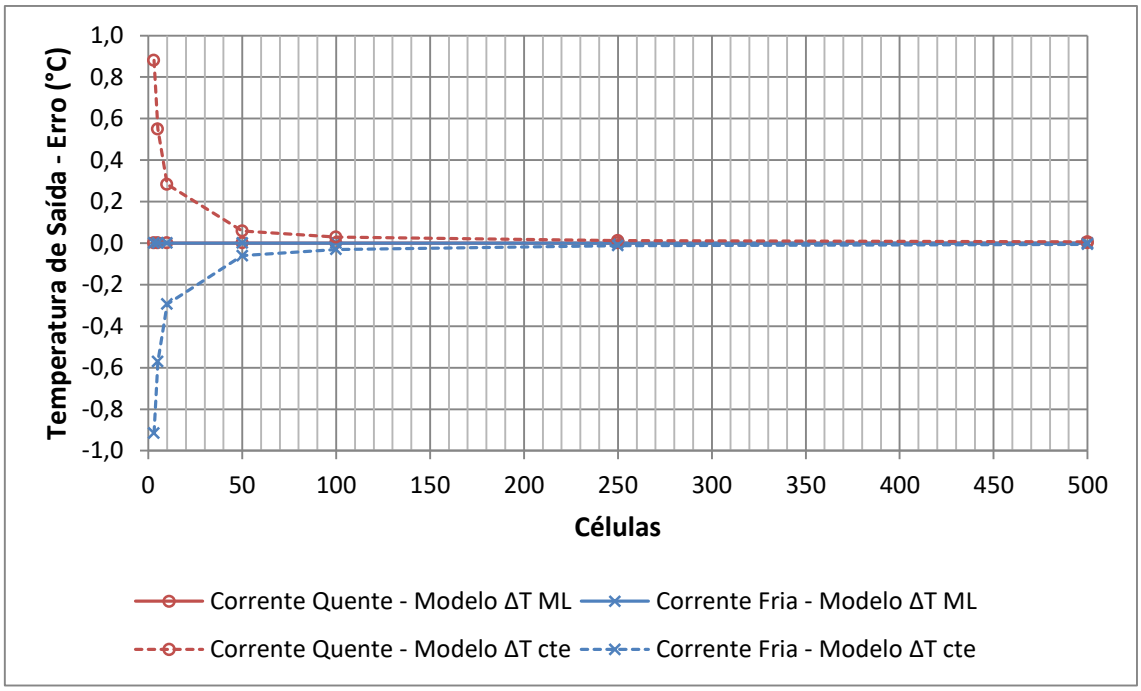

Figura 4.8 – Comparação do erro das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 2.

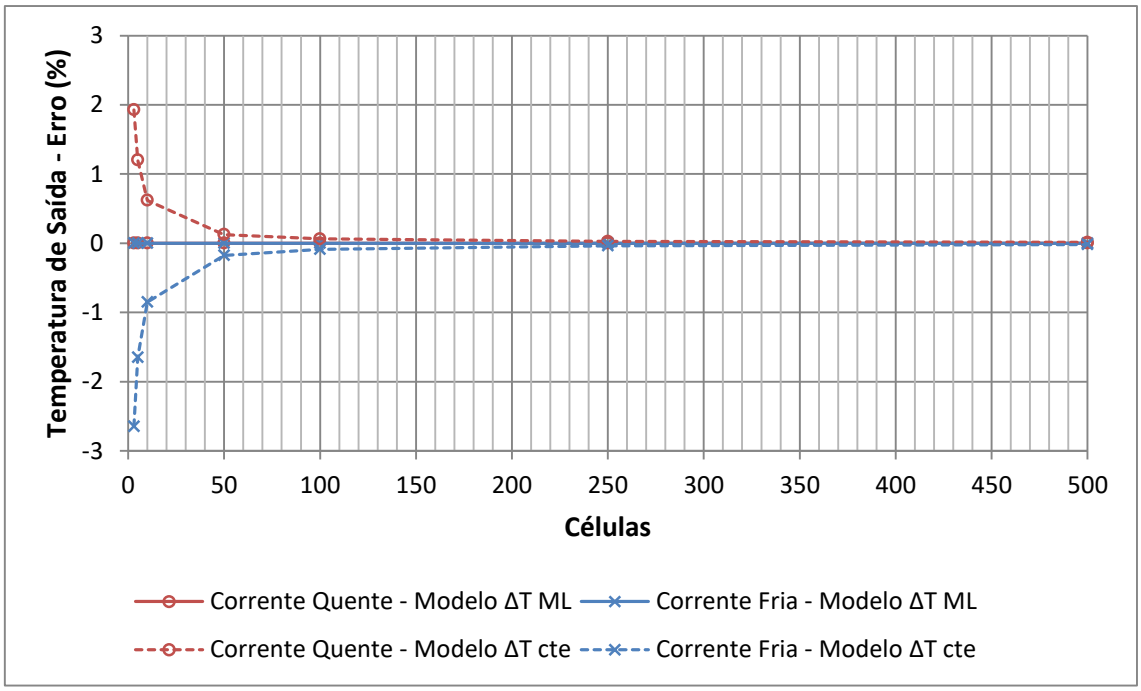

Figura 4.9 – Comparação do erro percentual das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 2.

Observando os erros para o modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}), com apenas três células no modelo foi obtido um erro de 0,88°C para a temperatura de saída da corrente quente, enquanto para a corrente fria o erro da

temperatura de saída foi de –0,91°C. Os valores apresentados correspondem a erros percentuais de 1,93% e –2,64%, respectivamente.

Quando avaliando os resultados para o modelo ΔT_{cte}de 500 células os erros são reduzidos para 0,0058°C (temperatura de saída da corrente quente) e -0,0061°C (temperatura de saída da corrente fria). Os erros percentuais são iguais a 0,013% e –0,018%, respectivamente.

Conclui-se que o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) no cálculo de calor trocado entre as correntes quente e fria dentro de uma mesma célula apresentou melhores resultados na predição das temperaturas de saída das correntes quente e fria.

Avaliou-se também a troca térmica entre as correntes quente e fria, bem como o fechamento do balanço de energia. Os resultados para o modelo que utiliza ΔT_{ML} são apresentados na Tabela 4.10, enquanto os resultados para o modelo com ΔT_{cte} são apresentados na Tabela 4.11. Uma comparação entre as taxas de fluxo de calor pode ser vista na Figura 4.10, enquanto a avaliação do balanço de energia pode ser visto na Figura 4.11 e na Figura 4.12.

Tabela 4.10 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta \boldsymbol{T_{ML}}$.

Número de Células no Modelo	Taxa de Fluxo de Calor (W)		Balanço de Energia	
	Corrente Quente	Corrente Fria	Diferença Absoluta (W)	Diferença Percentual (%)
3	1,411E+06	1,411E+06	1,61E-04	1,14E-08
5	1,411E+06	1,411E+06	2,41E-03	1,71E-07
10	1,411E+06	1,411E+06	1,27E-03	9,03E-08
50	1,411E+06	1,411E+06	4,02E-03	2,85E-07
100	1,411E+06	1,411E+06	1,16E-03	8,22E-08
250	1,411E+06	1,411E+06	5,65E-05	4,01E-09
500	1,411E+06	1,411E+06	5,15E-04	3,65E-08

Tabela 4.11 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta \boldsymbol{T_{cte}}$.

Número de Células no Modelo	Taxa de Fluxo de Calor (W)		Balanço de Energia	
	Corrente Quente	Corrente Fria	Diferença Absoluta (W)	Diferença Percentual (%)
3	1,277E+06	1,277E+06	2,00E-04	1,57E-08
5	1,327E+06	1,327E+06	1,89E-04	1,43E-08
10	1,368E+06	1,368E+06	8,32E-05	6,08E-09
50	1,402E+06	1,402E+06	1,02E-03	7,31E-08
100	1,406E+06	1,406E+06	1,79E-03	1,27E-07
250	1,409E+06	1,409E+06	9,60E-04	6,81E-08
500	1,410E+06	1,410E+06	1,45E-04	1,03E-08

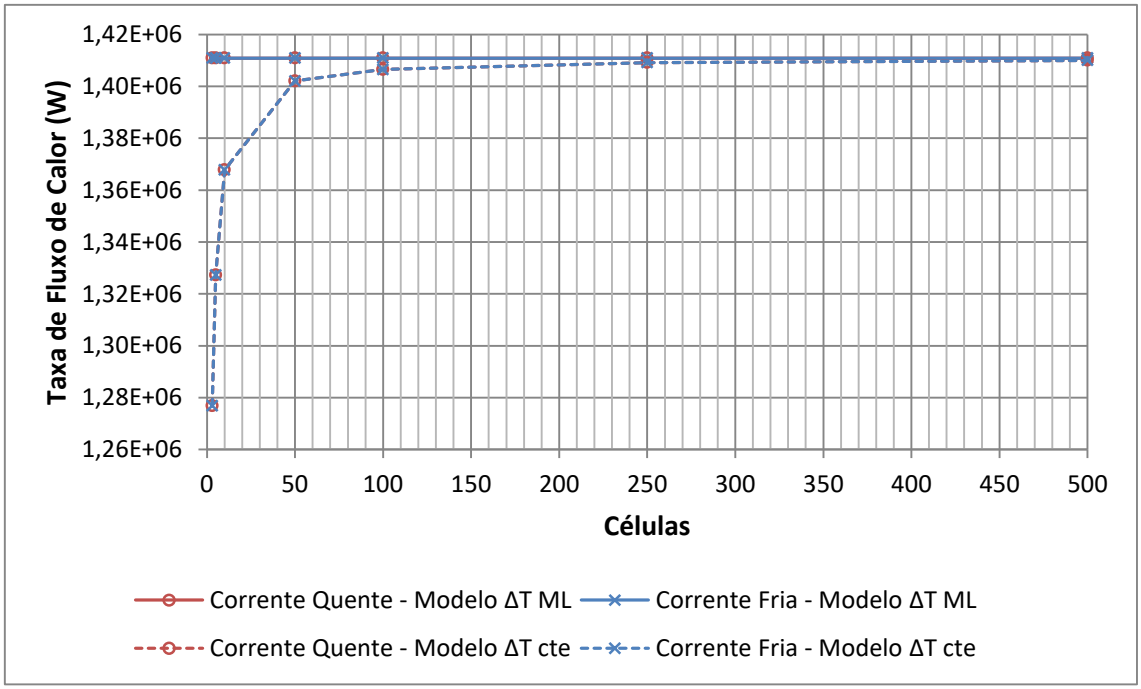

Figura 4.10 – Comparação das taxas de fluxo de calor variando o número de células para cenário 2.

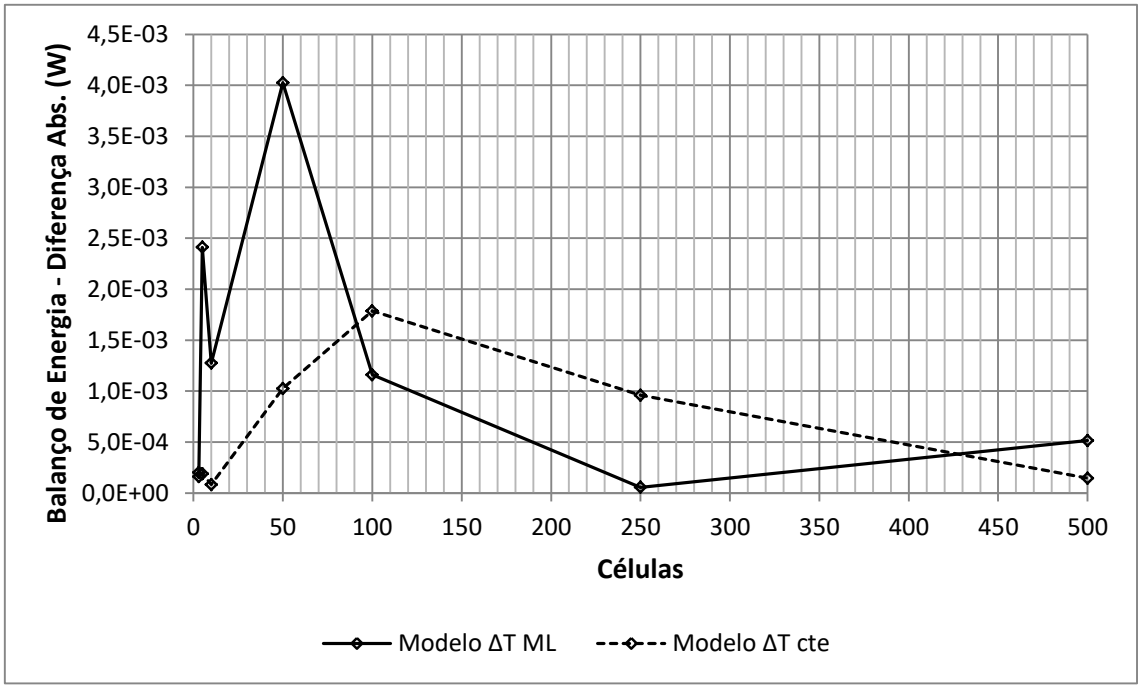

Figura 4.11 – Diferença absoluta da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 2.

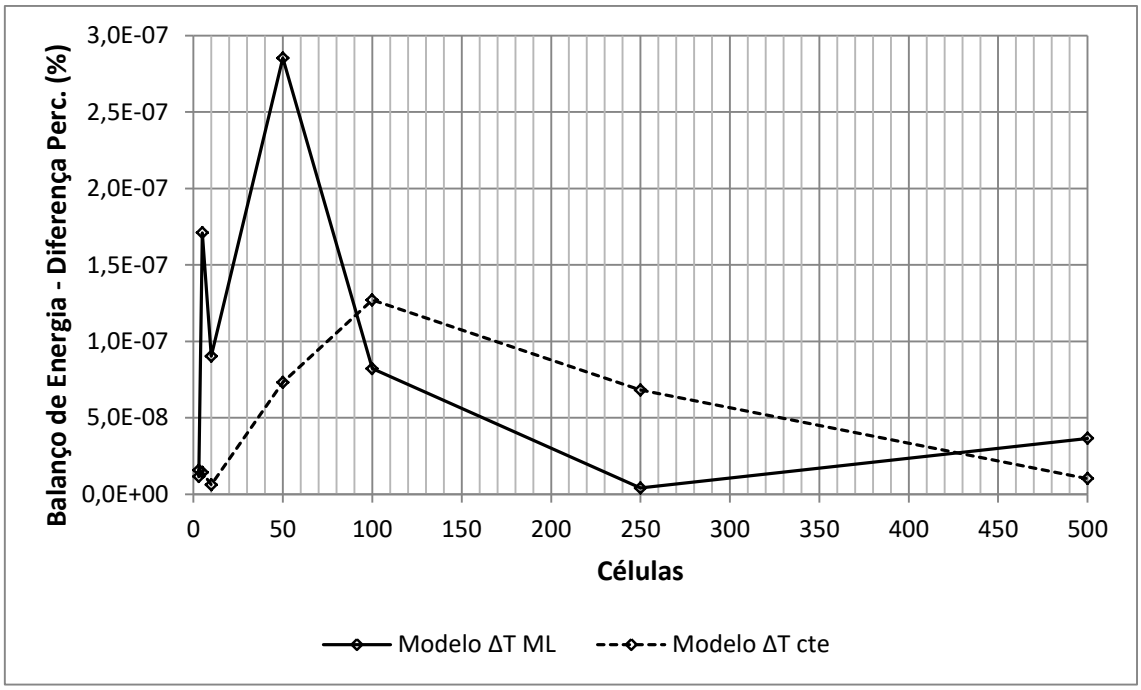

Figura 4.12 – Diferença percentual da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 2.

Foi observado que a taxa de fluxo de calor para as correntes quente e fria com o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica não sofreu alterações com o aumento no número de células utilizadas. Já o modelo que considera a diferença de temperatura constante apresentou um aumento da taxa de fluxo de calor com o aumento no número de células, tendendo para o valor calculado com o modelo que considera ΔT_{ML}.

As diferenças calculadas entre as taxas de fluxo de calor das correntes quente e fria para todos os casos foram consideradas desprezíveis, com erro percentual igual ou abaixo de $2{,}8\times10^{-7}$ %. Dessa forma, conclui-se que o balanço de energia foi satisfeito para todos os casos simulados.

4.1.1.3 Cenário 3 – Maior vazão da corrente fria

Observa-se na Tabela 4.12 os dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 3. Aguardou-se a estabilização das variáveis de saída do modelo, obtendo-se assim os resultados para as variáveis de saída no estado estacionário. Os resultados obtidos para a temperatura de saída das correntes quente e fria no estado estacionário, para o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}), são apresentados na Tabela 4.13. Os resultados para o

modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}) são apresentados na Tabela 4.14. Os resultados de ambos os modelos para a temperatura de saída das correntes quente e fria são comparados na Figura 4.13, na Figura 4.14 e na Figura 4.15.

Tabela 4.12 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor no cenário 3.

Corrente	Dado	Unidade	Valor
Quente	Temperatura de Entrada	°C	55
	Vazão Volumétrica	m³/h	79,82
Fria	Temperatura de Entrada	°C	25
	Vazão Volumétrica	m³/h	184,65

Tabela 4.13 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo ΔT_{ML}.

Número de Células no Modelo	Temperatura de Saída da Corrente Quente			Temperatura de Saída da Corrente Fria		
	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)
3	40,4644	0,0000	0,0000	31,2245	0,0000	0,0000
5	40,4644	0,0000	0,0000	31,2245	0,0000	0,0000
10	40,4644	0,0000	0,0000	31,2245	0,0000	0,0000
50	40,4644	0,0000	0,0000	31,2245	0,0000	0,0000
100	40,4644	0,0000	0,0000	31,2245	0,0000	0,0000
250	40,4644	0,0000	0,0000	31,2245	0,0000	0,0000
500	40,4644	(referência)	(referência)	31,2245	(referência)	(referência)

Tabela 4.14 – Resultados estacionários para temperaturas de saída das correntes quente e fria com modelo ΔT_{cte}.

Número de Células no Modelo	Temperatura de Saída da Corrente Quente			Temperatura de Saída da Corrente Fria		
	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)	Temperatura (°C)	Erro (°C)	Erro Percentual (%)
3	41,9361	1,4717	3,6369	30,5916	-0,6329	-2,0270
5	41,3865	0,9221	2,2787	30,8279	-0,3966	-1,2703
10	40,9413	0,4769	1,1787	31,0193	-0,2052	-0,6571
50	40,5625	0,0981	0,2425	31,1823	-0,0422	-0,1352
100	40,5136	0,0492	0,1217	31,2033	-0,0212	-0,0678
250	40,4841	0,0197	0,0488	31,2160	-0,0085	-0,0272
500	40,4743	0,0099	0,0244	31,2203	-0,0042	-0,0136

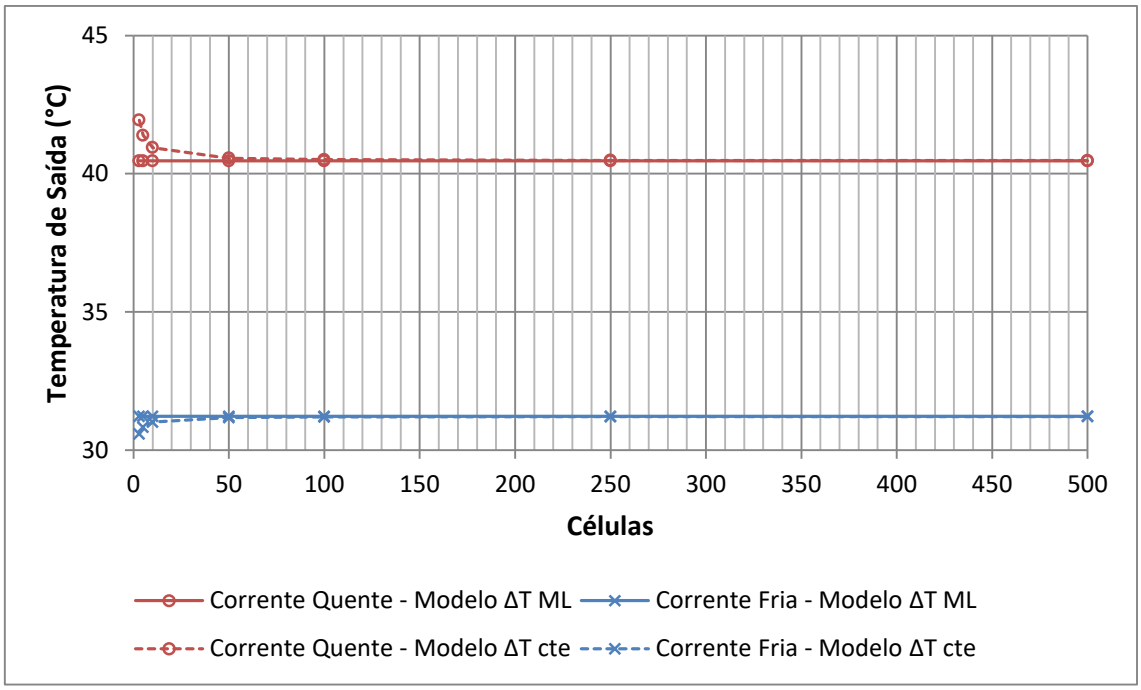

Figura 4.13 – Comparação das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 3.

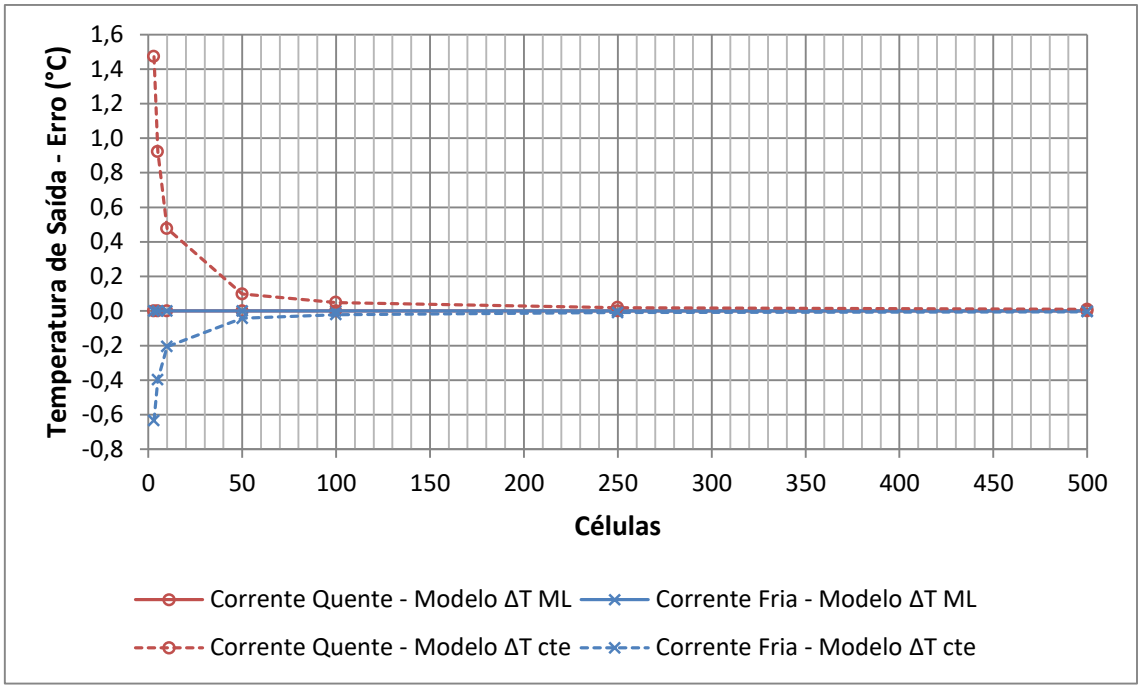

Figura 4.14 – Comparação do erro das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 3.

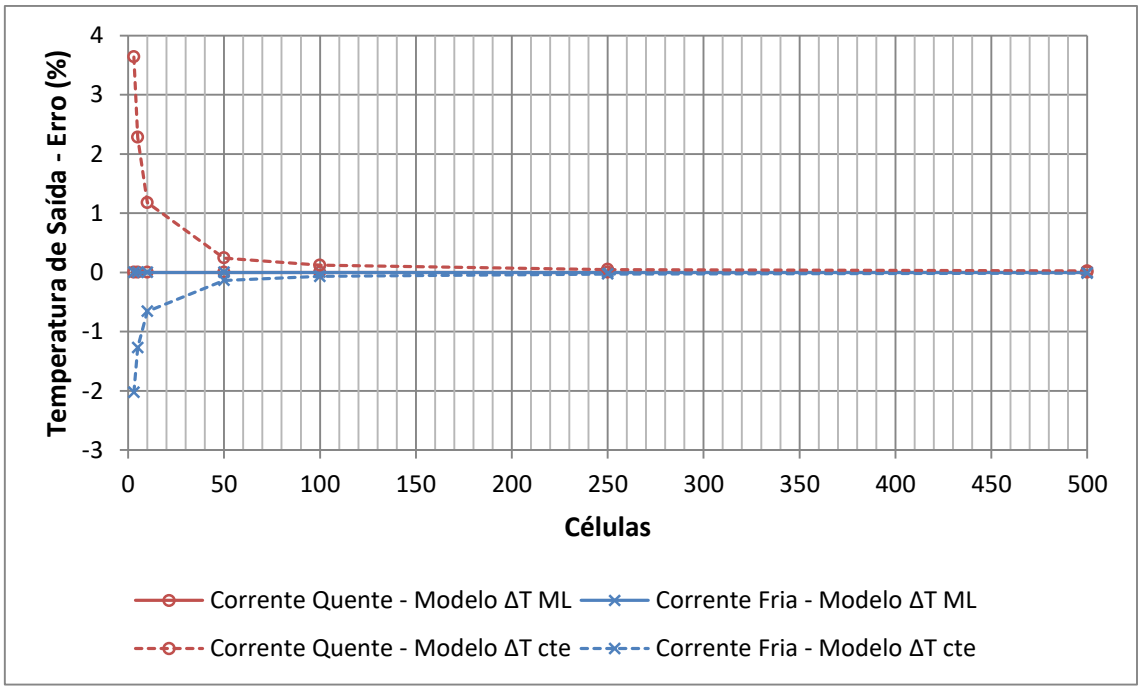

Figura 4.15 – Comparação do erro percentual das temperaturas de saída variando o número de células para cenário 3.

É possível perceber que a temperatura de saída para as correntes quente e fria, considerando o modelo ΔT_{ML}, não apresenta variação com o aumento do número de células do modelo. Já a temperatura de saída das correntes quente e fria para o modelo ΔT_{cte} variou com o aumento no número de células do modelo, tendendo para os resultados obtidos com o modelo ΔT_{ML} à medida que o número de células aumenta.

Observando os erros para o modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}), com apenas 3 células no modelo foi obtido um erro de 1,47°C para a temperatura de saída da corrente quente, enquanto para a corrente fria o erro da temperatura de saída foi de –0,63°C. Os valores apresentados correspondem a erros percentuais de 3,64% e –2,03%, respectivamente.

Quando avaliando os resultados para o modelo ΔT_{cte}de 500 células os erros são reduzidos para 0,0099°C (temperatura de saída da corrente quente) e –0,0042°C (temperatura de saída da corrente fria). Os erros percentuais são iguais a 0,024% e –0,014%, respectivamente.

Conclui-se que o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) no cálculo de calor trocado entre as correntes quente e fria dentro de

uma mesma célula apresentou melhores resultados na predição das temperaturas de saída das correntes quente e fria.

Avaliou-se também a troca térmica entre as correntes quente e fria, bem como o fechamento do balanço de energia. Os resultados para o modelo que utiliza ΔT_{ML} são apresentados na Tabela 4.15, enquanto os resultados para o modelo com ΔT_{cte} são apresentados na Tabela 4.16. Uma comparação entre as taxas de fluxo de calor pode ser vista na Figura 4.16, enquanto a avaliação do balanço de energia pode ser visto na Figura 4.17 e na Figura 4.18.

Tabela 4.15 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta \boldsymbol{T_{ML}}$.

Número de Células no Modelo	Taxa de Fluxo de Calor (W)		Balanço de Energia	
	Corrente Quente	Corrente Fria	Diferença Absoluta (W)	Diferença Percentual (%)
3	1,327E+06	1,327E+06	9,32E-02	7,02E-06
5	1,327E+06	1,327E+06	2,22E-02	1,67E-06
10	1,327E+06	1,327E+06	1,62E-02	1,22E-06
50	1,327E+06	1,327E+06	2,93E-02	2,21E-06
100	1,327E+06	1,327E+06	1,15E-04	8,65E-09
250	1,327E+06	1,327E+06	8,77E-04	6,61E-08
500	1,327E+06	1,327E+06	6,31E-04	4,75E-08

Tabela 4.16 – Resultados estacionários para balanço de energia com modelo $\Delta \boldsymbol{T_{cte}}$.

Número de Células no Modelo	Taxa de Fluxo de Calor (W)		Balanço de Energia	
	Corrente Quente	Corrente Fria	Diferença Absoluta (W)	Diferença Percentual (%)
3	1,192E+06	1,192E+06	8,05E-02	6,75E-06
5	1,242E+06	1,242E+06	9,12E-02	7,34E-06
10	1,283E+06	1,283E+06	8,38E-02	6,53E-06
50	1,318E+06	1,318E+06	1,57E-02	1,19E-06
100	1,322E+06	1,322E+06	6,88E-04	5,20E-08
250	1,325E+06	1,325E+06	5,96E-03	4,50E-07
500	1,326E+06	1,326E+06	1,99E-03	1,50E-07

Foi observado que a taxa de fluxo de calor para as correntes quente e fria com o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica não sofreu alterações com o aumento no número de células utilizadas. Já o modelo que considera a diferença de temperatura constante apresentou um aumento da taxa de fluxo de calor com o aumento no número de células, tendendo para o valor calculado com o modelo que considera ΔT_{ML}.

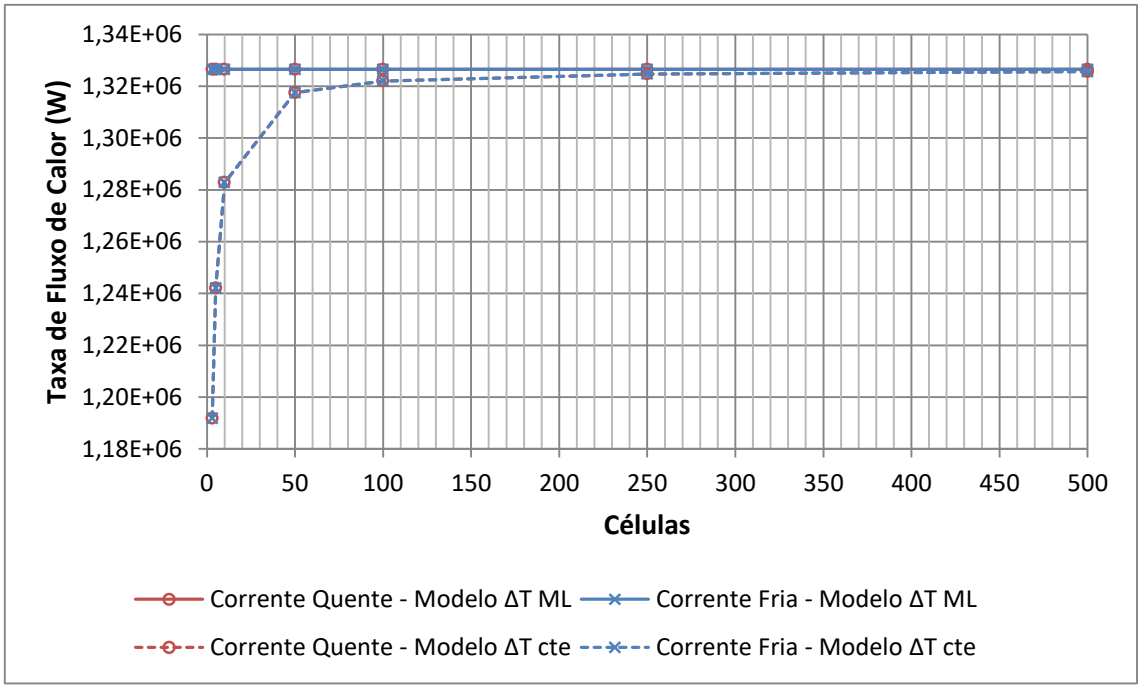

Figura 4.16 – Comparação das taxas de fluxo de calor variando o número de células para cenário 3.

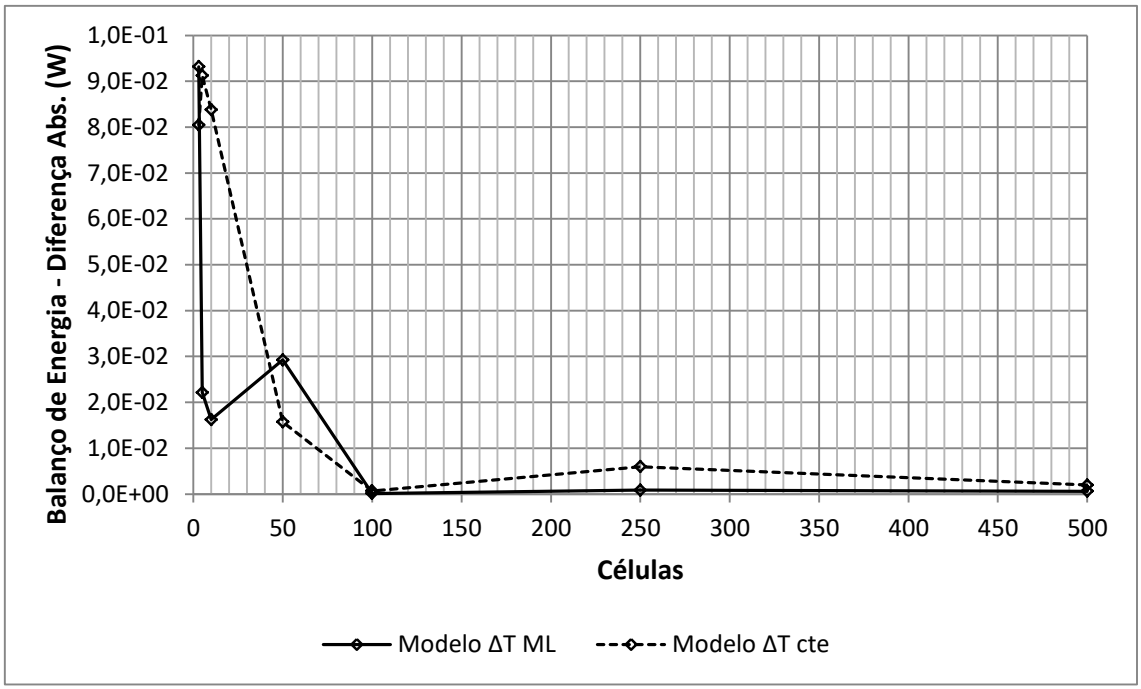

Figura 4.17 – Diferença absoluta da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 3.

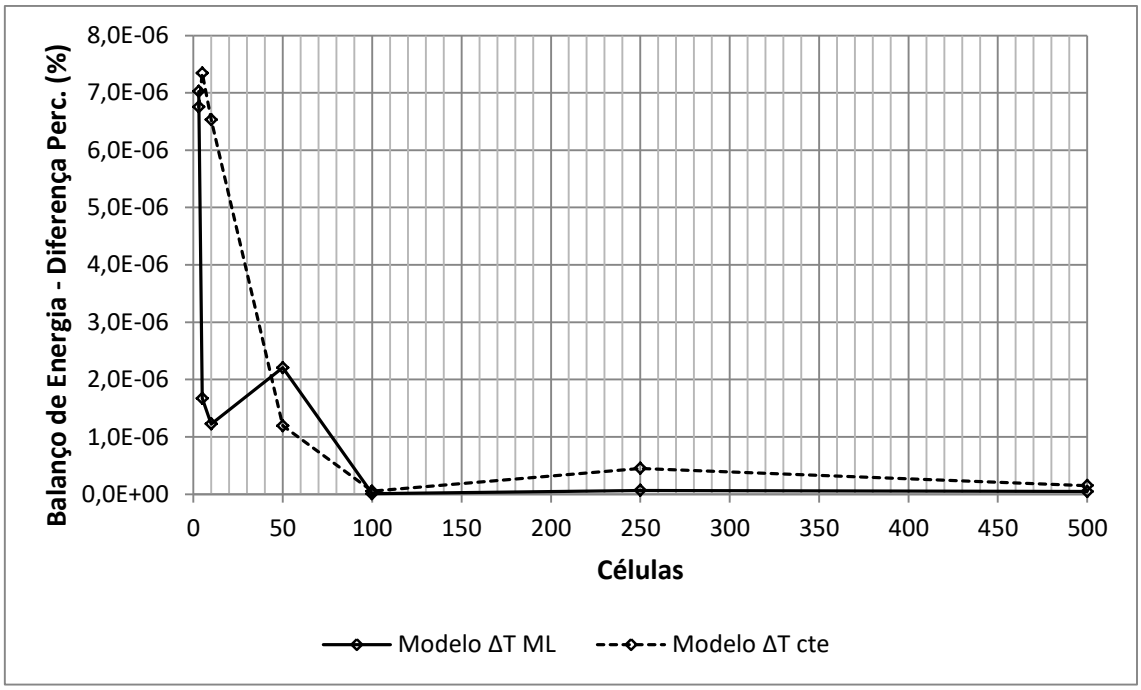

Figura 4.18 – Diferença percentual da taxa de fluxo de calor variando o número de células para cenário 3.

As diferenças calculadas entre as taxas de fluxo de calor das correntes quente e fria para todos os casos foram consideradas desprezíveis, com erro percentual igual ou abaixo de $7{,}3\times10^{-6}$ %. Dessa forma, conclui-se que o balanço de energia foi satisfeito para todos os casos simulados.

4.1.2 Avaliação de Respostas Dinâmicas

Avaliou-se a influência da variação do número de células dos modelos dinâmicos de trocador de calor na resposta dinâmica para uma perturbação do tipo degrau na temperatura de entrada da corrente quente. Dentre as perturbações nas variáveis de entrada apresentadas na Seção 3.2.2, foi avaliada a perturbação com maior variação na temperatura, que ocorre aos 300 segundos de simulação. Os dados da perturbação simulada são apresentados na Tabela 4.17. Os resultados dinâmicos da temperatura de saída da corrente quente para o modelo que considera a diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) são apresentados na Figura 4.19. Já os resultados para o modelo que considera a diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}) são apresentados na Figura 4.20.

Tabela 4.17 – Dados de entrada para os modelos dinâmicos de trocador de calor na avaliação de resposta dinâmica.

Corrente	Dado	Unidade	Valor
Quente	Temperatura de Entrada antes da Perturbação	°C	65
	Temperatura de Entrada após Perturbação	°C	25
	Vazão Volumétrica	m³/h	88,69
Fria	Temperatura de Entrada	°C	20
	Vazão Volumétrica	m³/h	127,34

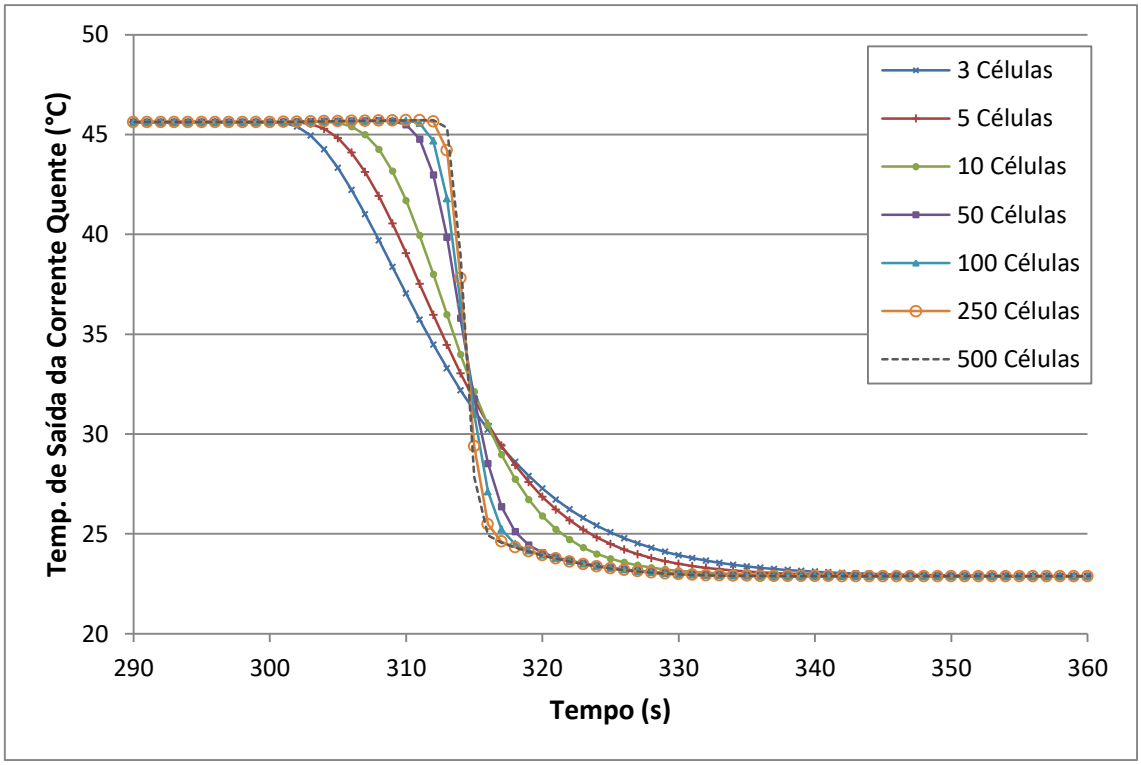

Figura 4.19 – Resultados dinâmicos da temperatura de saída da corrente quente para o modelo $\Delta \boldsymbol{T_{ML}}$.

Ambos os modelos (média logarítmica da temperatura e diferença de temperatura constante) apresentaram resultados dinâmicos visualmente equivalentes, sendo possível notar que os resultados em estado estacionário apresentaram variações significativas para o modelo ΔT_{cte}, como já discutido na Seção 4.1.1.

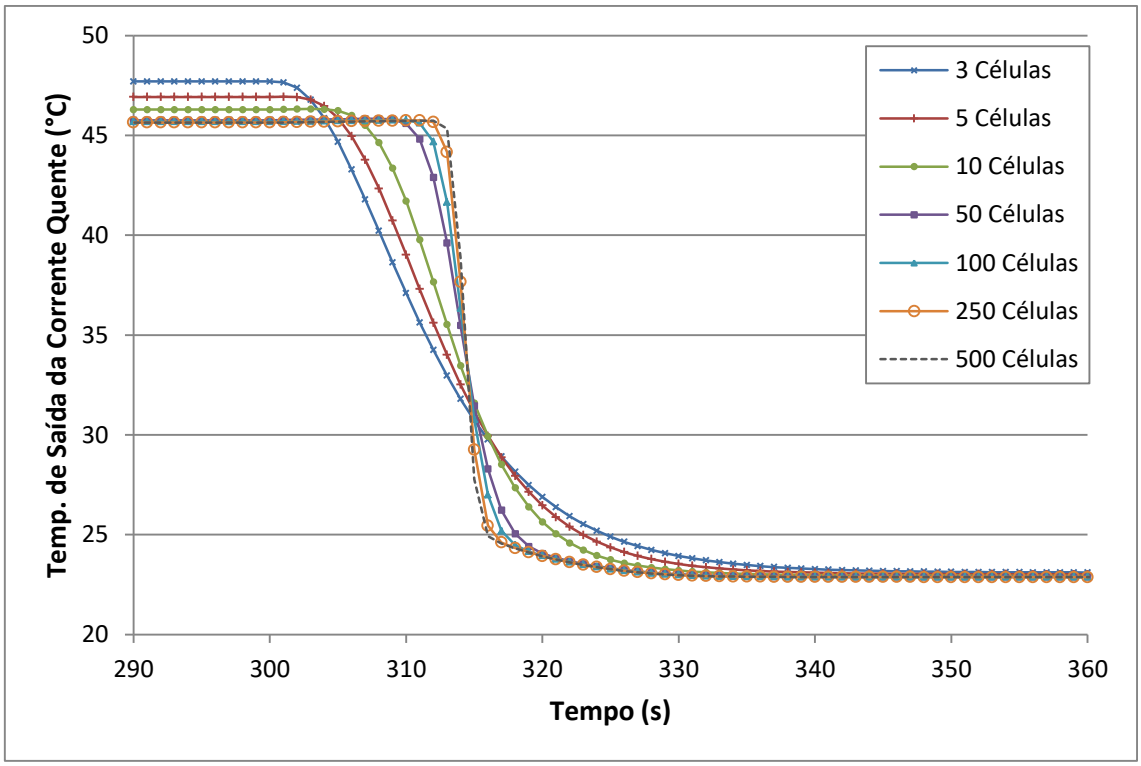

Figura 4.20 – Resultados dinâmicos da temperatura de saída da corrente quente para o modelo $\Delta \boldsymbol{T}_{cte}$.

Observou-se que com o aumento no número de células do modelo as respostas dinâmicas demoraram mais para serem percebidas na temperatura de saída da corrente quente e, ao mesmo tempo, se aproximaram mais rapidamente da temperatura final a partir do momento em que a mudança de temperatura se iniciou. Conclui-se que modelos com menos células apresentam respostas com início mais rápido e variações de temperatura mais suaves, enquanto os modelos com mais células apresentam maior atraso para início da resposta e variações de temperatura mais rápidas.

Os resultados dinâmicos não foram validados com dados experimentais, uma vez que a avaliação dos métodos de detecção de estados estacionários (objetivo deste estudo) não será influenciada por modelos que melhor representem a dinâmica do trocador de calor simulado. No entanto, julga-se importante enfatizar nesta seção a necessidade de validação dos resultados simulados em estudos que busquem a correta representação dinâmica de trocadores de calor, sendo possível perceber grandes diferenças nos resultados obtidos por modelos com diferentes números de células.

Apesar de modelos com mais células representarem melhor os resultados transientes de trocadores de calor, como descrito por VERBANOV et al. (2010), optou-se por usar o modelo de três células. Como os modelos dinâmicos de três células

apresentaram variações de temperatura mais suaves entre os estados estacionários, conclui-se que para uma melhor avaliação dos métodos de detecção de estado estacionário os resultados obtidos com apenas três células são preferíveis aos resultados obtidos com mais células, já que representam um maior desafio para a detecção de estados estacionários nas regiões com pequenas variações das variáveis avaliadas. Ainda, torna-se mais difícil identificar se a variação observada é causada por erros aleatórios ou por um real decréscimo no valor da variável.

4.1.3 Avaliação do Tempo de Simulação

Foram comparados os tempos computacionais de simulação dos modelos dinâmicos de trocador de calor, variando o número de células. Como descrito na Seção 3.1.3, foi utilizado o *software* MATLAB (versão R2016a) em um computador pessoal com processador Intel(R) Core(TM) i5-6200U @ 2.3GHz 2.4GHz. Os resultados de tempo computacional para o modelo com diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) e para o modelo com diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}) são apresentados na Tabela 4.18 e na Figura 4.21. A razão do tempo computacional utilizado pelos dois diferentes modelos (ΔT_{ML} / ΔT_{cte}) é apresentada na Tabela 4.18 e na Figura 4.22.

Tabela 4.18 – Resultados da avaliação de tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor.

Células	Tempo Computacional (s)		Razão Modelos ΔT_{ML} / ΔT_{cte}
	Modelo ΔT_{ML}	Modelo ΔT_{cte}	
3	1,61	1,50	1,08
5	2,21	1,99	1,11
10	4,11	3,40	1,21
50	30,58	18,02	1,70
100	90,00	38,03	2,37
250	426,83	104,27	4,09
500	1708,36	277,24	6,16

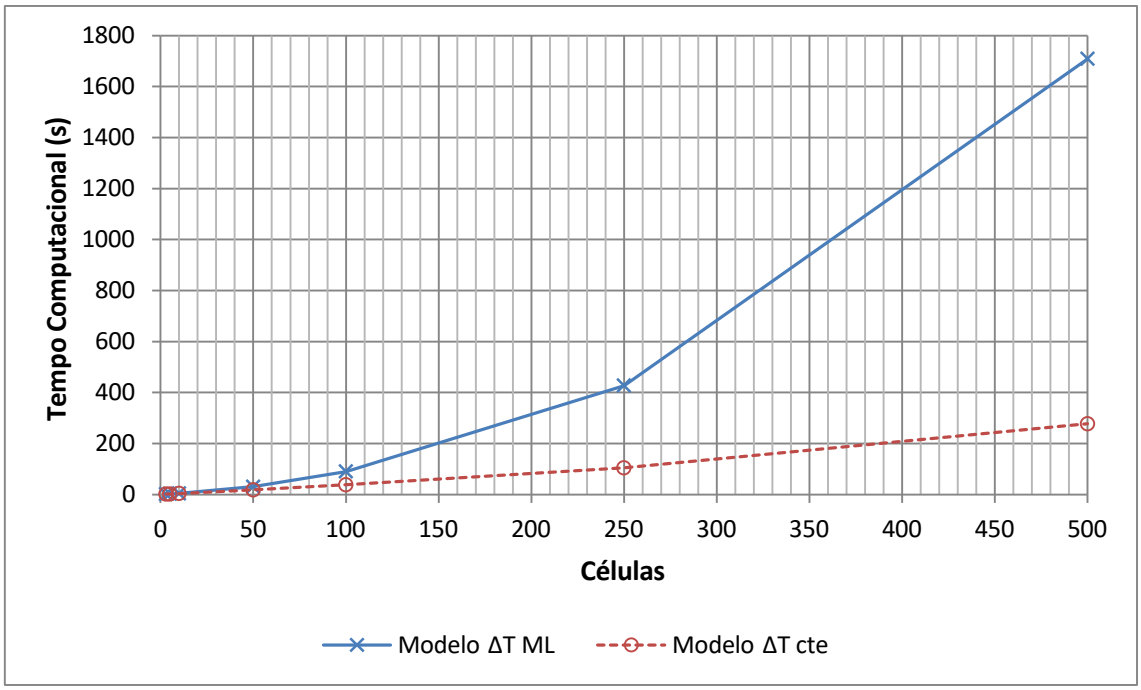

Figura 4.21 – Gráfico do tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor.

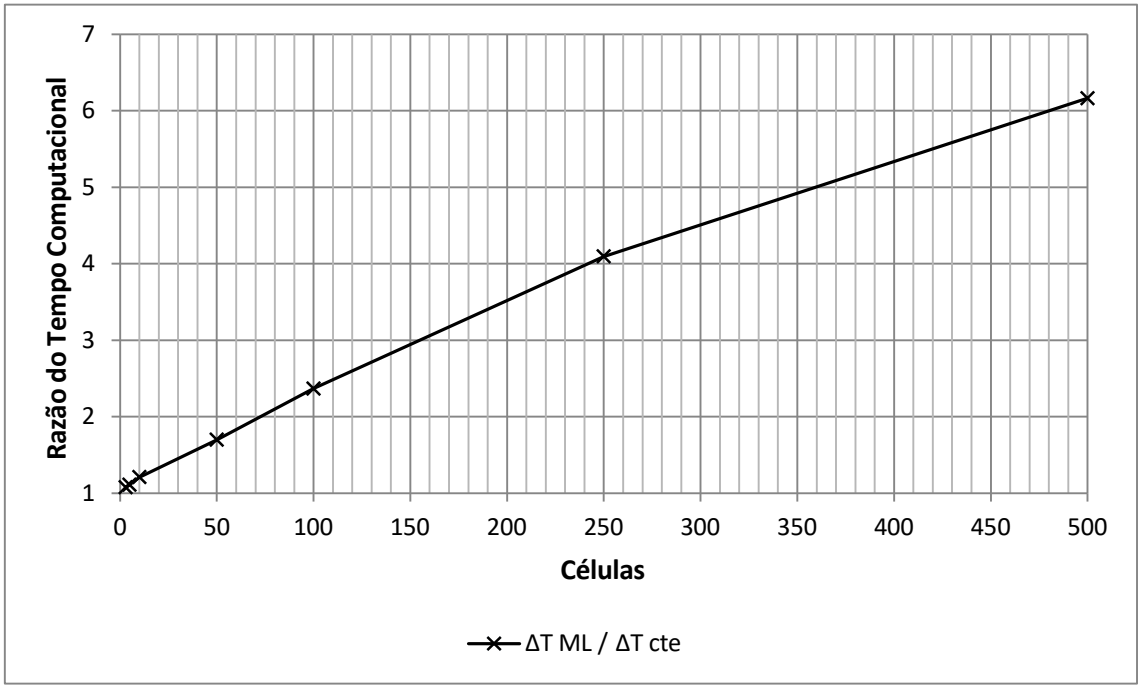

Figura 4.22 – Gráfico da razão do tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor.

Pode ser percebido que o tempo computacional requerido pelo modelo com ΔT_{ML} foi maior que o tempo computacional requerido pelo modelo com ΔT_{cte},

independente do número de células. Com o aumento no número de células é possível notar que o modelo que considera a temperatura média logarítmica apresenta crescimento mais acentuado do tempo computacional, quando comparado ao modelo com temperatura constante. Essa afirmação pode ser também comprovada pela razão entre os tempos computacionais (ΔT_{ML} / ΔT_{cte}), que aumenta com o aumento de células. Se o aumento do tempo computacional fosse equivalente entre os dois modelos, seria obtida uma razão constante igual a 1.

O considerável custo computacional do modelo que calcula a temperatura média logarítmica, como apresentado na Seção 3.1.2, se deve tanto ao maior número de operações no cálculo do ΔT_{ML} quanto à utilização de aproximações matemáticas em casos em que o cálculo da média logarítmica apresenta indeterminações ou dificuldades. Em casos em que o número de células necessárias é elevado, a utilização do modelo com ΔT_{cte} pode vir a ser vantajosa, mesmo requerendo um número maior de células para alcançar a mesma acurácia nos resultados, já que o tempo computacional pode ser menor.

4.1.4 Definição do Modelo a ser Utilizado

Foram comparados os resultados obtidos nas avaliações dos modelos dinâmicos de trocador de calor, levando em consideração: (a) erro percentual das temperaturas de saída quando em estado estacionário; (b) o fechamento do balanço de energia quando em estado estacionário; (c) a suavidade da resposta dinâmica para uma perturbação do tipo degrau e; (d) o tempo computacional necessário. Para facilitar a comparação, os principais resultados apresentados anteriormente foram classificados qualitativamente com valores de 1 a 7, onde 1 é melhor e 7 é pior, e apresentados na Tabela 4.19.

Optou-se por utilizar o modelo que considera a média logarítmica da temperatura das correntes quente e fria, com três células. Apesar de modelos com mais células representarem melhor os resultados transientes, os resultados obtidos com apenas três células são preferíveis aos resultados obtidos com mais células, já que representam um maior desafio para a detecção de estados estacionários (como discutido na Seção 4.1.2).

Tabela 4.19 – Resultados da avaliação de tempo computacional dos modelos dinâmicos de trocador de calor.

Modelo	Avaliação	Comentários	Células						
			3	5	10	50	100	250	500
ΔT_{ML}	Erro % das temperaturas de saída em estado estacionário	Erro igual a 0% para todos os casos	1	1	1	1	1	1	1
	Fechamento do balanço de energia em estado estacionário	Erros desprezíveis para todos os casos	1	1	1	1	1	1	1
	Suavidade da Resposta Dinâmica	Mais suave é melhor, como discutido no item 4.1.2	1	2	3	4	5	6	7
	Tempo computacional	Menor é melhor	1	2	3	4	5	6	7
ΔT_{cte}	Erro % das temperaturas de saída em estado estacionário		7	6	5	4	3	2	1
	Fechamento do balanço de energia em estado estacionário	Erros desprezíveis para todos os casos	1	1	1	1	1	1	1
	Suavidade da Resposta Dinâmica	Mais suave é melhor, como discutido no item 4.1.2	1	2	3	4	5	6	7
	Tempo computacional	Menor é melhor	1	2	3	4	5	6	7

4.2 Resultados Dinâmicos do Trocador de Calor

Foi simulada a dinâmica do trocador de calor apresentado na Seção 3.2.1, considerando perturbações nas variáveis de entrada, como exposto na Seção 3.2.2, com o objetivo de gerar dados dinâmicos e estacionários para a aplicação das técnicas de detecção de estados estacionários.

Inicialmente, é apresentado o resultado obtido para as variáveis de entrada e saída, sem considerar erros aleatórios nas medições. Na sequência são adicionados erros aleatórios em dois níveis distintos, para reproduzir os dados obtidos com instrumentos em plantas reais.

4.2.1 Resultados Sem Erros Aleatórios

Na Figura 4.23 são apresentadas as vazões volumétricas das correntes quente e fria para o tempo total de simulação, de 0 a 6060 segundos, sem erros aleatórios. As temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria, também para o tempo total de simulação e sem erros aleatórios, são apresentadas na Figura 4.24.

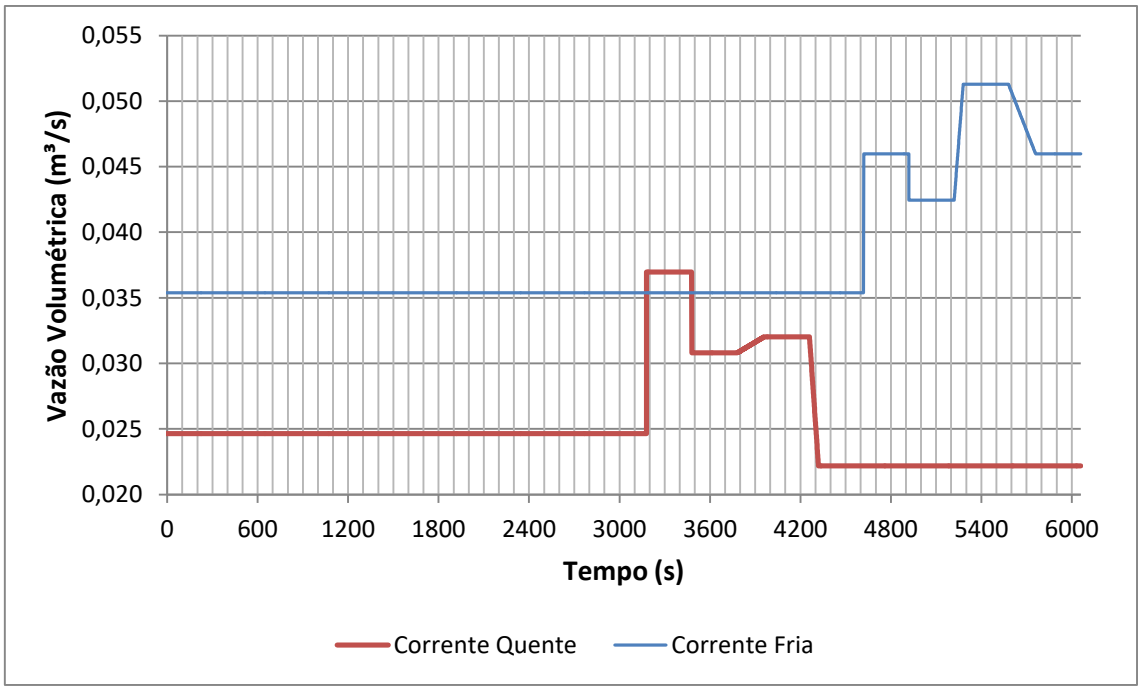

Figura 4.23 – Vazão volumétrica das correntes quente e fria para o tempo total de simulação.

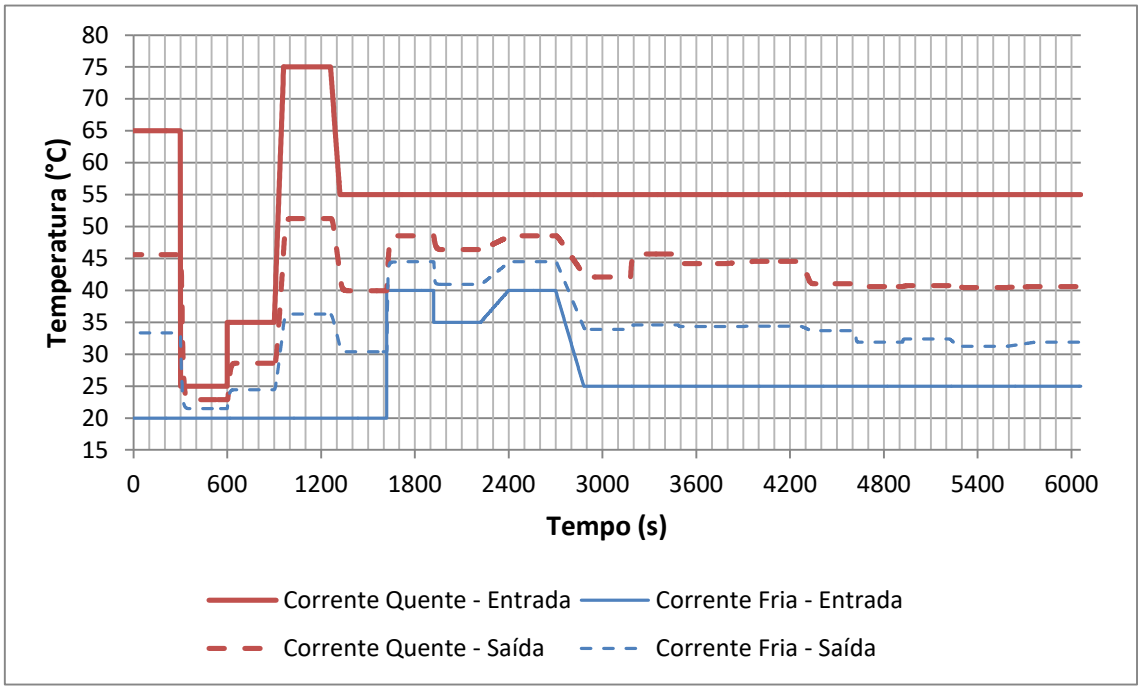

Figura 4.24 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria para o tempo total de simulação.

Para facilitar a visualização dos dados das temperaturas de entrada e saída sem erros aleatórios, são apresentados os resultados para os tempos 0 – 1560 s, 1560 –

3120 s, 3120 – 4560 s e 4560 – 6060 s, na Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27e Figura 4.28, respectivamente.

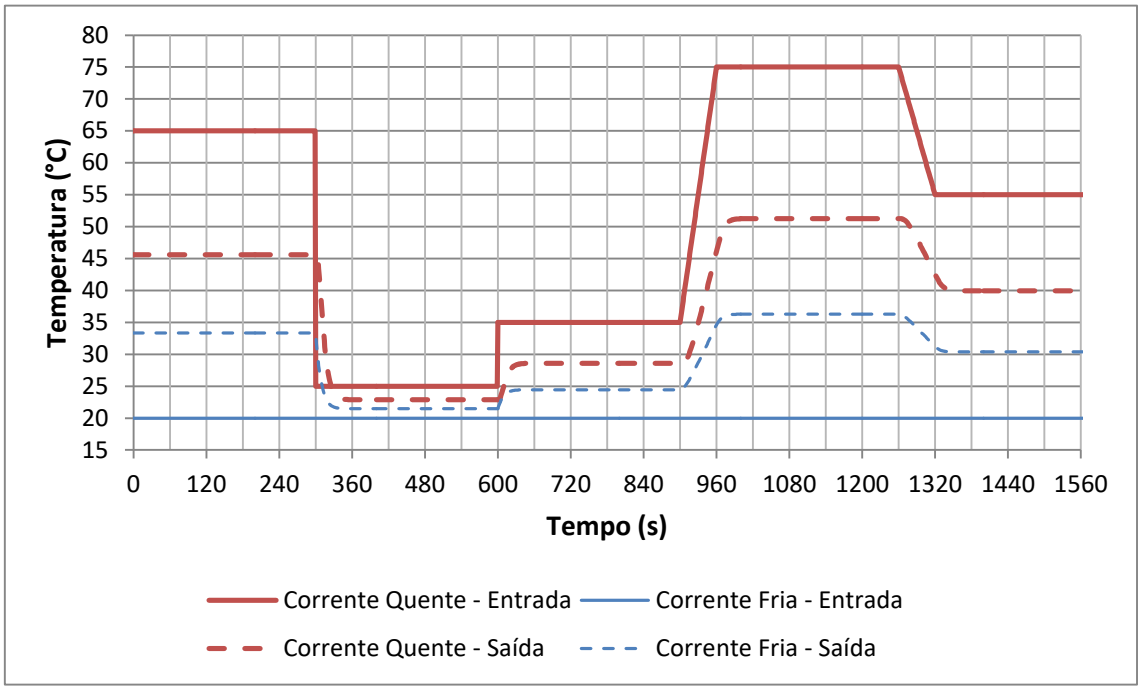

Figura 4.25 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 0 e 1560 segundos.

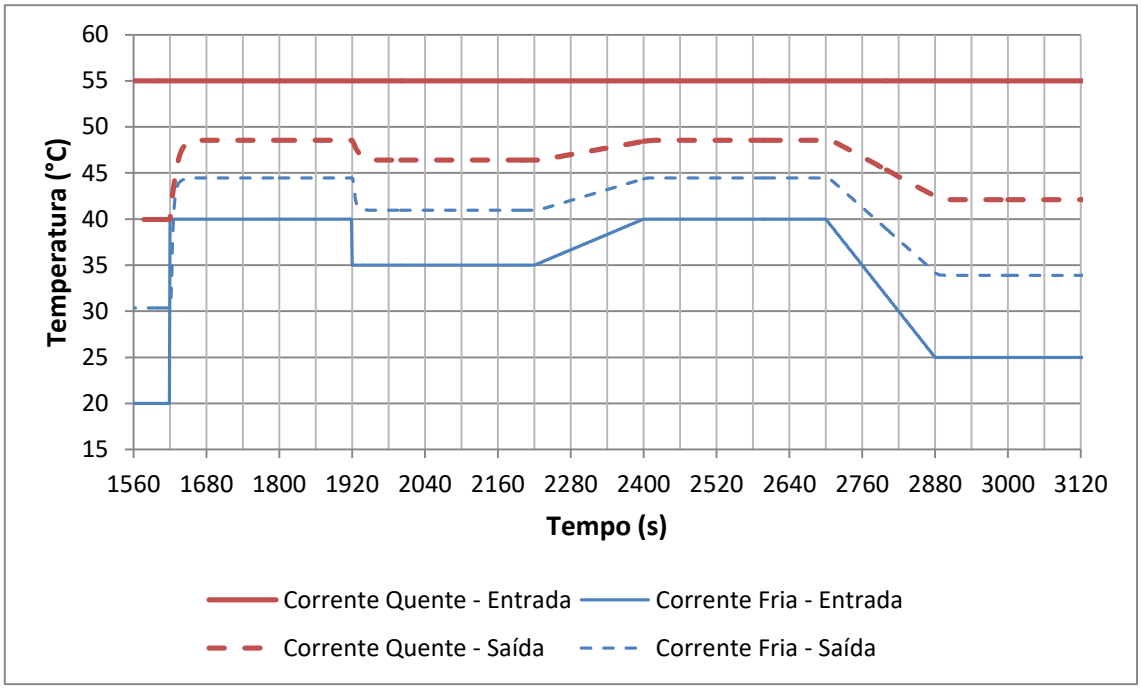

Figura 4.26 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 1560 e 3120 segundos.

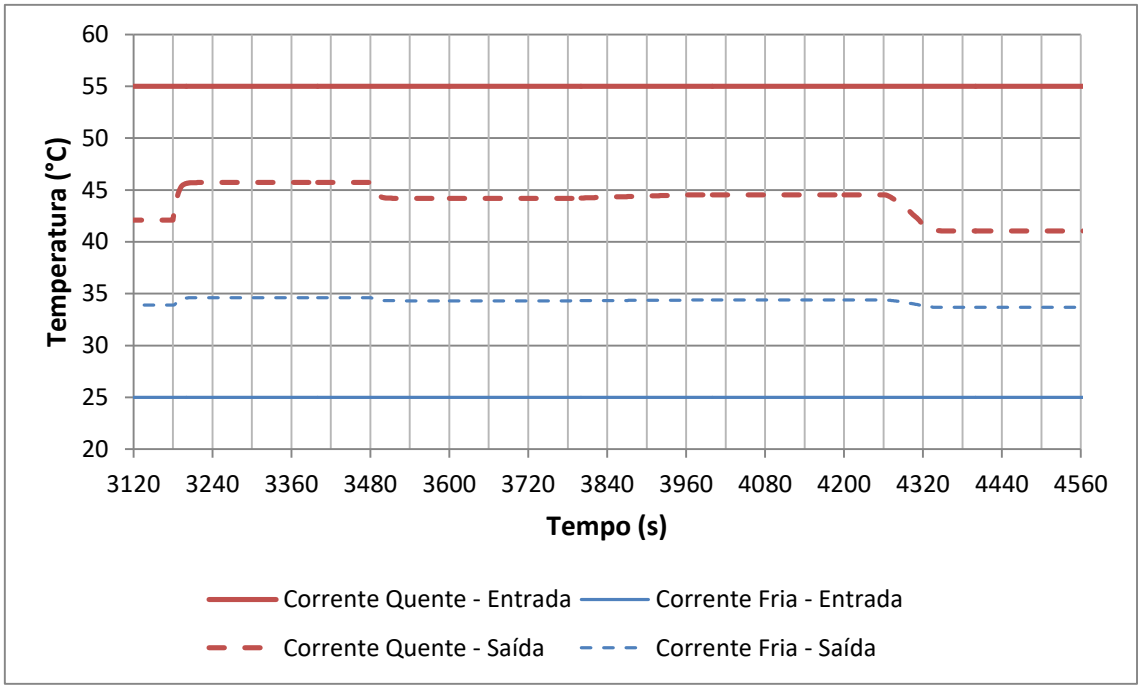

Figura 4.27 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 3120 e 4560 segundos.

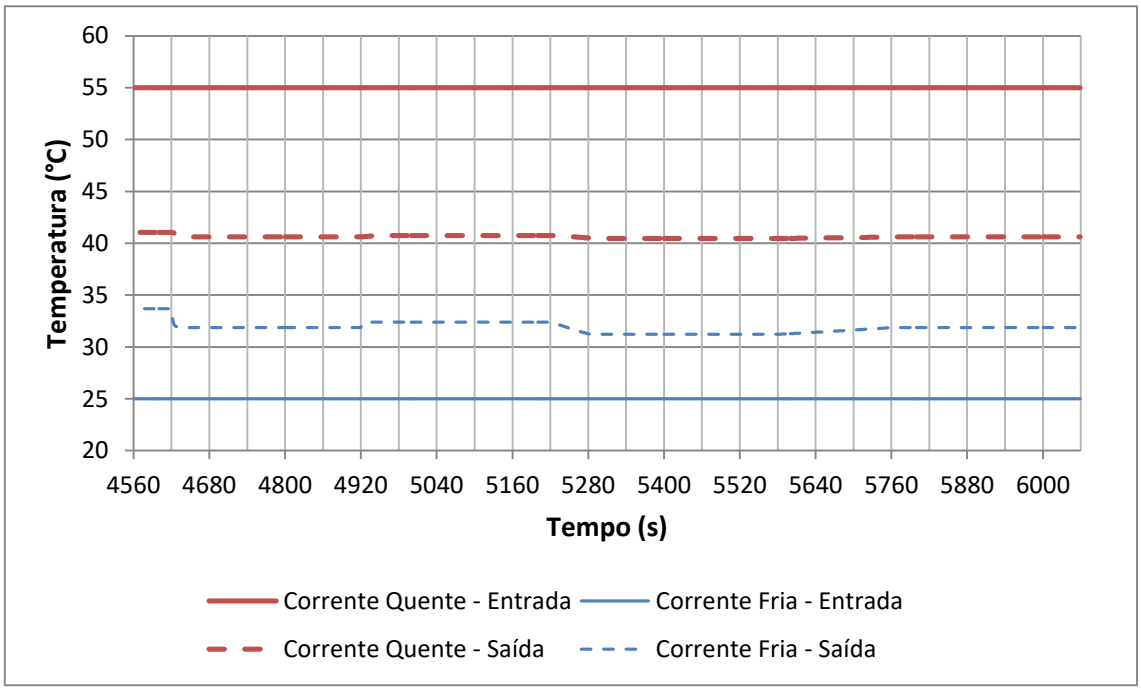

Figura 4.28 – Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria entre 4560 e 6060 segundos.

4.2.2 Resultados Com Erros Aleatórios

Como descrito na Seção 3.2.3, foram adicionados erros aleatórios, seguindo distribuição normal, às temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria, bem como à vazão volumétrica das duas correntes. Foram considerados 2 casos, um com erros menores (menor variância e desvio padrão) e outro com erros maiores (maior variância e desvio padrão), que serão chamados de erros "regulares" e erros "acentuados", respectivamente.

Na Figura 4.29 são apresentadas as temperaturas de entrada das correntes quente e fria com erros regulares, enquanto na Figura 4.30 são apresentadas as temperaturas de entrada das correntes quente e fria com erros acentuados. As temperaturas de saída das correntes quente e fria são apresentadas com erros regulares e erros acentuados na Figura 4.31 e Figura 4.32, respectivamente. As vazões volumétricas das correntes quente e fria são apresentadas com erros regulares e erros acentuados na Figura 4.33 e Figura 4.34, respectivamente.

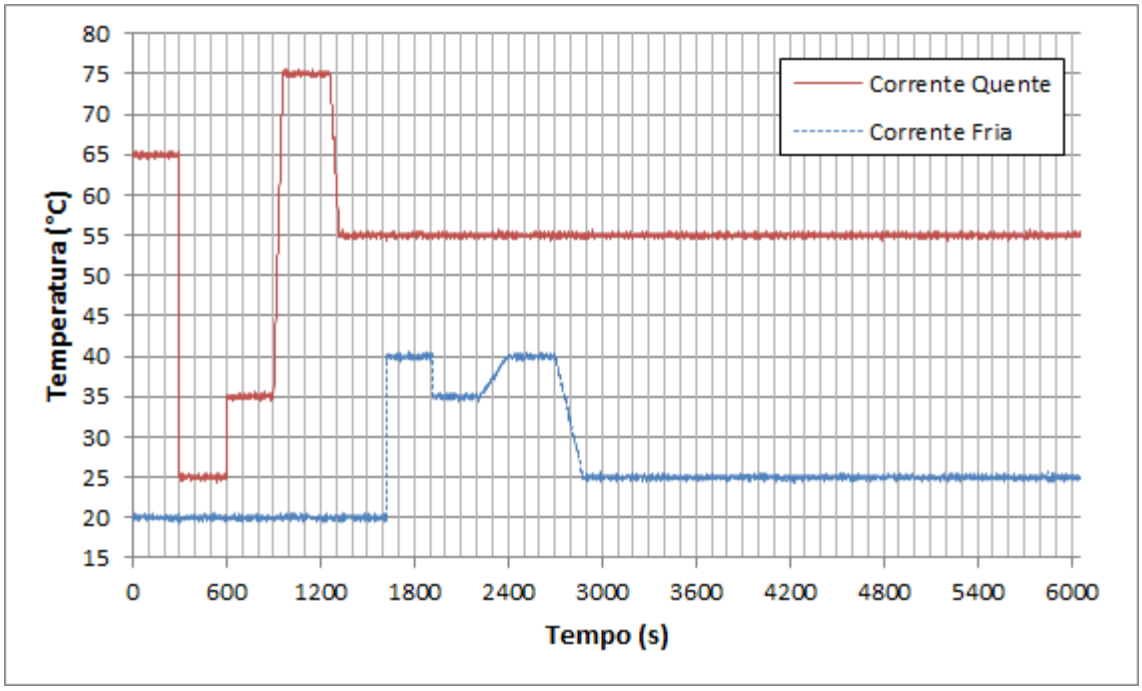

Figura 4.29 – Temperaturas de entrada das correntes quente e fria com erros regulares.

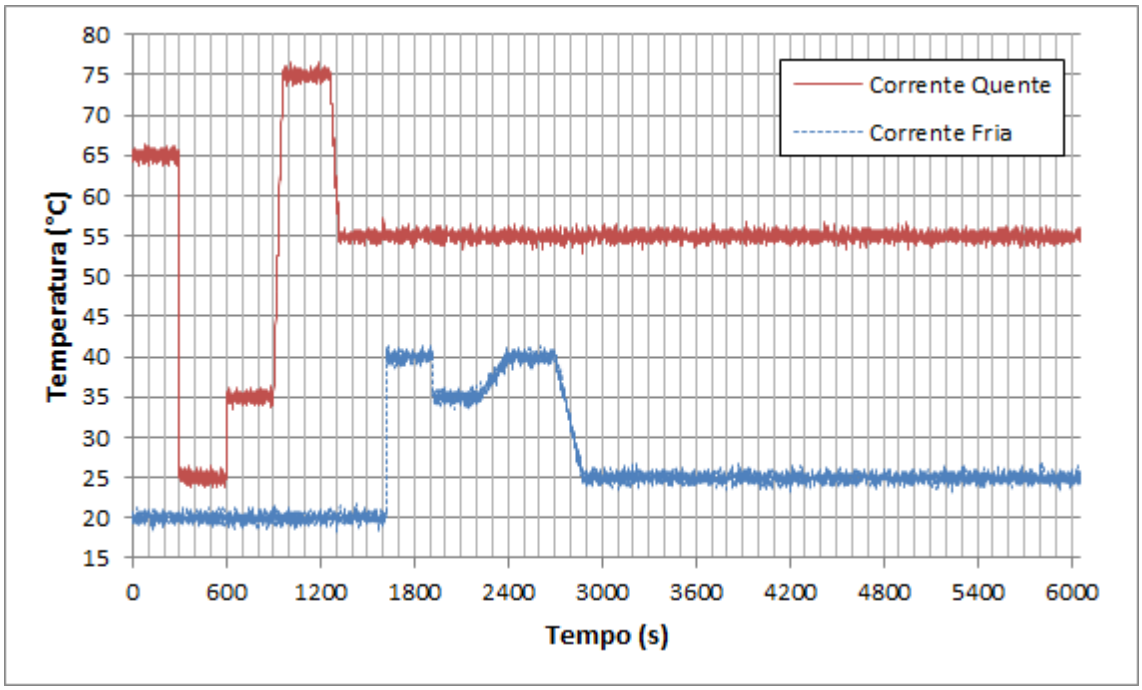

Figura 4.30 – Temperaturas de entrada das correntes quente e fria com erros acentuados.

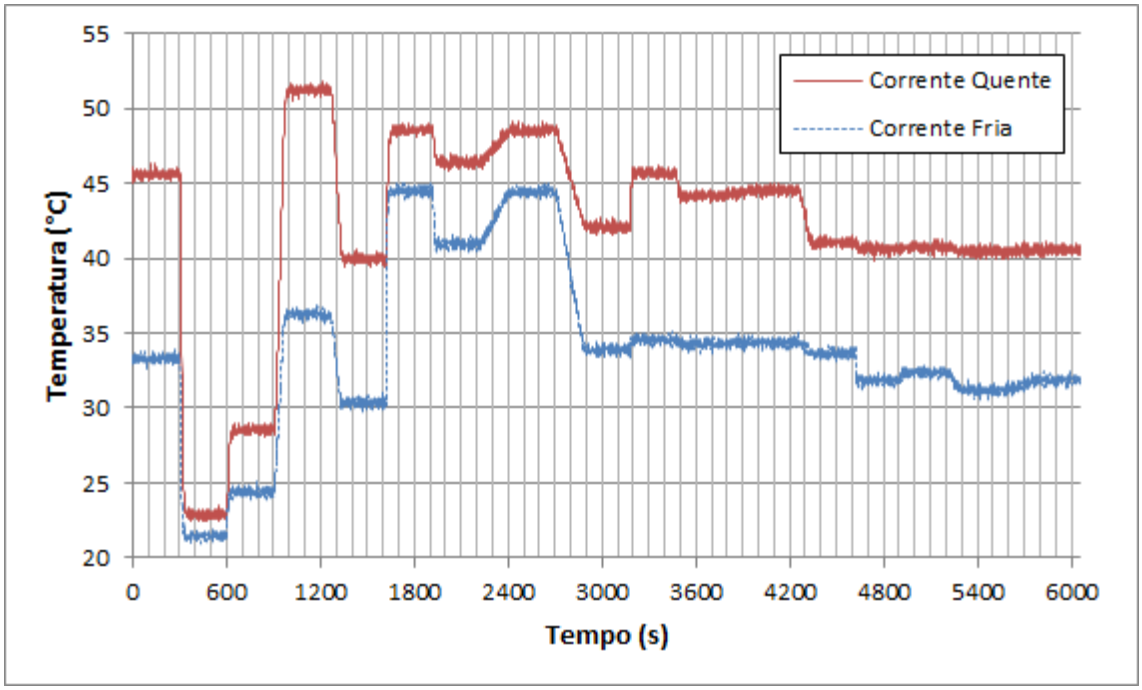

Figura 4.31 – Temperaturas de saída das correntes quente e fria com erros regulares.

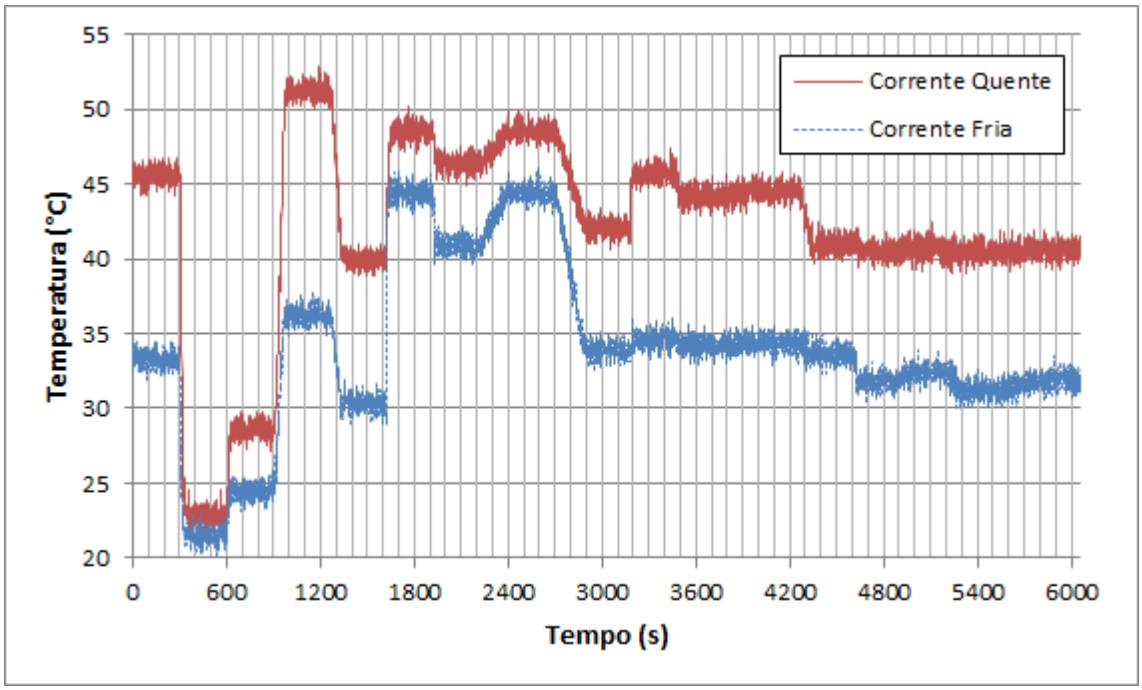

Figura 4.32 – Temperaturas de saída das correntes quente e fria com erros acentuados.

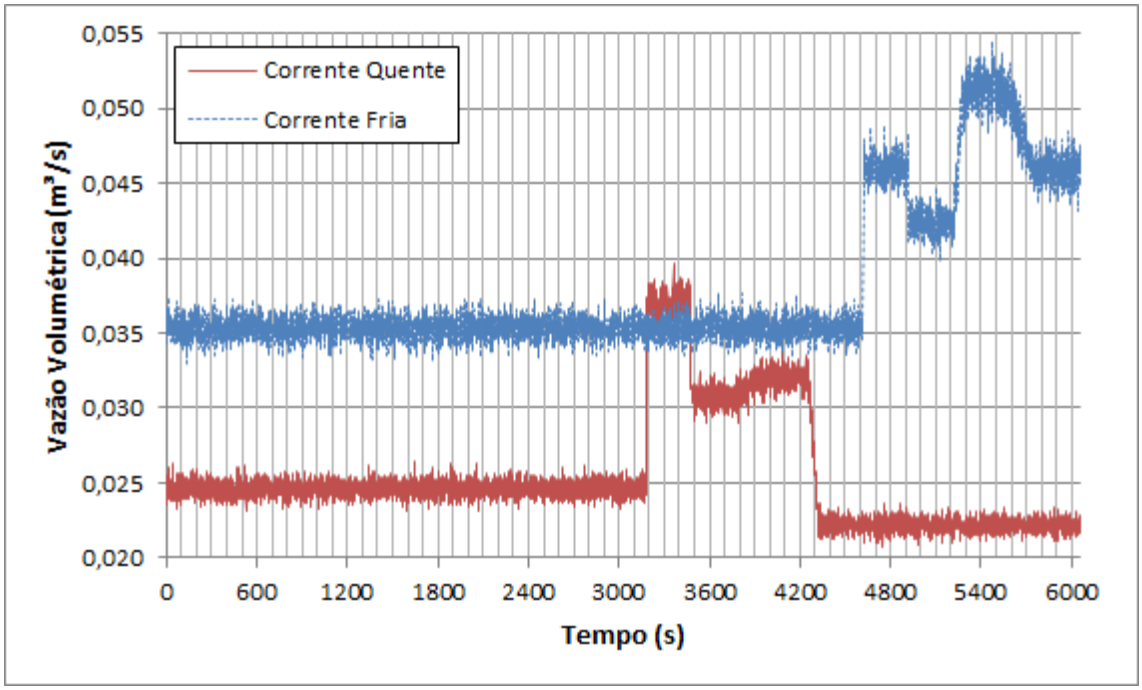

Figura 4.33 – Vazão volumétrica das correntes quente e fria com erros regulares.

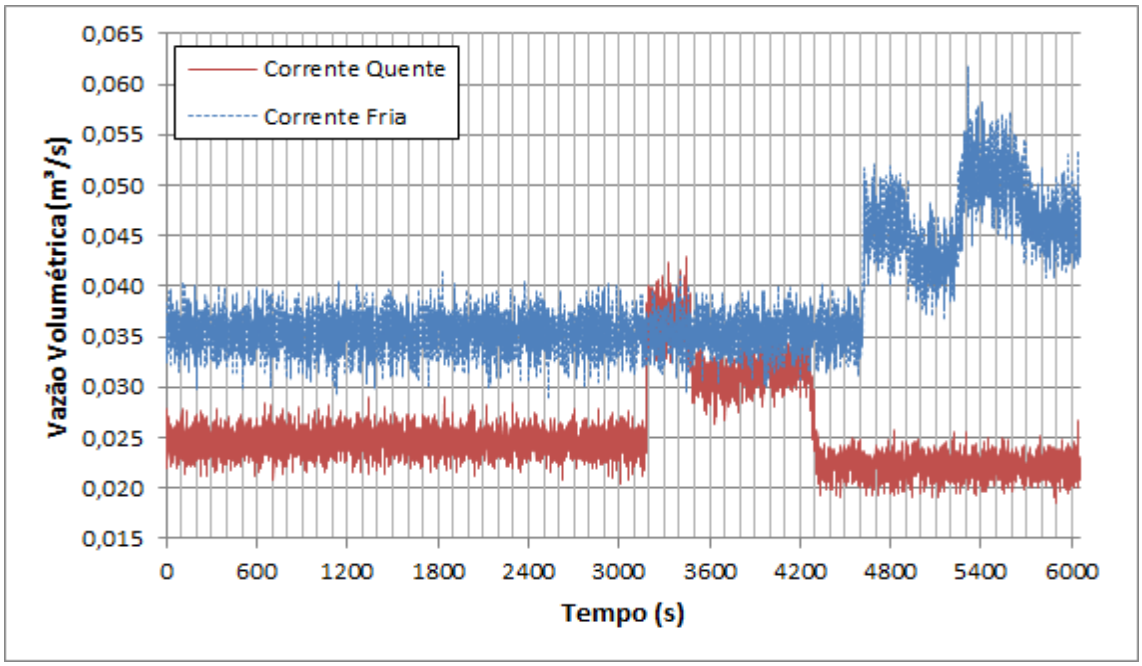

Figura 4.34 – Vazão volumétrica das correntes quente e fria com erros acentuados.

4.3 Aplicação de Janelas Móveis de Dados no Tempo

Como previamente exposto na Seção 3.3, foram aplicadas janelas móveis sobre os dados simulados com erros, apresentados na Seção 4.2.2. Com o objetivo de avaliar os algoritmos de detecção de estado estacionário propostos em diferentes situações, foi variada a frequência de amostragem dos dados de planta, o comprimento da janela móvel de dados, o tipo de média (dados apenas do passado/presente ou dados do passado/presente/futuro) e o nível de erro (regular ou acentuado).

A janela móvel de dados tida como base considera frequência de amostragem de 5 segundos, comprimento de 30 segundos, média com dados apenas do passado/presente e erros regulares. Todos os casos considerados foram apresentados na Tabela 3.6.

Analisou-se o efeito da aplicação das janelas móveis em três situações da simulação: (a) para uma perturbação do tipo degrau; (b) para uma perturbação do tipo rampa e; (c) para um estado estacionário. Os resultados são apresentados nas Seções 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4.

4.3.1 Variação da Frequência de Amostragem dos Dados

Para a avaliação das janelas móveis com variação da frequência de amostragem dos dados foram considerados os casos 1, 2 e 3, com 1, 5 e 15 segundos respectivamente, como é mostrado na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Casos para avaliação da frequência de amostragem das janelas móveis.

Caso	Frequência de Amostragem (s)	Comprimento da Janela (s)	Tipo de Média	Nível de Erro
1	1	30	Passado	Regular
2	5			
3	15			

Foram avaliados os resultados da temperatura de entrada da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.35), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.36) e no estado estacionário (Figura 4.37). Os dados gerados a partir do modelo dinâmico do trocador de calor, com erros aleatórios, são apresentados na curva "Erros Regulares".

Comparando os resultados para frequência de amostragem de 1s e 5s na Figura 4.35, é possível perceber que com uma frequência menor de amostragem (de 5 em 5 segundos), os resultados apresentaram maior variação no instante da perturbação (tempo de 300 segundos), uma vez que a média aritmética calculada pela janela móvel apresenta menos dados com valor igual ao anterior à perturbação. Isso mostra uma possível vantagem em ter menos pontos na janela, que é a percepção mais rápida de grandes variações na variável medida. Porém, como é possível perceber pelo resultado para frequência de amostragem de 15 em 15 segundos, também pode ocorrer uma percepção mais lenta da variável medida quando o momento real da perturbação ocorre muito tempo antes do próximo ponto amostrado.

Para uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.36) os resultados para diferentes frequências de amostragem não apresentaram grandes diferenças entre si, porém todos os casos apresentaram um comportamento de suavização e atraso quando comparados com o resultado correto da variável, como já era esperado.

Na Figura 4.37 fica evidente o principal benefício esperado pelo uso de janelas móveis de dados no tempo: uma melhor predição do valor correto da variável em estado estacionário, com uma menor variância, quando comparado ao resultado com erros aleatórios. Nos primeiros 100 segundos de simulação o resultado com erros regulares

chegou a apresentar um desvio de 0,6°C do resultado correto, enquanto os resultados para uma janela móvel com frequência de amostragem de 1s não apresentaram desvios maiores que 0,1°C. Ao utilizar menores frequências de amostragem (5s e 15s) foi observado um aumento no desvio e variância mas, ainda assim, os desvios não ultrapassaram 0,2°C.

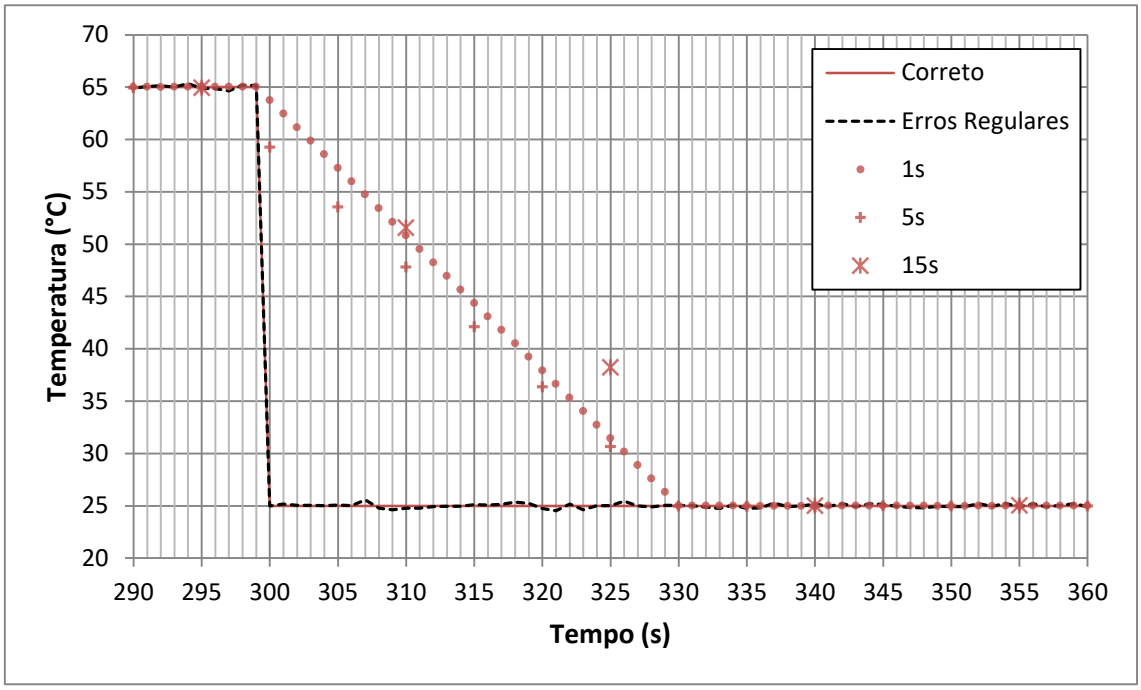

Figura 4.35 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação degrau na temperatura.

Foram avaliados os resultados da vazão volumétrica da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.38), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.39) e no estado estacionário (Figura 4.40).

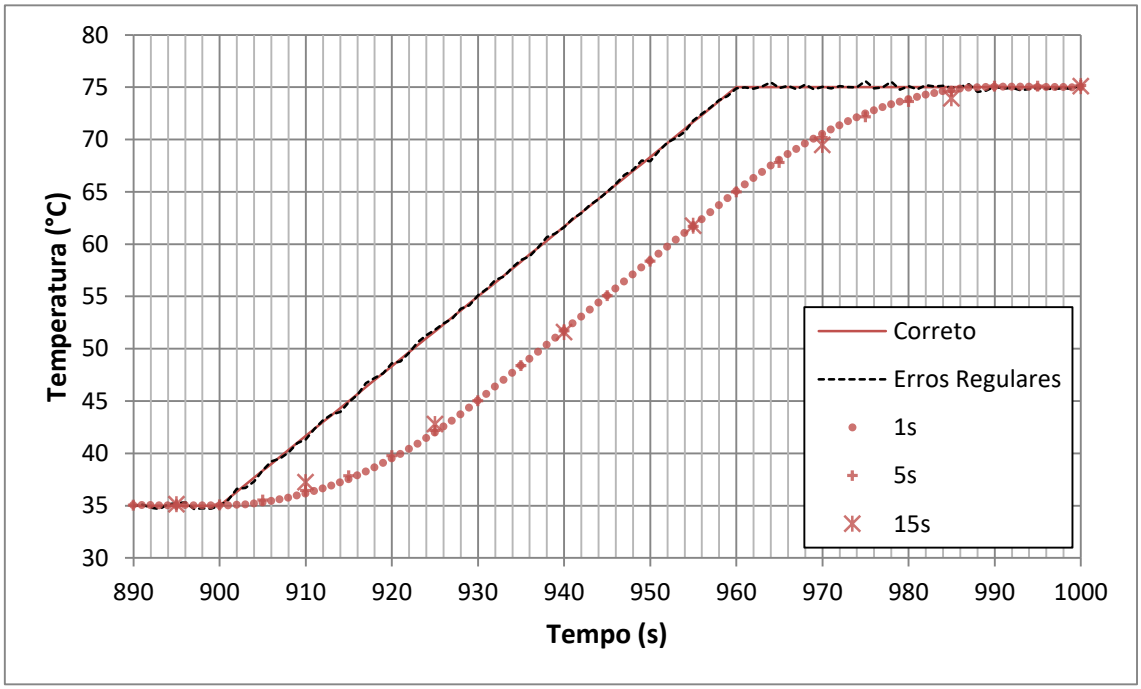

Figura 4.36 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação rampa na temperatura.

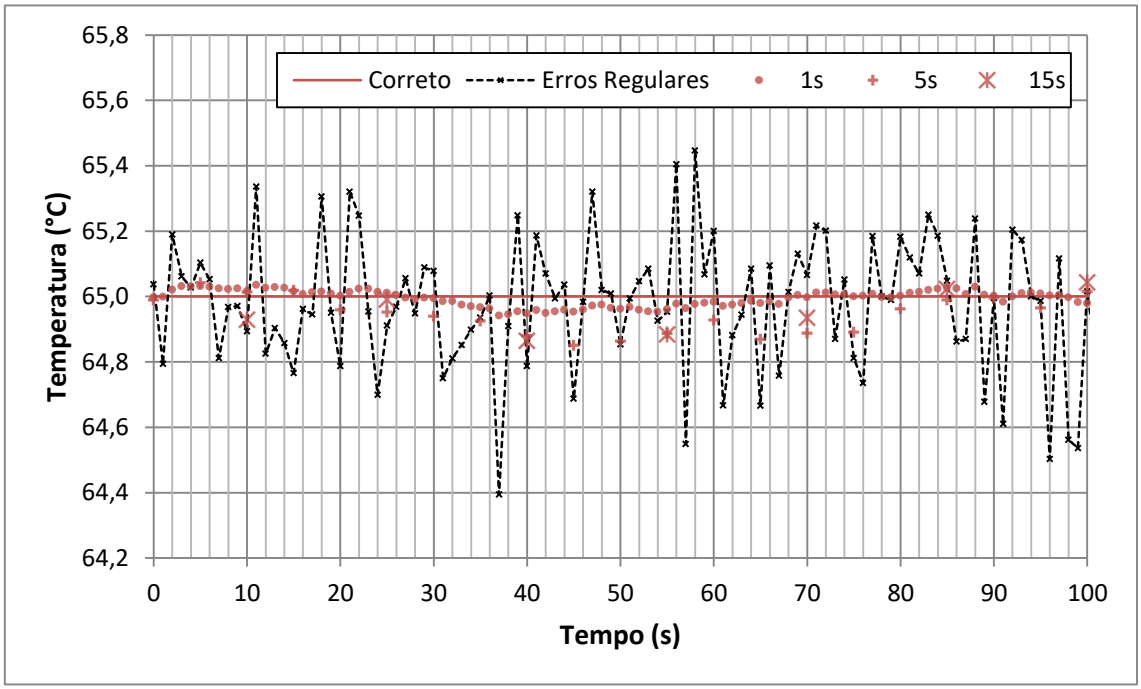

Figura 4.37 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para estado estacionário na temperatura.

Comparando os resultados para frequência de amostragem de 1s e 5s na Figura 4.38, é possível perceber que com uma frequência menor de amostragem (de 5 em 5 segundos), os resultados apresentaram maior variação no instante da perturbação (tempo de 3480 segundos), assim como foi observado para a temperatura de entrada da mesma corrente. O resultado para a frequência de amostragem de 15 em 15 segundos também seguiu o que foi observado para a temperatura de entrada, ocorrendo uma variação mais lenta da variável medida já que o momento real da perturbação ocorre muito tempo antes do próximo ponto amostrado.

Para uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.39) os resultados para diferentes frequências de amostragem apresentaram diferenças menores entre si, quando comparados com a perturbação tipo degrau. Porém, todos os casos apresentaram um comportamento de suavização e atraso quando comparados com o resultado correto da variável, como já era esperado.

Os resultados estacionários durante os primeiros 100 segundos de simulação podem ser vistos na Figura 4.40. É perceptível a melhor predição do valor correto da vazão volumétrica com janelas móveis, sendo que os valores com menores variâncias e menores desvios foram obtidos com amostragem de 1 em 1 segundo.

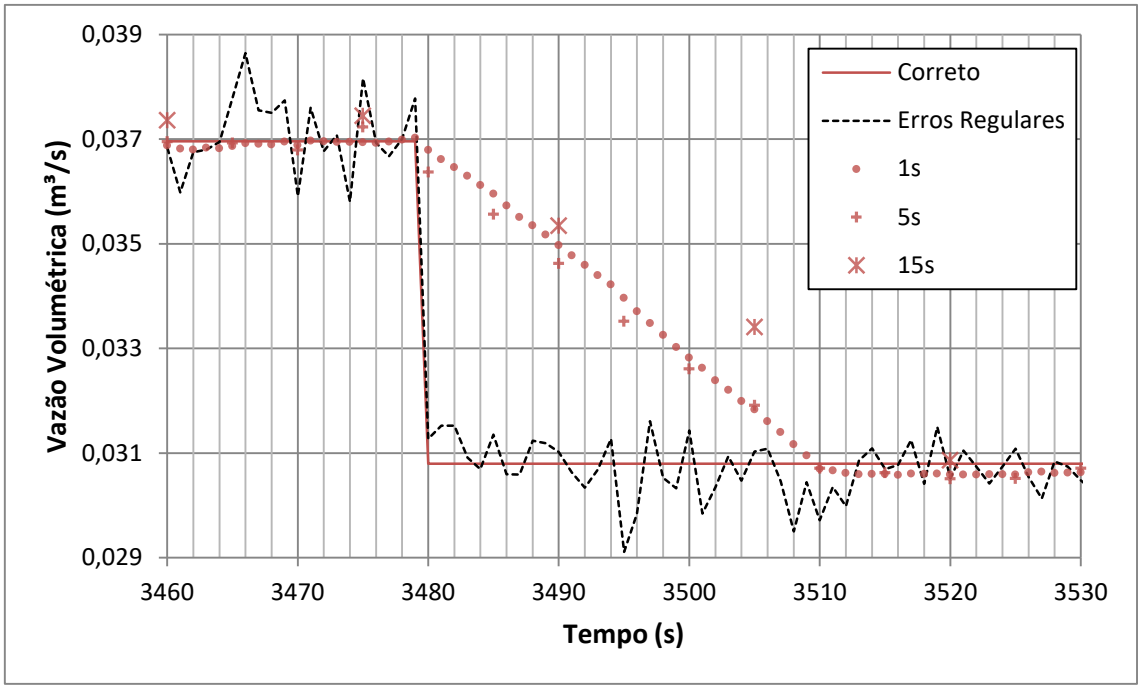

Figura 4.38 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação degrau na vazão.

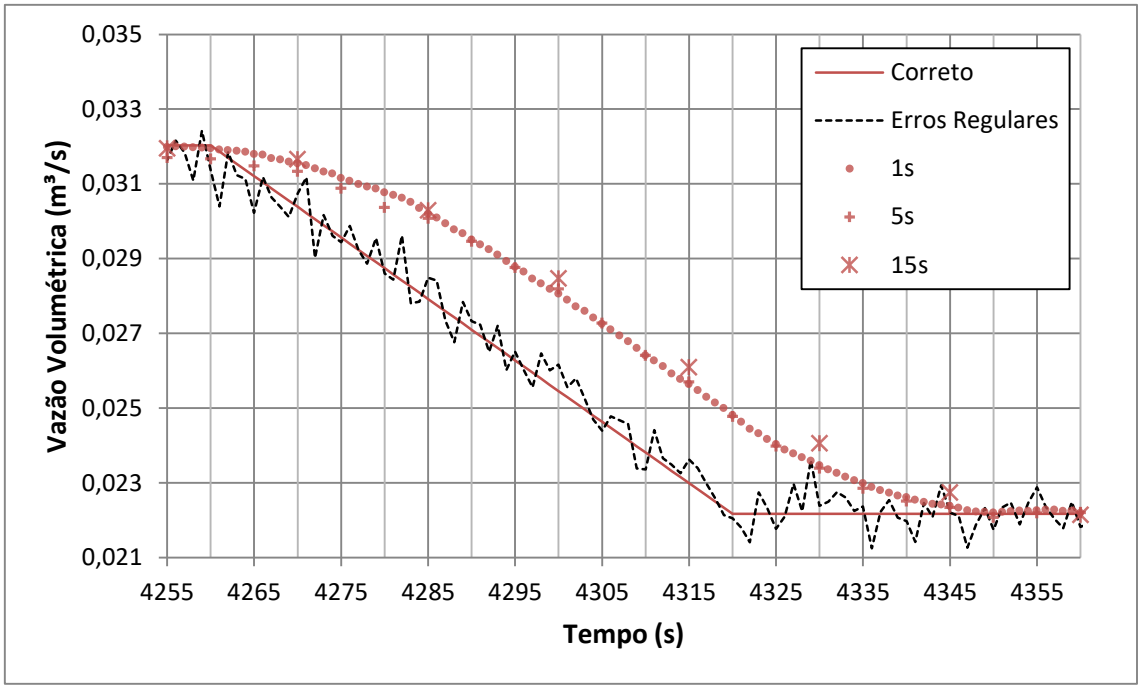

Figura 4.39 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para perturbação rampa na vazão.

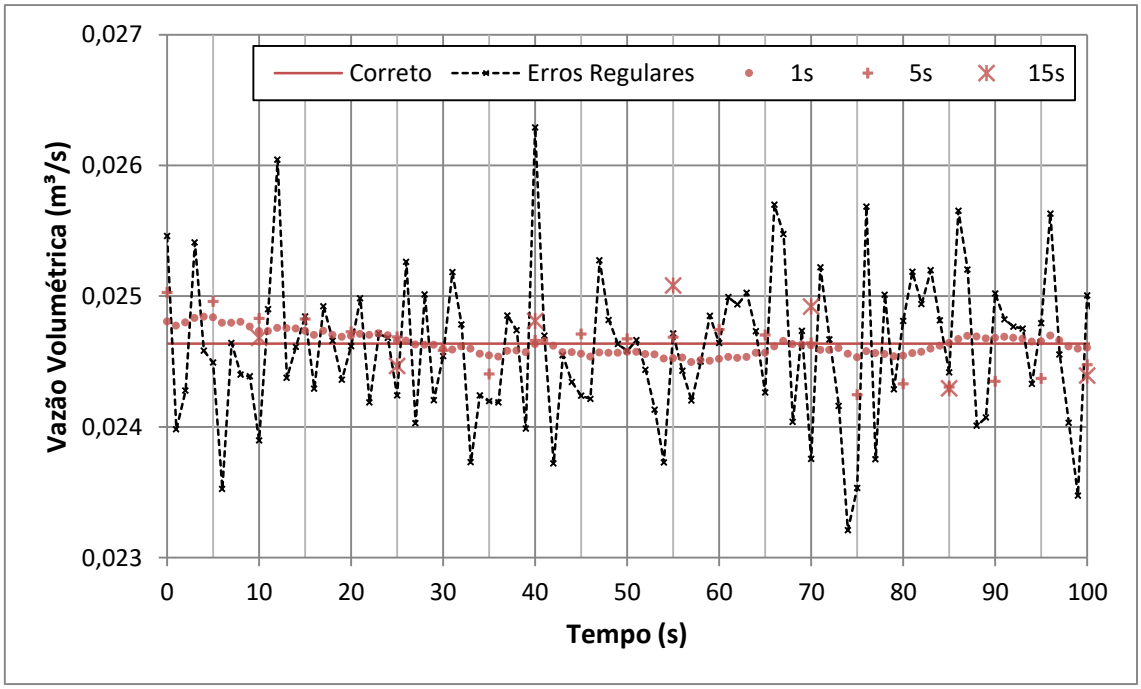

Figura 4.40 – Janelas móveis com diferentes frequências de amostragem para estado estacionário na vazão.

Conclui-se que quanto mais pontos são amostrados dentro da janela móvel de dados no tempo, melhor é a predição do valor correto em estado estacionário, com variâncias menores. Para as perturbações estudadas, as janelas de tempo apresentam uma suavização e atraso quando comparadas ao valor correto e ao valor com erro aleatório, podendo levar a interpretações erradas sobre a dinâmica existente entre dois estados estacionários.

4.3.2 Variação do Comprimento da Janela Móvel de Dados

Para a avaliação das janelas móveis com variação do comprimento da mesma foram considerados os casos 4, 2 e 5, com 10, 30 e 60 segundos respectivamente, como é mostrado na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Casos para avaliação do comprimento das janelas móveis.

Caso	Frequência de Amostragem (s)	Comprimento da Janela (s)	Tipo de Média	Nível de Erro
4	5	10	Passado	Regular
2		30		
5		60		

Foram avaliados os resultados da temperatura de entrada da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.41), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.42) e no estado estacionário (Figura 4.43).

Comparando os resultados da Figura 4.41, é possível perceber que para janelas móveis com comprimentos menores os valores calculados após uma perturbação tipo degrau variam mais rapidamente, atingindo antes o valor do novo estado estacionário. Isso é explicado pelo fato da janela móvel apresentar menos valores passados no cálculo da média aritmética, que define o valor atual da variável. O mesmo efeito foi observado para uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.42).

Na Figura 4.43, que avalia o efeito de diferentes comprimentos de janelas móveis na predição do valor correto da temperatura de entrada da corrente quente em estado estacionário, conclui-se que maiores comprimentos resultam em menores desvios do valor correto, bem como menor variância.

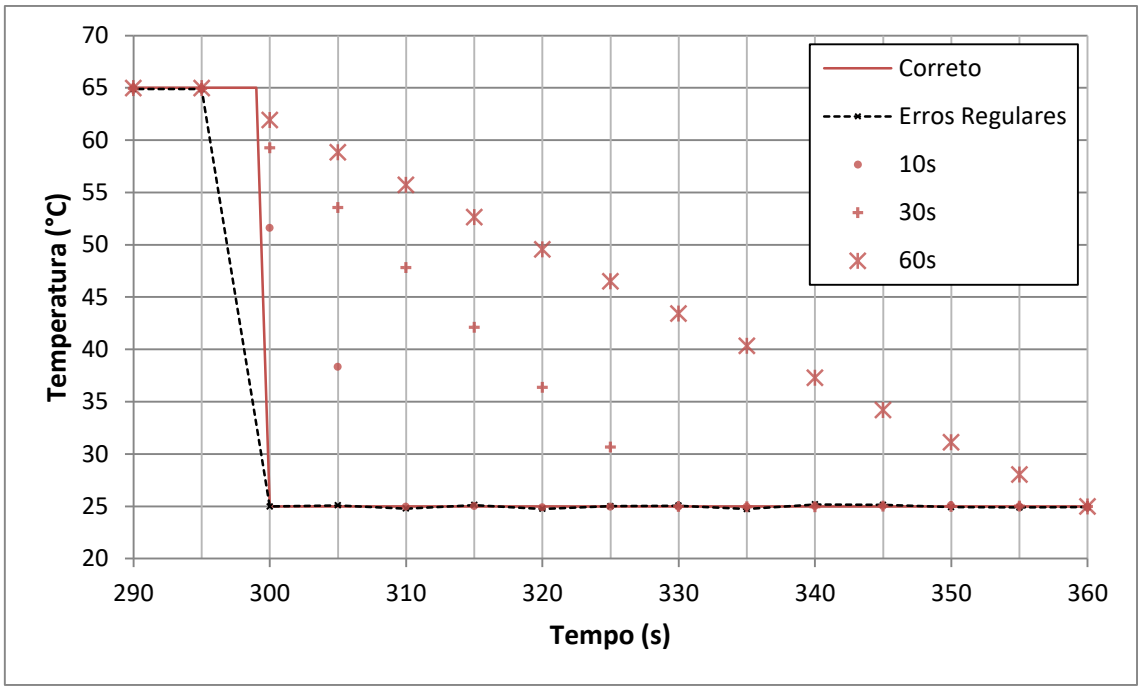

Figura 4.41 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação degrau na temperatura.

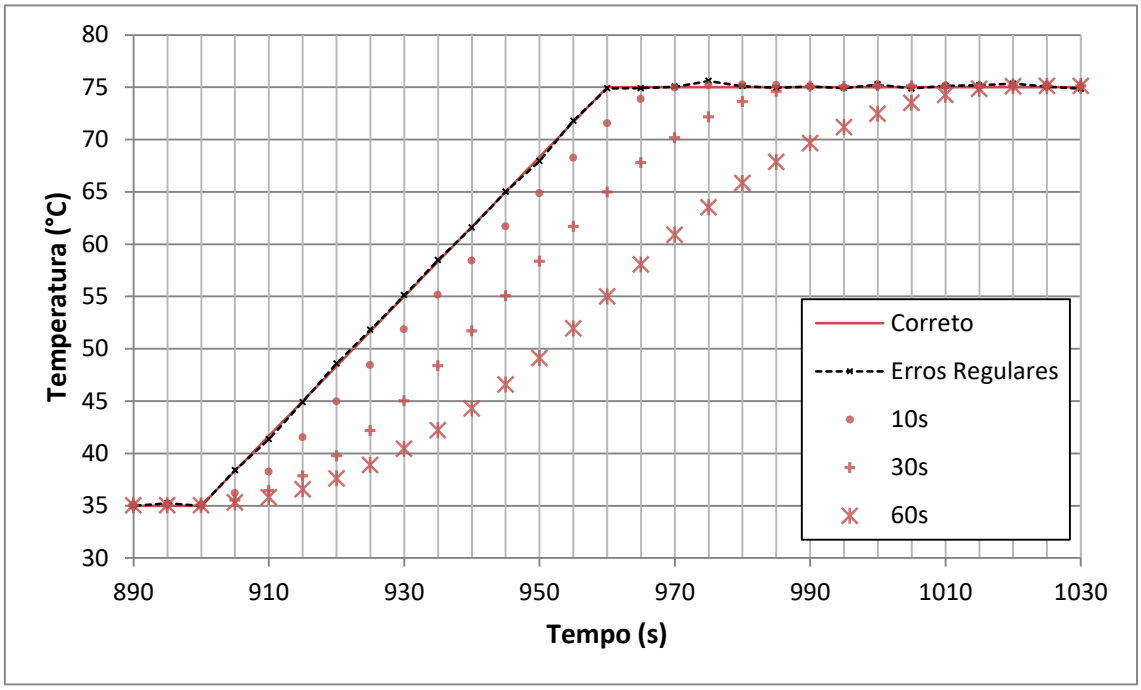

Figura 4.42 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação rampa na temperatura.

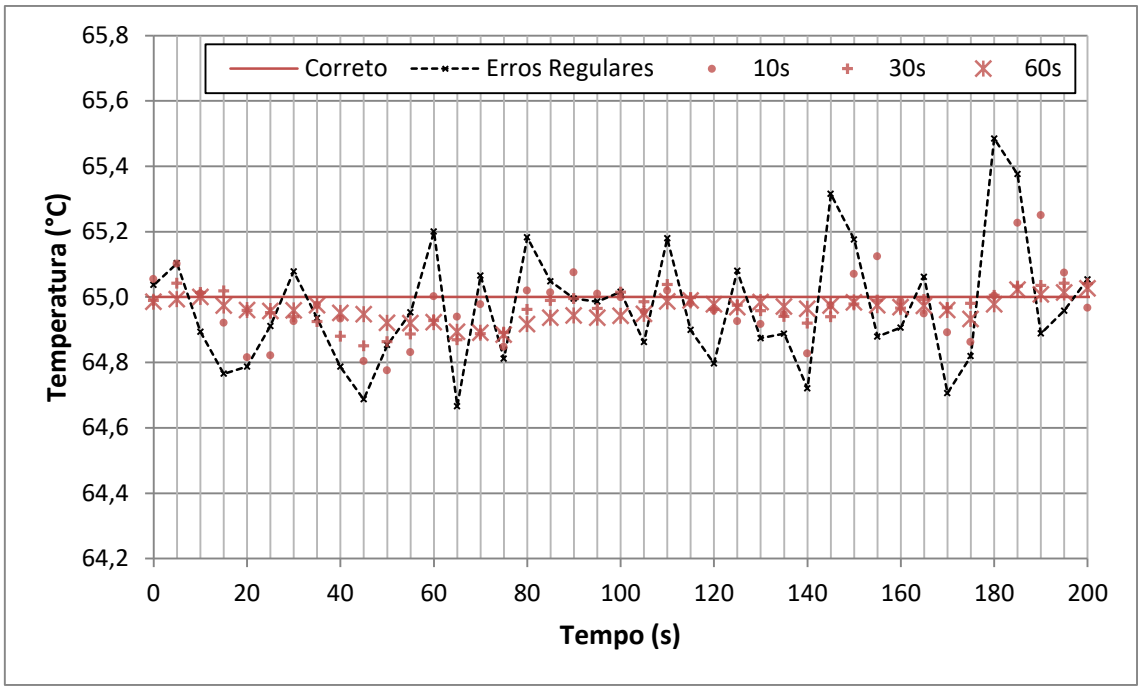

Figura 4.43 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para estado estacionário na temperatura.

Foram avaliados os resultados da vazão volumétrica da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.44), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.45) e no estado estacionário (Figura 4.46).

Assim como observado para a temperatura de entrada da corrente quente, comparando os resultados da Figura 4.44, é possível perceber que para janelas móveis com comprimentos menores os valores calculados após uma perturbação tipo degrau variam mais rapidamente, atingindo antes o valor do novo estado estacionário. O mesmo efeito foi observado para uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.45).

Na Figura 4.46, que avalia o efeito de diferentes comprimentos de janelas móveis na predição do valor correto da vazão da corrente quente em estado estacionário, conclui-se que maiores comprimentos resultam em menores desvios do valor correto, bem como menor variância.

Conclui-se que janelas móveis de dados no tempo com comprimentos menores apresentam maior variação do valor sendo estimado assim que ocorre uma perturbação. Por outro lado, apresentam pior predição da variável quando a mesma encontra-se em estado estacionário. A decisão sobre o tamanho a ser utilizado dependerá dos objetivos da janela móvel. No caso desta dissertação, onde tem-se como objetivo a detecção de estados estacionários por meio de uma metodologia de reconciliação de dados, o comprimento da janela pode ser reduzido quando se desejar menos erros na detecção de

comportamentos transientes, em detrimento de mais erros na detecção de estados estacionários. O comprimento pode ser aumentado quando se desejar menos erros na detecção dos estados estacionários, em detrimento de mais erros na detecção de transientes.

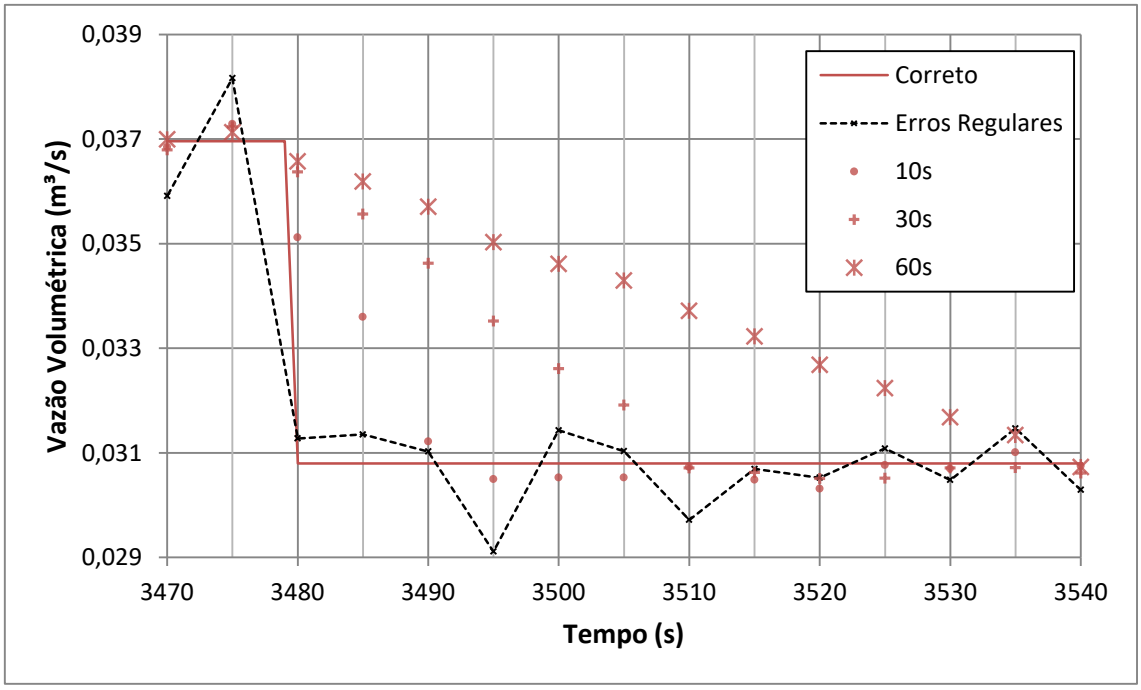

Figura 4.44 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação degrau na vazão.

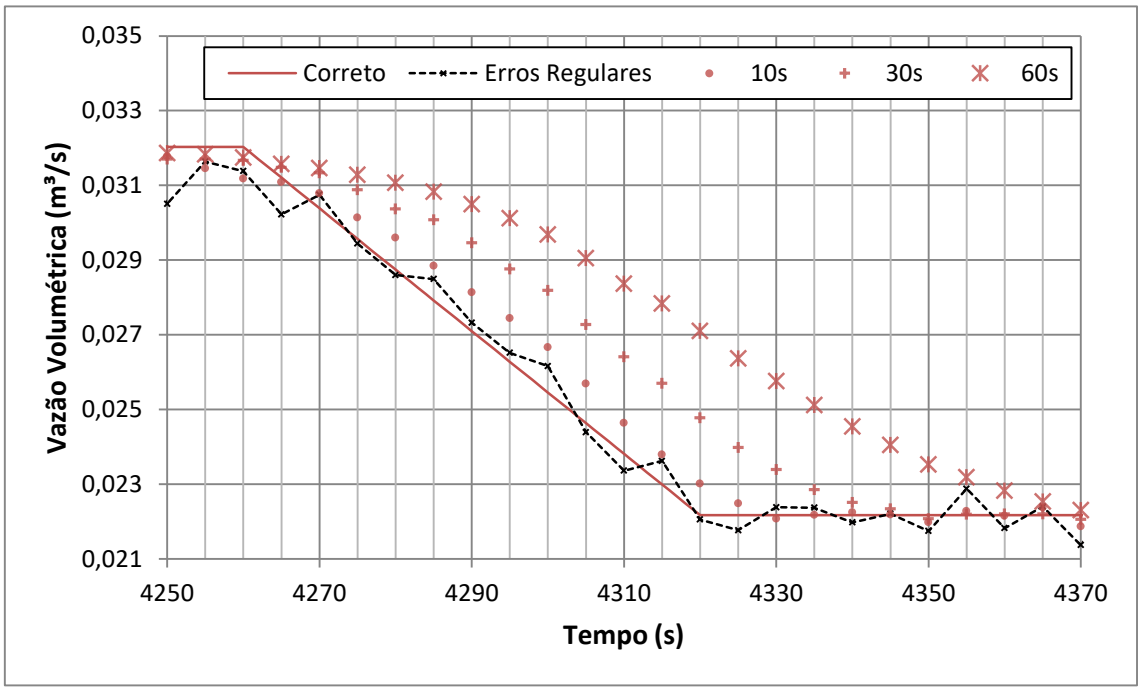

Figura 4.45 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para perturbação rampa na vazão.

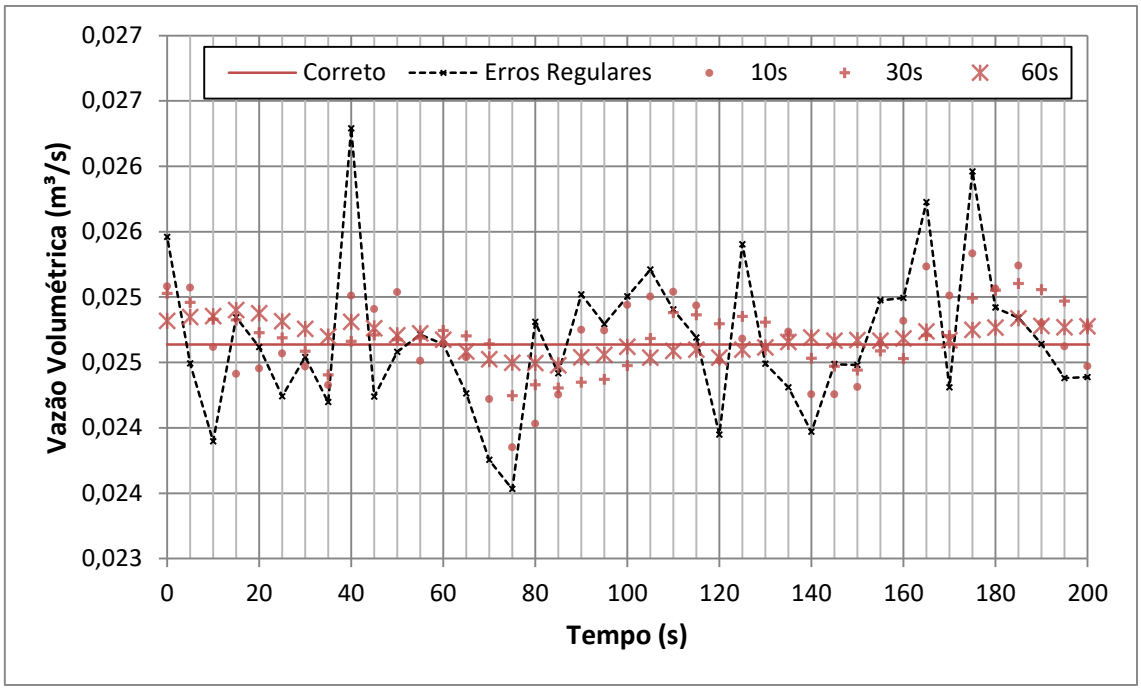

Figura 4.46 – Janelas móveis com diferentes comprimentos para estado estacionário na vazão.

4.3.3 *Comparação entre Janelas Móveis com Média do Tipo Passado e Média do Tipo Simétrica*

Para a avaliação das janelas móveis com variação do tipo de média foram considerados os casos 2 e 6, com médias do tipo "Passado" e "Simétrica" respectivamente, como é mostrado na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Casos para avaliação do tipo de média das janelas móveis.

Caso	Frequência de Amostragem (s)	Comprimento da Janela (s)	Tipo de Média	Nível de Erro
2	5	30	Passado	Regular
6			Simétrica	

Foram avaliados os resultados da temperatura de entrada da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.47), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.48) e no estado estacionário (Figura 4.49).

Comparando os resultados da Figura 4.47, é possível perceber que para janelas móveis com média do tipo "Passado" o valor da variável estimada só começa a variar após a ocorrência da perturbação, levando um tempo maior após a perturbação para atingir o novo estado estacionário. Já para janelas móveis com média do tipo

"Simétrica", os valores da variável estimada começam a variar de forma antecipada à perturbação, chegando ao valor do novo estado estacionário de forma mais rápida quando comparada à média do tipo "Passado". É interessante observar que no momento em que a perturbação ocorre de fato, a janela móvel com média do tipo "Simétrica" encontra-se em um valor médio entre os dois estados estacionários.

Para a perturbação do tipo rampa mostrada na Figura 4.48, percebe-se que os resultados da janela móvel com média simétrica se aproximam bastante dos valores corretos, enquanto os resultados com média do tipo "Passado" apresentam um atraso considerável na resposta.

Como esperado, para o caso que considera operação em estado estacionário (Figura 4.49), não é possível observar diferenças nos resultados das janelas móveis com média do tipo "Passado" e "Simétrica". Ambas as janelas possuem mesma frequência de amostragem, mesmo comprimento e mesmo nível de erro na variável considerada, de forma que não devem ser notadas diferenças.

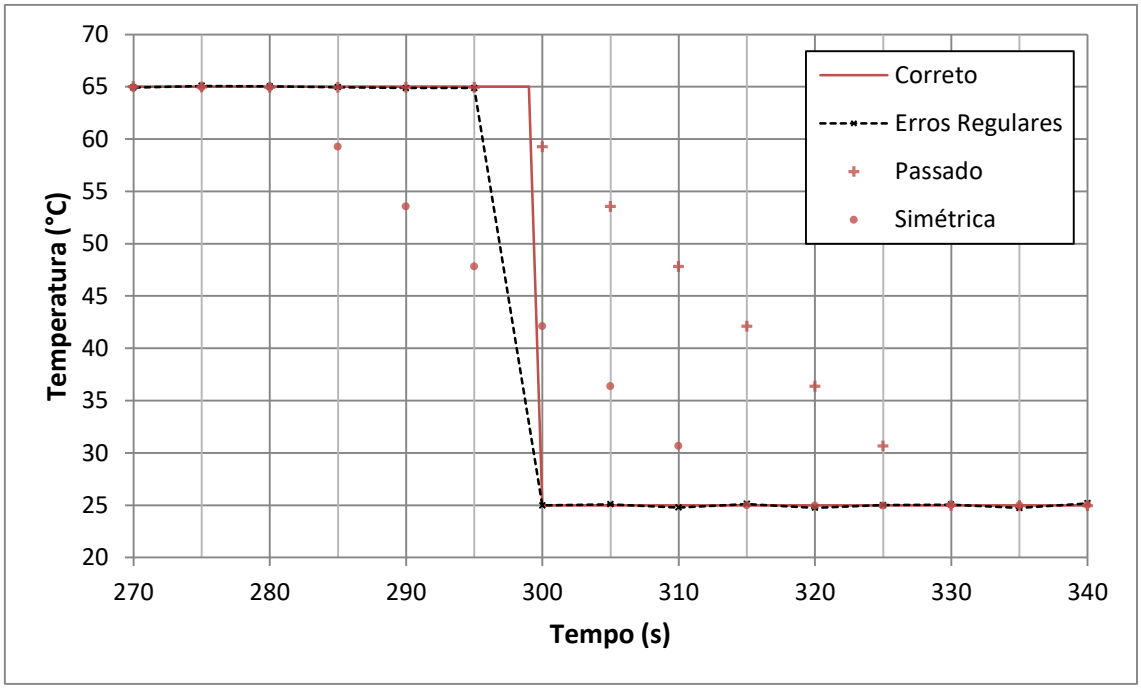

Figura 4.47 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação degrau na temperatura.

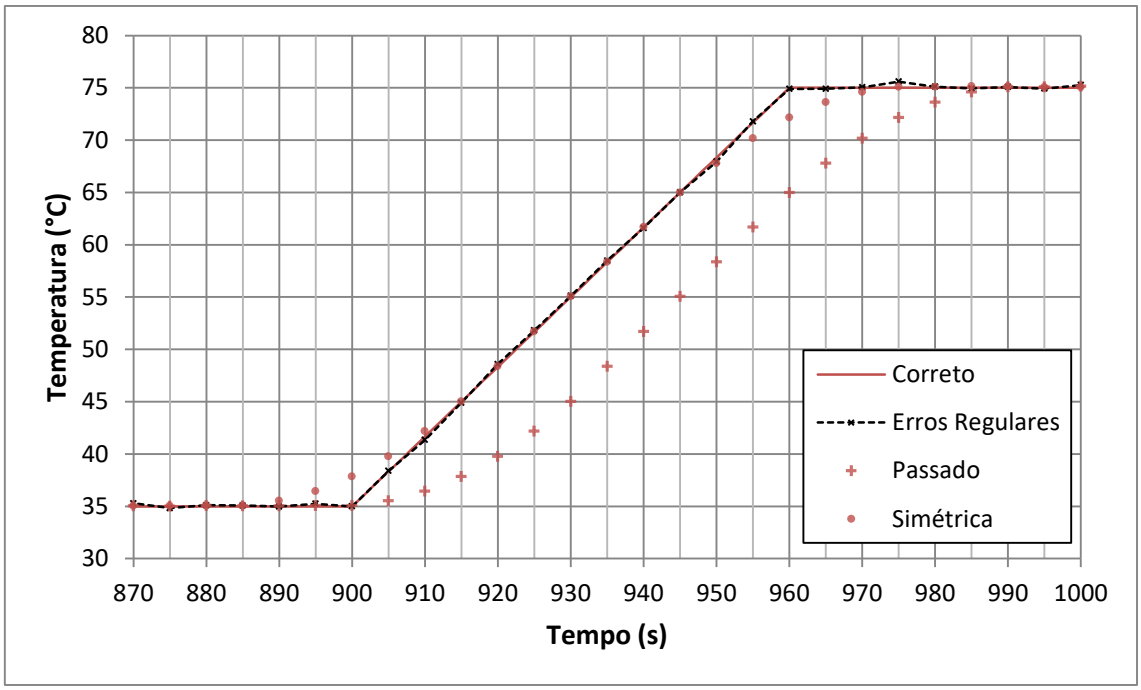

Figura 4.48 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação rampa na temperatura.

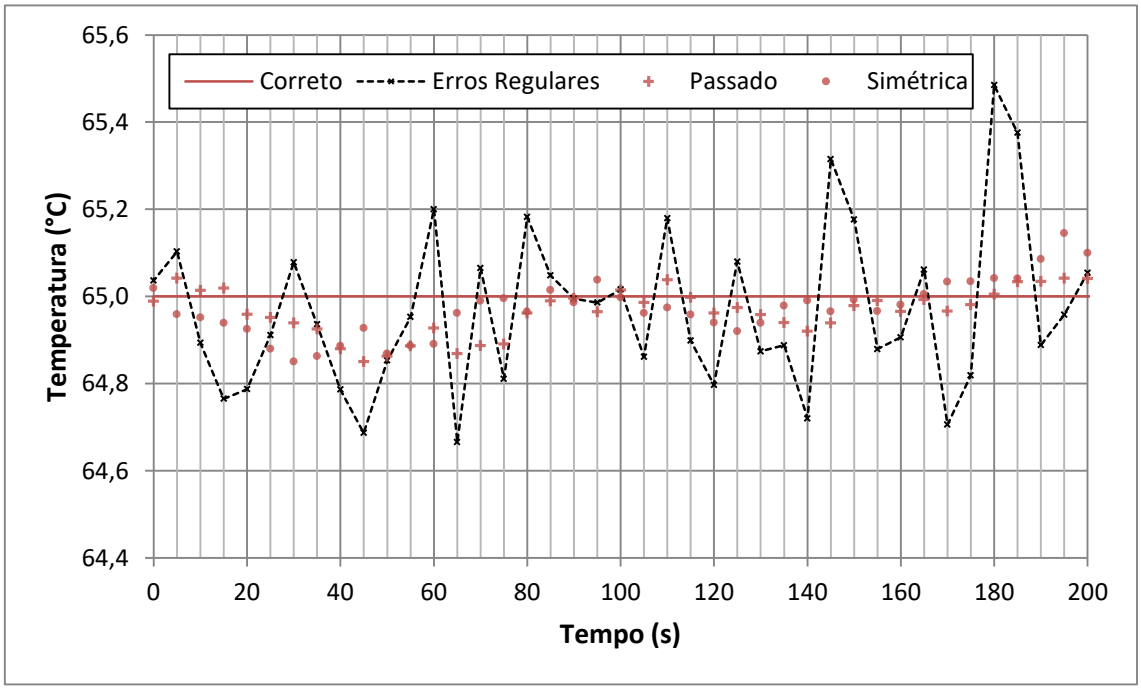

Figura 4.49 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para estado estacionário na temperatura.

Foram avaliados os resultados da vazão volumétrica da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.50), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.51) e no estado estacionário (Figura 4.52).

Os resultados obtidos são equivalentes aos obtidos anteriormente para a temperatura de entrada da corrente quente. Na Figura 4.50, com uma perturbação tipo degrau, a janela móvel com média do tipo "Passado" apresenta resultado com um atraso considerável quando comparado ao resultado correto, enquanto a janela móvel com média do tipo "Simétrica" apresenta variação antes mesmo do resultado correto, chegando ao valor do novo estado estacionário antes da janela móvel com média do tipo "Passado".

Para a perturbação do tipo rampa (Figura 4.51) e para o estado estacionário (Figura 4.52), os resultados obtidos para a vazão volumétrica da corrente quente também são compatíveis com os resultados obtidos para a temperatura de entrada da corrente quente. A janela móvel com média do tipo "Simétrica" apresenta resultados muito próximos aos resultados corretos durante a variação em rampa, enquanto a janela móvel do tipo "Passado" apresenta um atraso na predição do valor. Durante o estado estacionário, os diferentes tipos de média utilizados na janelas móveis apresentaram a mesma melhora da predição do valor correto da variável.

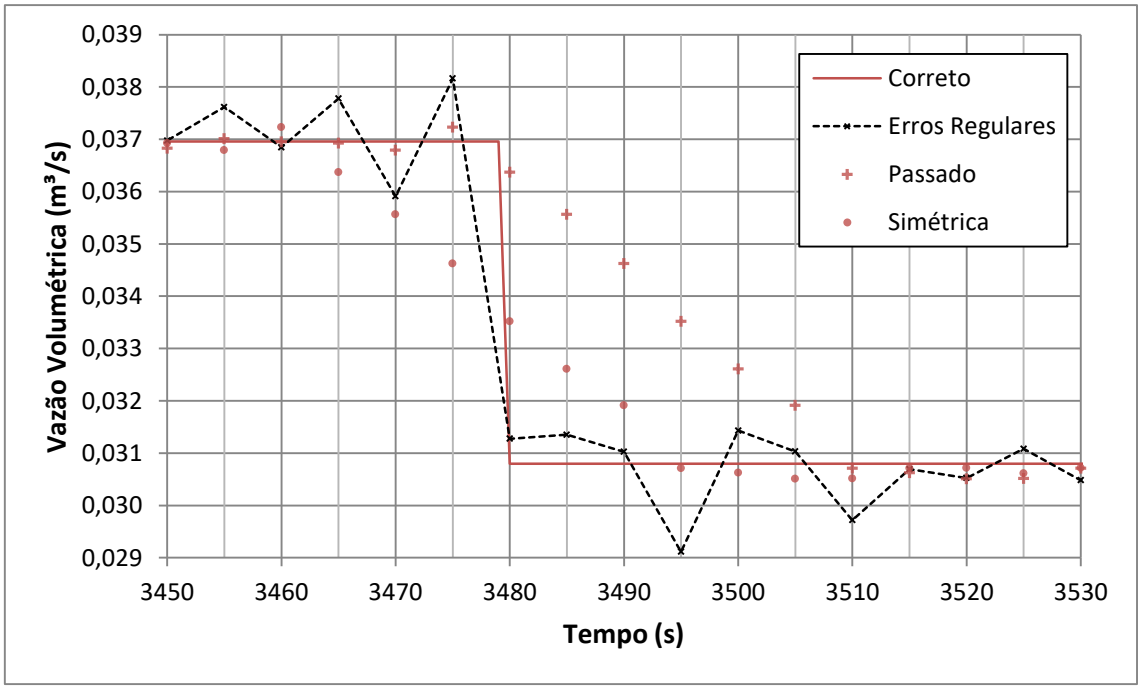

Figura 4.50 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação degrau na vazão.

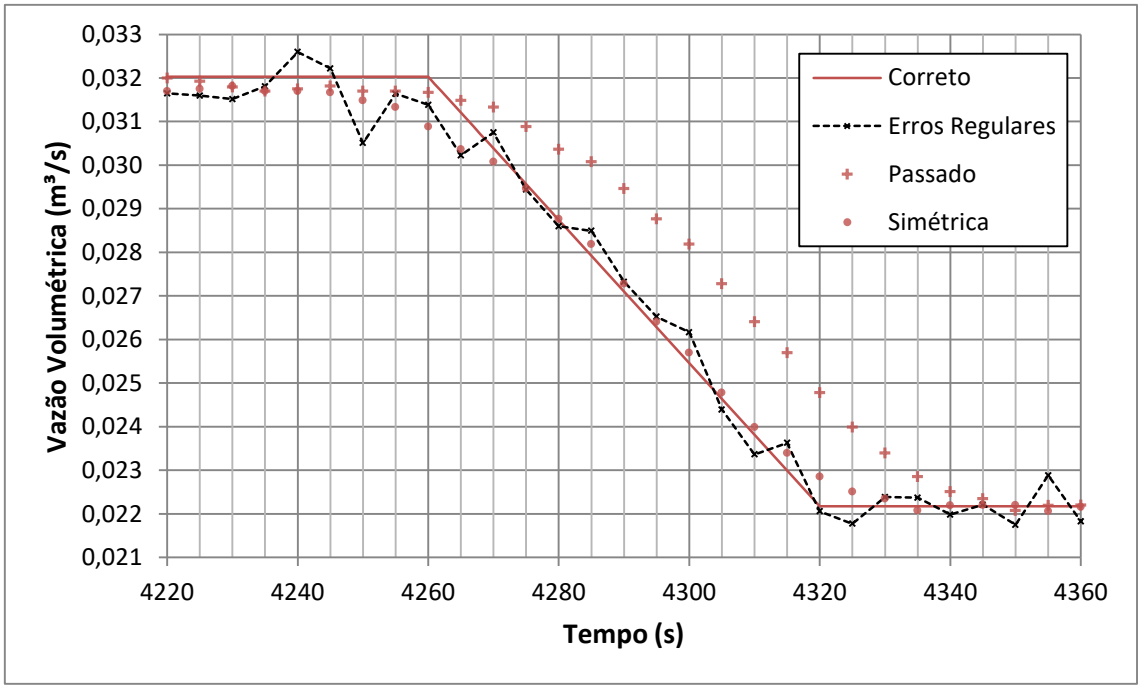

Figura 4.51 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para perturbação rampa na vazão.

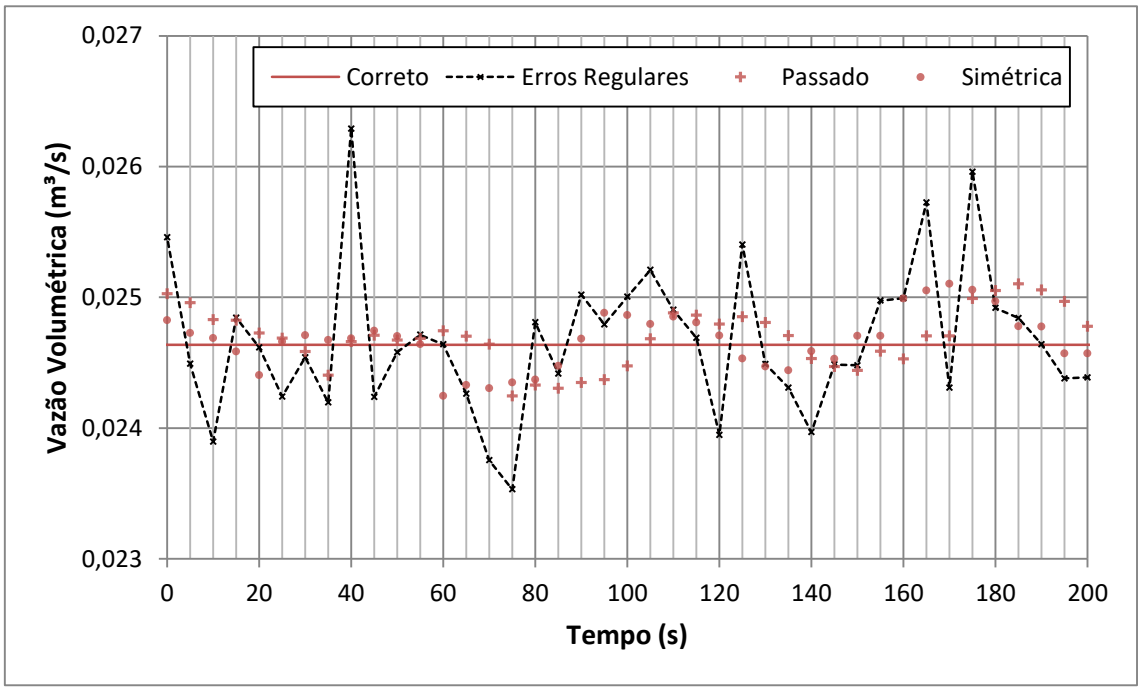

Figura 4.52 – Janelas móveis com diferentes tipos de média para estado estacionário na vazão.

Conclui-se que janelas móveis com média do tipo “Passado” apresentam atraso na resposta quando comparadas aos resultados corretos, enquanto janelas móveis com média do tipo “Simétrica” podem reduzir este atraso, com a desvantagem de indicarem o início da perturbação antecipadamente ao resultado correto. Para os resultados estacionários não foram identificadas diferenças entre as janelas móveis com médias do tipo “Passado” e “Simétrica”.

4.3.4 *Variação do Nível dos Erros Aleatórios nos Dados Gerados*

Para a avaliação das janelas móveis com variação do nível de erro foram considerados os casos 2 e 7, com erro “Regular” e “Acentuado” respectivamente, como é mostrado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Casos para avaliação do nível de erro das janelas móveis.

Caso	Frequência de Amostragem (s)	Comprimento da Janela (s)	Tipo de Média	Nível de Erro
2	5	30	Passado	Regular
7				Acentuado

Foram avaliados os resultados da temperatura de entrada da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.53), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.54) e no estado estacionário (Figura 4.55).

Para as perturbações do tipo degrau e rampa, não é possível observar diferenças significativas nas respostas das janelas móveis com erro “Regular” ou “Acentuado”. No entanto, para os resultados em estado estacionário observou-se uma diferença significativa entre os resultados com diferentes níveis de erro. Os dados com erros acentuados apresentaram desvios do resultado correto maiores que 1°C e, após aplicação da janela móvel, os desvios ficaram abaixo de 0,5°C. Os dados com erros regulares apresentaram desvios do resultado correto próximos de 0,5°C e, após aplicação da janela móvel, os desvios ficaram abaixo de 0,25°C.

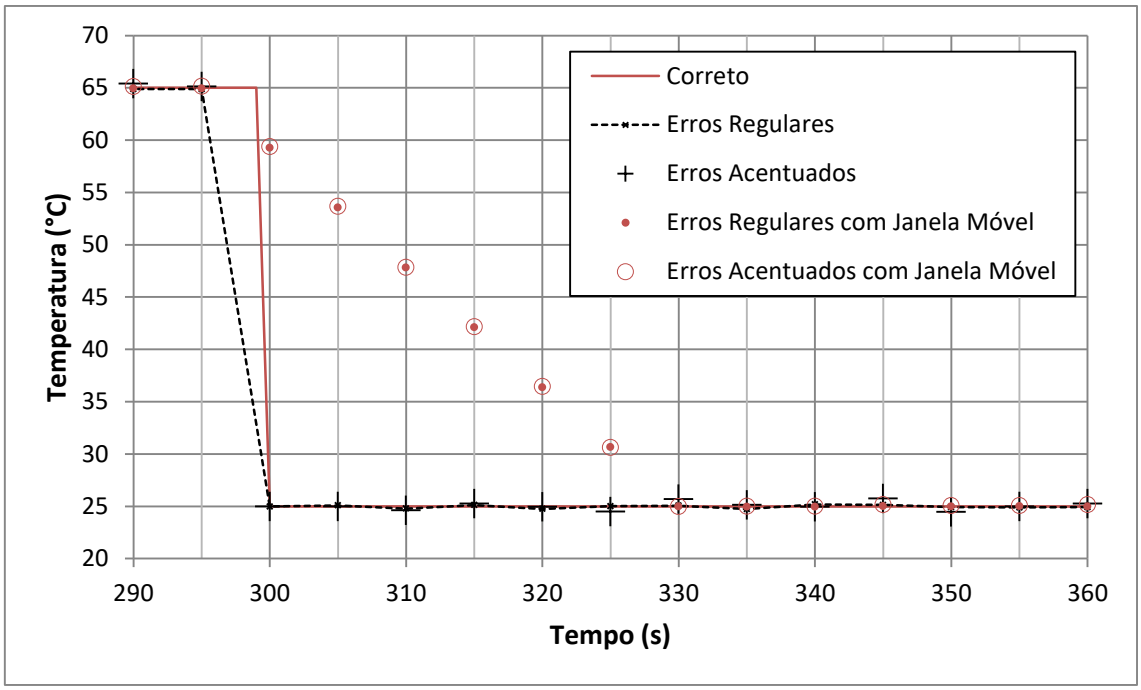

Figura 4.53 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação degrau na temperatura.

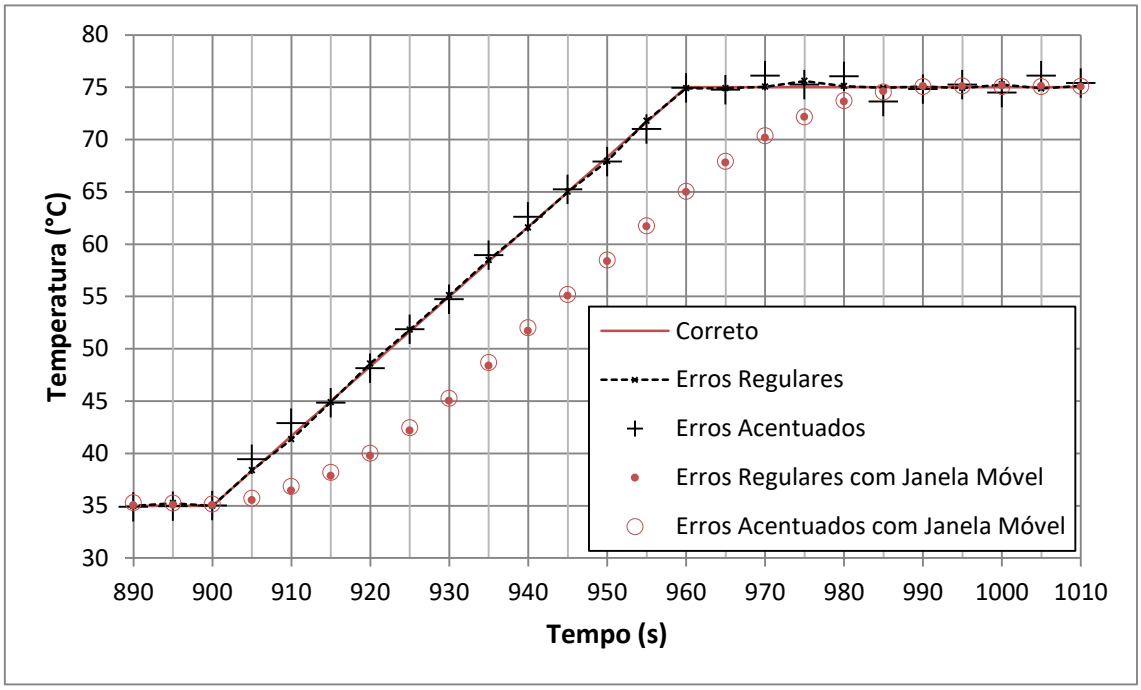

Figura 4.54 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação rampa na temperatura.

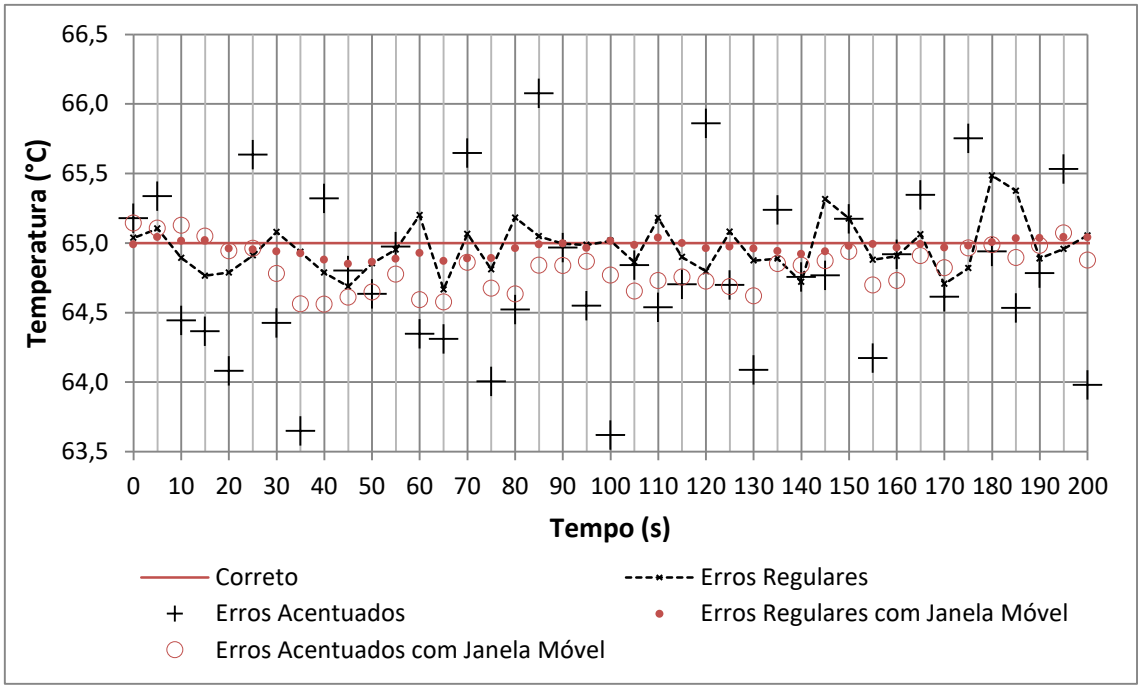

Figura 4.55 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para estado estacionário na temperatura.

Foram avaliados os resultados da vazão volumétrica da corrente quente para uma perturbação do tipo degrau (Figura 4.56), uma perturbação do tipo rampa (Figura 4.57) e no estado estacionário (Figura 4.58).

Para as perturbações do tipo degrau e rampa, são observadas pequenas diferenças nas respostas das janelas móveis com erro “Regular” e “Acentuado”, porém isso se deve aos resultados significativamente distintos encontrados para os estados estacionários anteriores e posteriores às perturbações. Para o estado estacionário da Figura 4.58 foram observados desvios do resultado correto de até 0,0030 m³/h para os resultados com erros acentuados e, após aplicação da janela móvel, os desvios ficaram abaixo de 0,0011 m³/h. Os dados com erros regulares apresentaram desvios do resultado correto de até 0,0017 m³/h e, após aplicação da janela móvel, os desvios ficaram abaixo de 0,0005 m³/h.

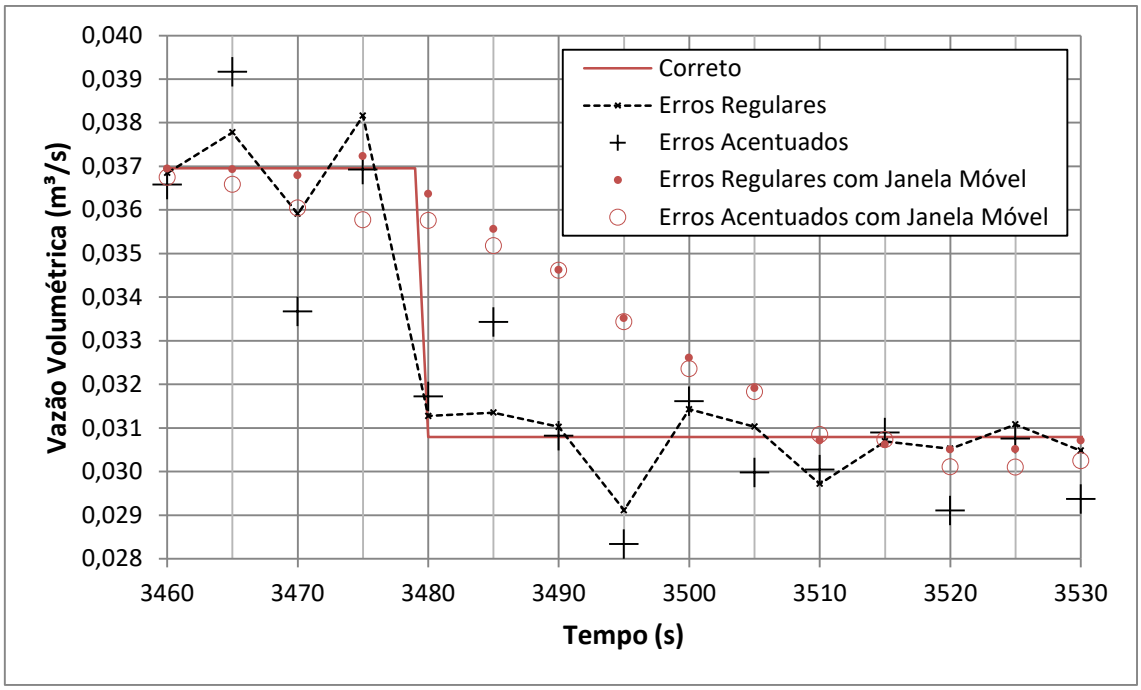

Figura 4.56 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação degrau na vazão.

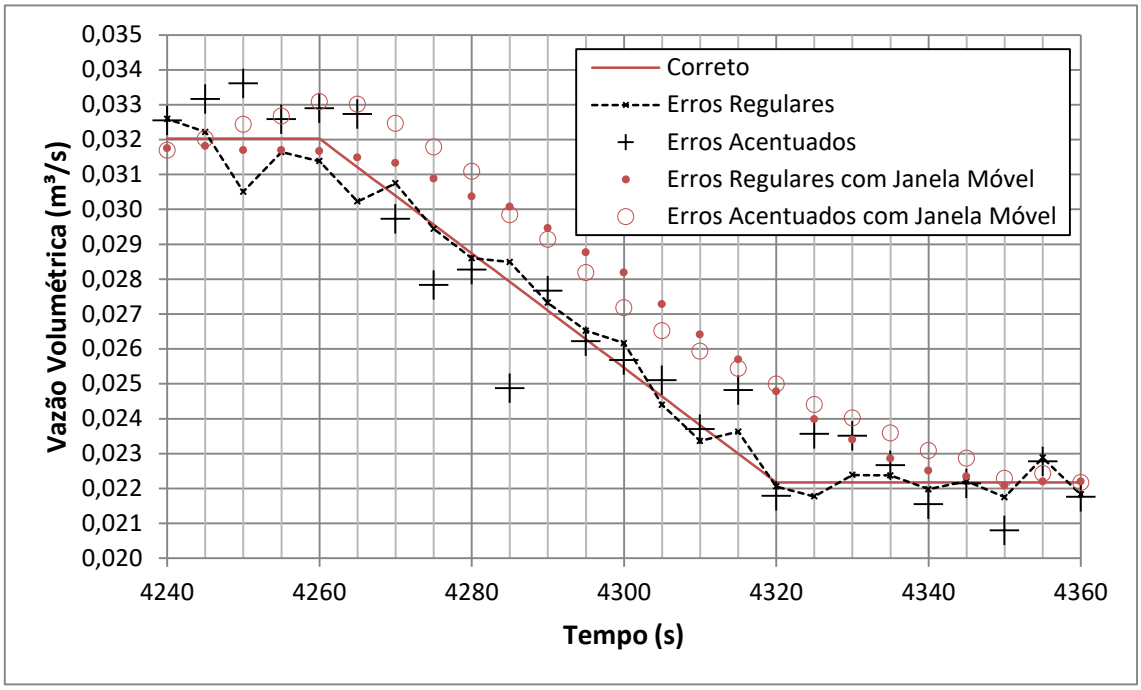

Figura 4.57 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para perturbação rampa na vazão.

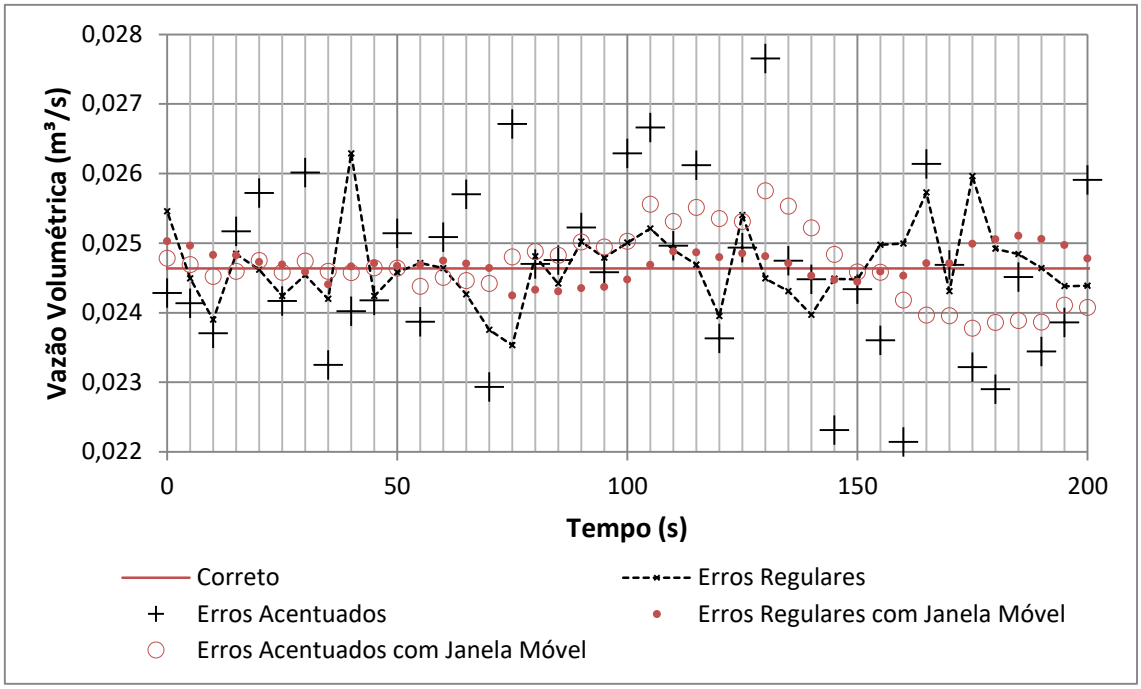

Figura 4.58 – Janelas móveis com diferentes níveis de erro para estado estacionário na vazão.

Conclui-se que não há diferença na resposta das janelas móveis para perturbações do tipo degrau e rampa quando variando o nível de erro das medidas de campo. Por outro lado, o resultado das janelas móveis no estado estacionário apresentou grande variação ao alterar o nível dos erros das medidas de campo. Foi possível verificar a redução dos desvios ao aplicar uma janela móvel de dados no tempo para os dois níveis de erro considerados (regular e acentuado).

4.4 Reconciliação de Dados

Foi realizada a reconciliação de dados para todos os conjuntos de dados considerados: resultados corretos (sem erros aleatórios), resultados com erros aleatórios regulares, com erros aleatórios acentuados e para para todos os sete casos de janela móvel de tempo apresentados na Seção 4.3. A reconciliação de dados foi aplicada para todos os pontos no tempo, seguindo as equações de balanço de energia em estado estacionário apresentadas na Seção 3.3, independente da identificação prévia de estados estacionários. A avaliaçao dos resultados obtidos durante os períodos em que o trocador de calor encontra-se em estado estacionário e em estado transiente é realizada na Seção 4.5.

Nesta seção são apresentados os resultados da reconciliação de dados para os dados corretos, dados com erros regulares, dados com erros acentuados, dados com janela móvel aplicada sobre erros regulares (caso 2 das janelas móveis) e dados com janela móvel aplicada sobre erros acentuados (caso 7 das janelas móveis).

4.4.1 Reconciliação dos Resultados Corretos

Abaixo são apresentados os resultados da reconciliação de dados para os resultados corretos (sem erros aleatórios). Foram avaliadas as respostas a quatro diferentes perturbações: degrau e rampa na temperatura de entrada da corrente quente e degrau e rampa na vazão volumétrica da corrente quente.

Na Figura 4.59 são apresentados os resultados das temperaturas de entrada e saída para uma perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente, enquanto na Figura 4.60 é possível visualizar os resultados para as vazões volumétricas. Foi observado que os resultados reconciliados se aproximam dos resultados corretos para os períodos em que não há grande variação no valor das variáveis (estados estacionários). Logo após a perturbação degrau (entre 300 e 305 segundos) é possível perceber uma grande divergência entre os resultados corretos e reconciliados para as temperaturas de entrada e saída da corrente quente, bem como para a vazão da corrente fria. A partir dos 306 segundos observou-se um maior desvio nas temperaturas de entrada e saída da corrente fria, bem como nas vazões de ambas as correntes quente e fria. Os resultados reconciliados se aproximaram dos resultados corretos à medida que o trocador de calor aproximou-se do estado estacionário.

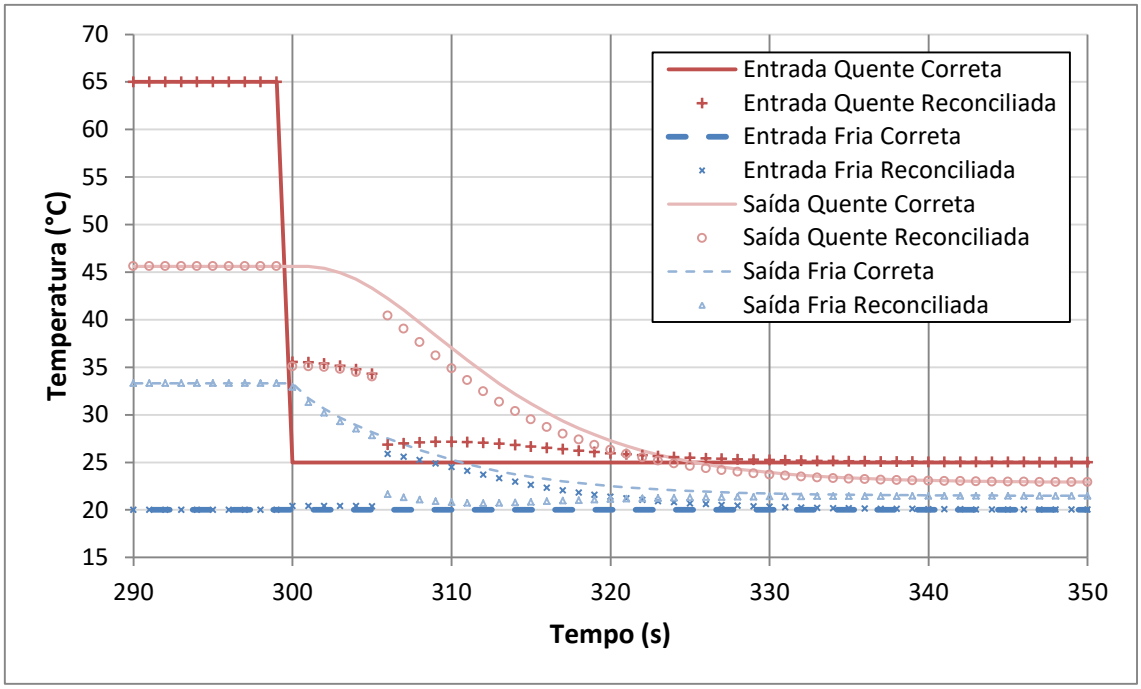

Figura 4.59 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos).

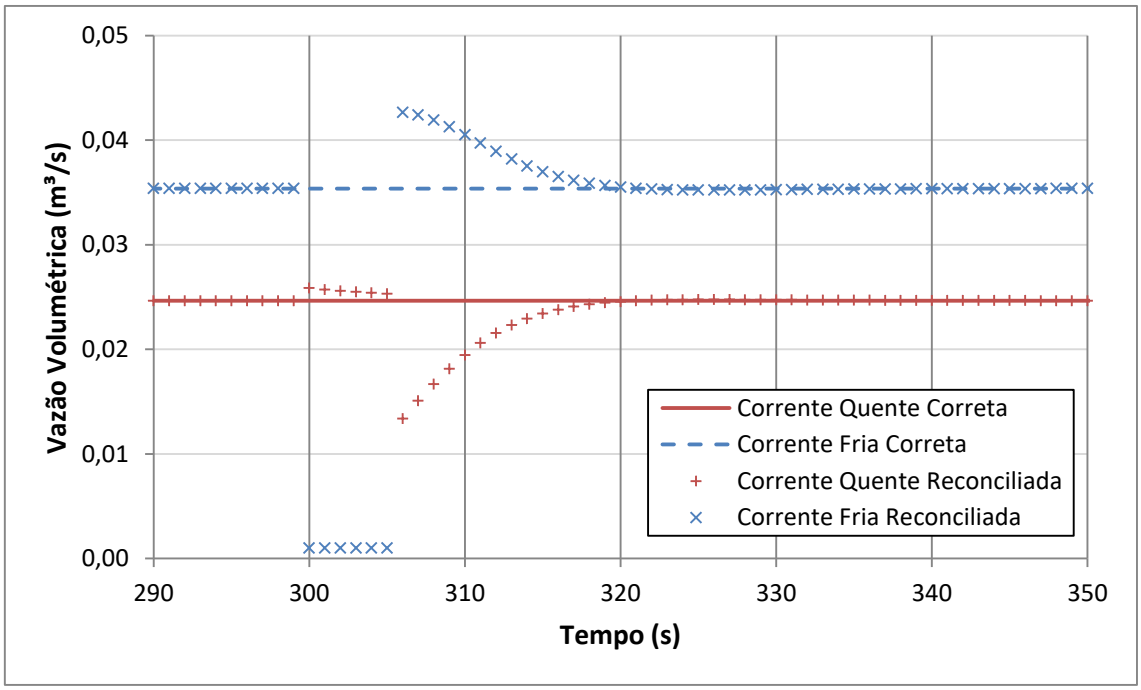

Figura 4.60 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos).

Na Figura 4.61 são apresentados os resultados das temperaturas de entrada e saída para uma perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente, enquanto na Figura 4.62 é possível visualizar os resultados para as vazões volumétricas. Foi observado que os resultados reconciliados se aproximam dos resultados corretos para os períodos em que não há grande variação no valor das variáveis (estados estacionários). Durante o período em que ocorre a perturbação do tipo rampa (entre 900 e 960 segundos), é possível perceber uma pequena divergência entre os resultados corretos e reconciliados para as temperaturas de entrada e saída, enquanto os resultados reconciliados para as vazões das correntes quente e fria tendem para um desvio mais significativo e constante. A partir dos 960 segundos, período em que não há mais perturbação do tipo rampa, observou-se uma redução dos desvios nos resultados reconciliados para as vazões, sendo que os mesmos se aproximaram dos resultados corretos aproximadamente aos 985 segundos.

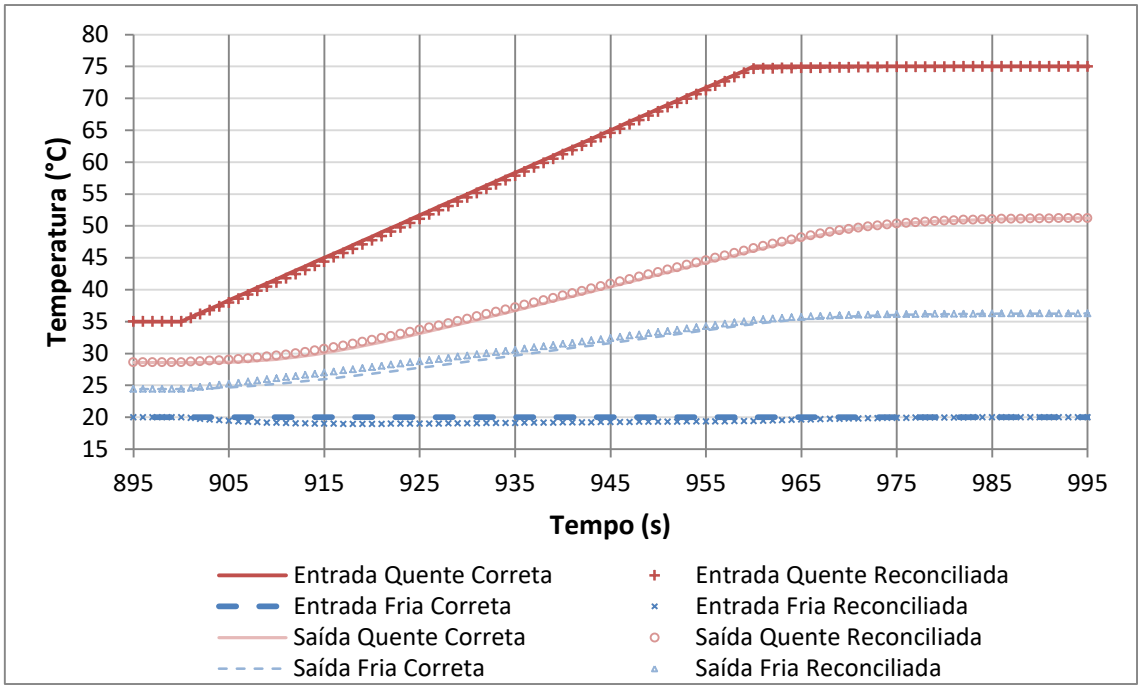

Figura 4.61 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos).

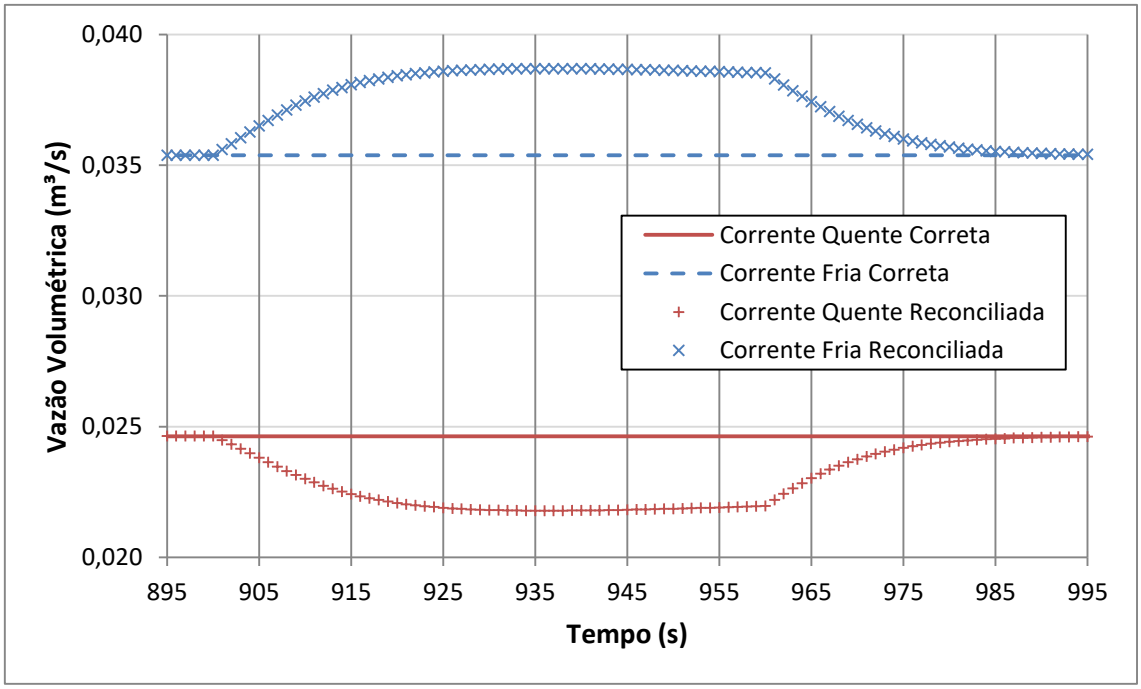

Figura 4.62 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados corretos).

Na Figura 4.63 são apresentados os resultados das vazões volumétricas para uma perturbação degrau na vazão da corrente quente, enquanto na Figura 4.64 é possível visualizar os resultados para as temperaturas de entrada e saída. Foi observado que os resultados reconciliados se aproximam dos resultados corretos para os períodos em que não há grande variação no valor das variáveis (estados estacionários). Durante o período posterior à perturbação do tipo degrau (entre 3480 e 3500 segundos) é possível perceber uma pequena divergência entre os resultados corretos e reconciliados para as vazões volumétricas, enquanto os resultados reconciliados para as temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria apresentam desvios desprezíveis.

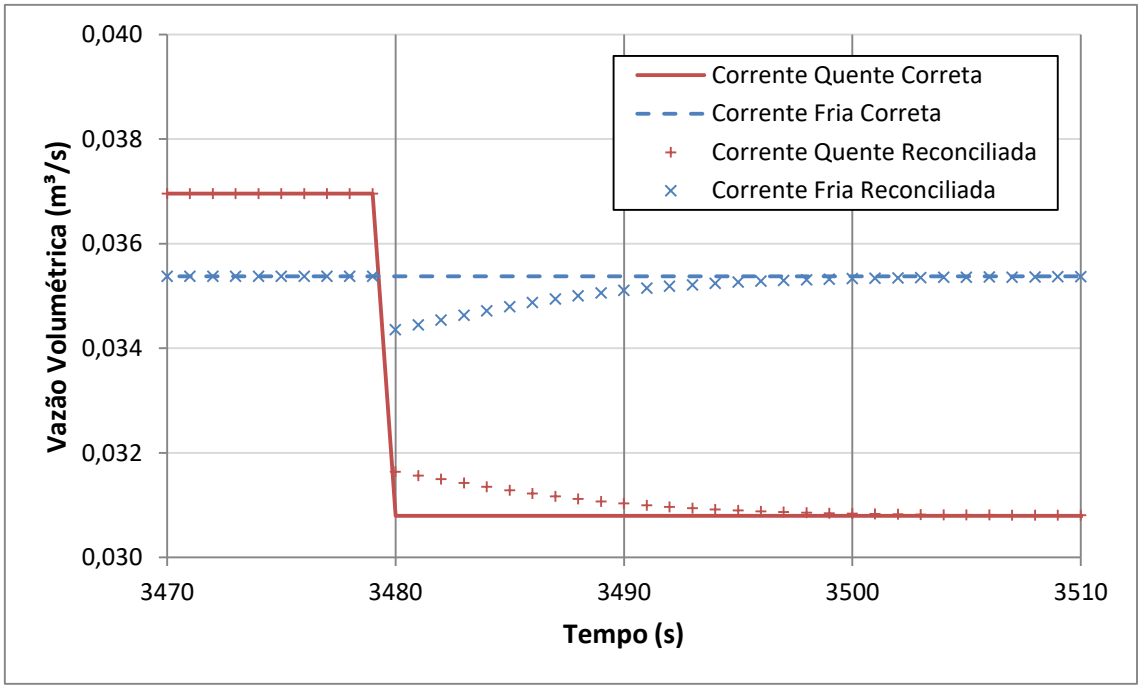

Figura 4.63 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados corretos).

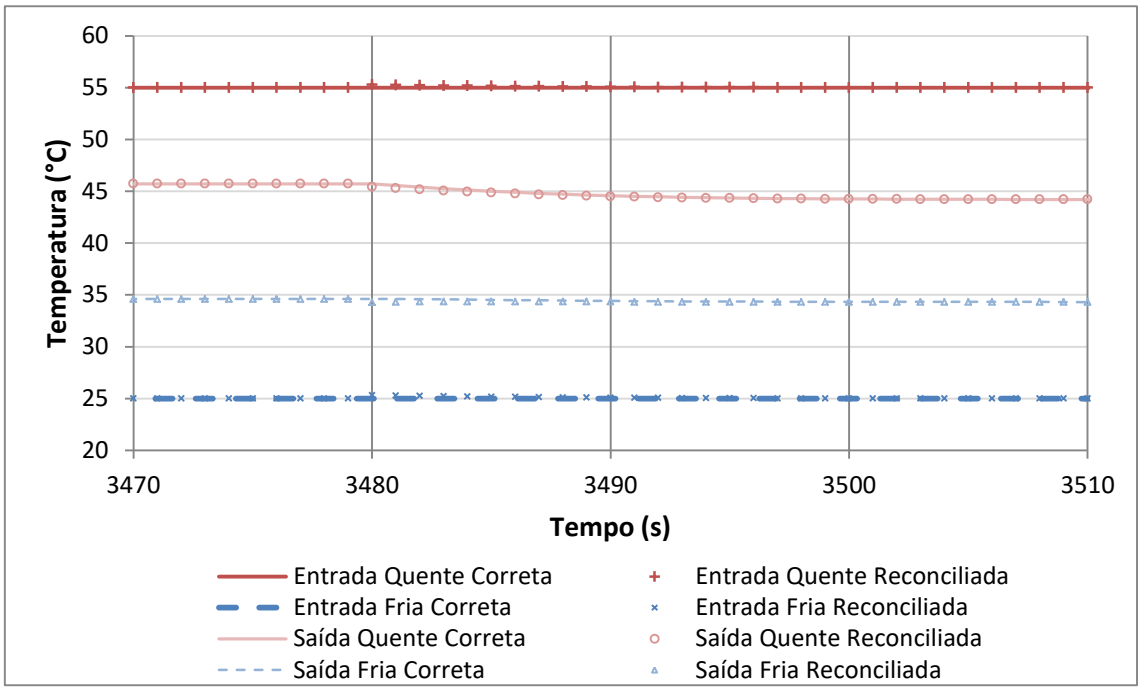

Figura 4.64 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados corretos).

Na Figura 4.65 são apresentados os resultados das vazões volumétricas para uma perturbação rampa na vazão da corrente quente, enquanto na Figura 4.66 é possível visualizar os resultados para as as temperaturas de entrada e saída. Foi observado que os resultados reconciliados se aproximam dos resultados corretos para os períodos em que não há grande variação no valor das variáveis (estados estacionários). Durante a perturbação do tipo rampa (entre 4260 e 4320 segundos) é possível perceber um pequeno desvio entre os resultados corretos e reconciliados para as vazões volumétricas, enquanto os resultados reconciliados para as temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria apresentam desvios desprezíveis.

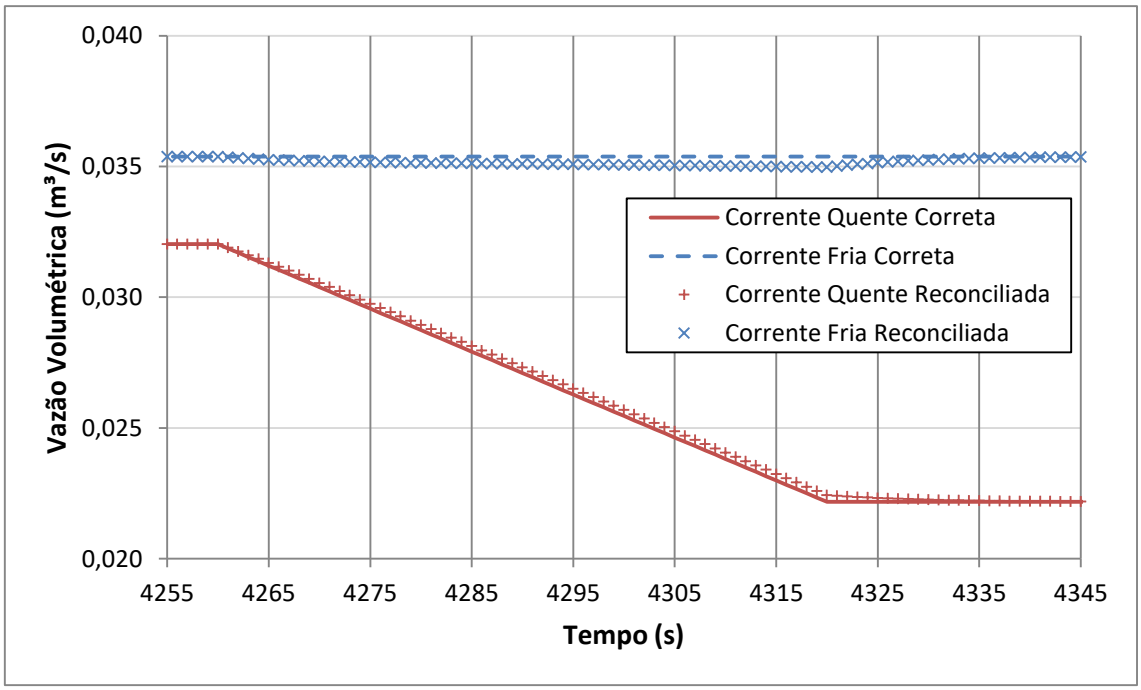

Figura 4.65 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados corretos).

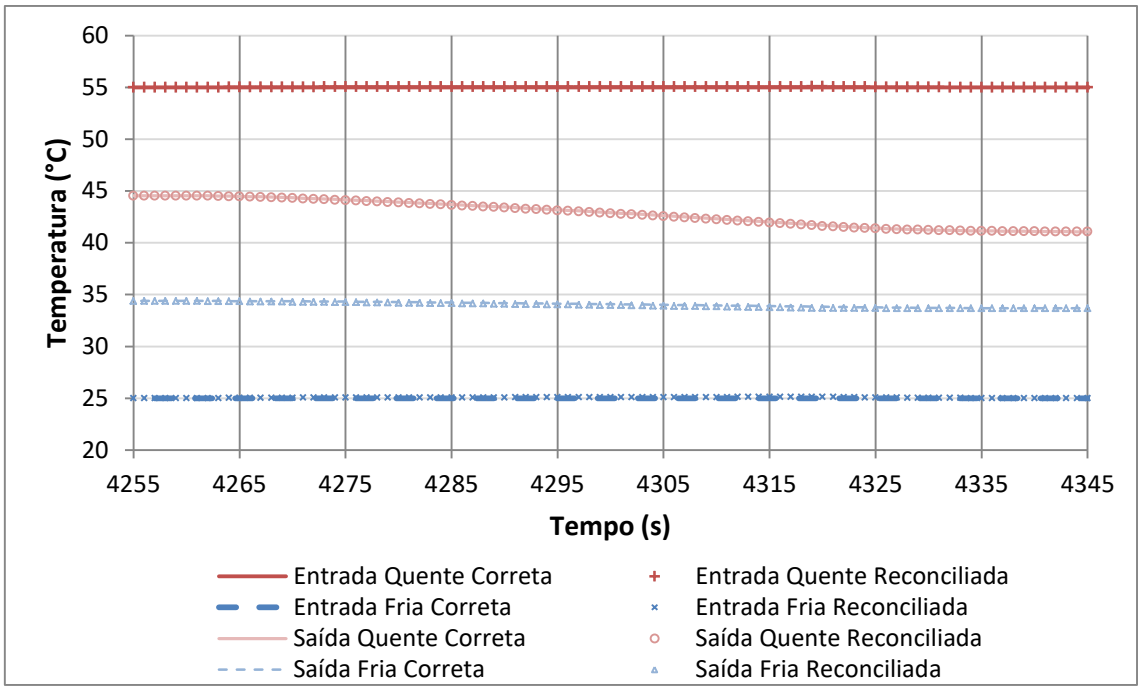

Figura 4.66 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados corretos).

Conclui-se que os resultados reconciliados (utilizando equações de balanço de energia em estado estacionário) divergem dos resultados corretos durante a operação transiente, como era esperado, tendendo aos resultados corretos à medida que os valores se aproximam de um novo estado estacionário.

4.4.2 Reconciliação dos Resultados com Erros Regulares

Foram utilizados os resultados com erros aleatórios regulares para realizar a reconciliação de dados com as equações de balanço em estado estacionário. Os resultados são apresentados na Figura 4.67, Figura 4.68, Figura 4.69, Figura 4.70, Figura 4.71, Figura 4.72, Figura 4.73 e Figura 4.74.

Observou-se que os resultados se aproximaram bastante daqueles obtidos na reconciliação de dados com os resultados corretos. Também foi observada uma redução no desvio das variáveis quando comparadas com os resultados sem reconciliação, apresentados na Seção 4.2.2.

Durante os períodos em que o trocador de calor encontrava-se em estado estacionário os valores reconciliados da temperatura apresentaram desvios desprezíveis dos valores corretos, enquanto os resultados para a vazão volumétrica apresentaram maiores desvios. Isso pode ser explicado pela maior variância das vazões volumétricas, que faz com que os resultados reconciliados se aproximem mais dos dados de temperatura, com menor variância.

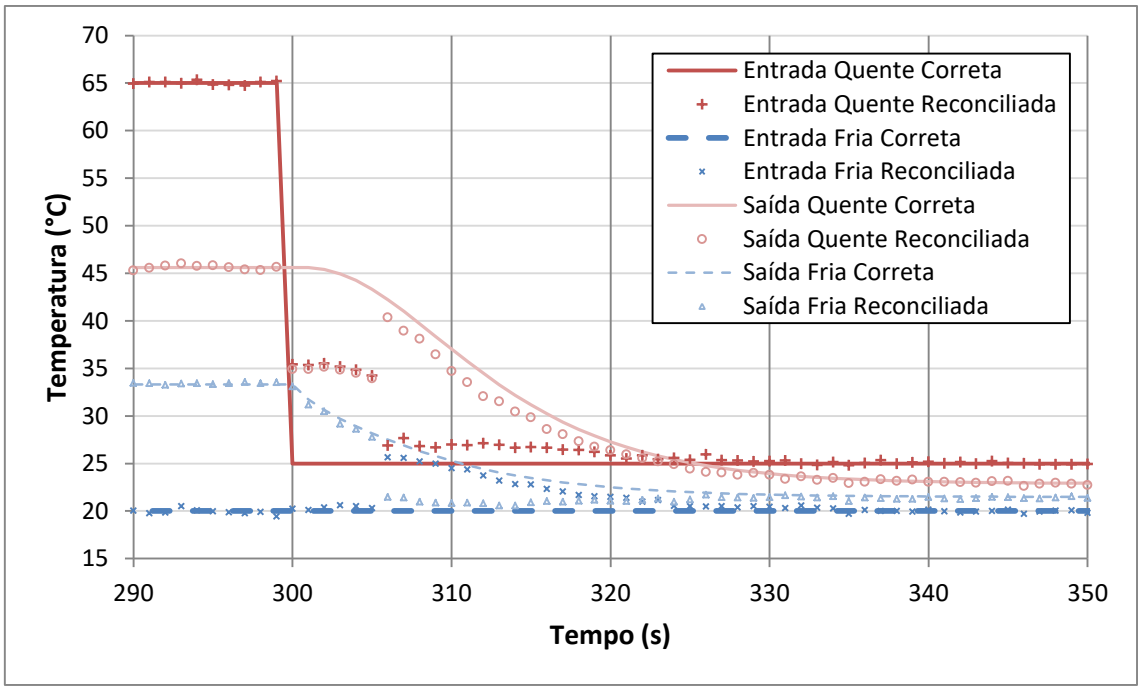

Figura 4.67 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares).

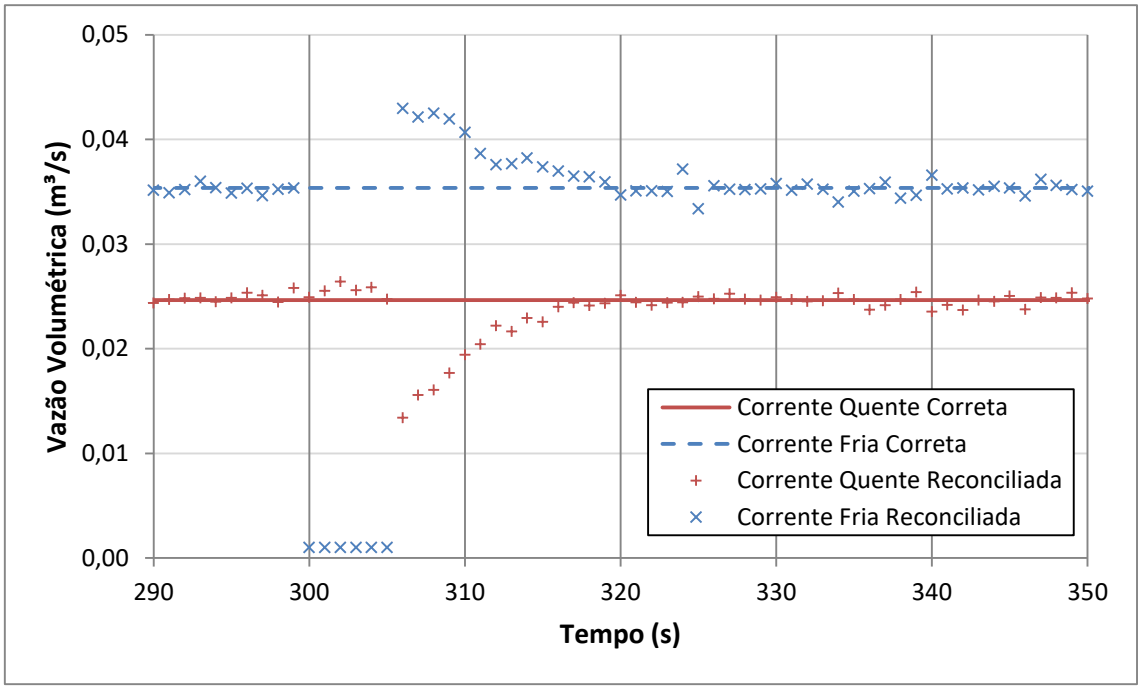

Figura 4.68 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares).

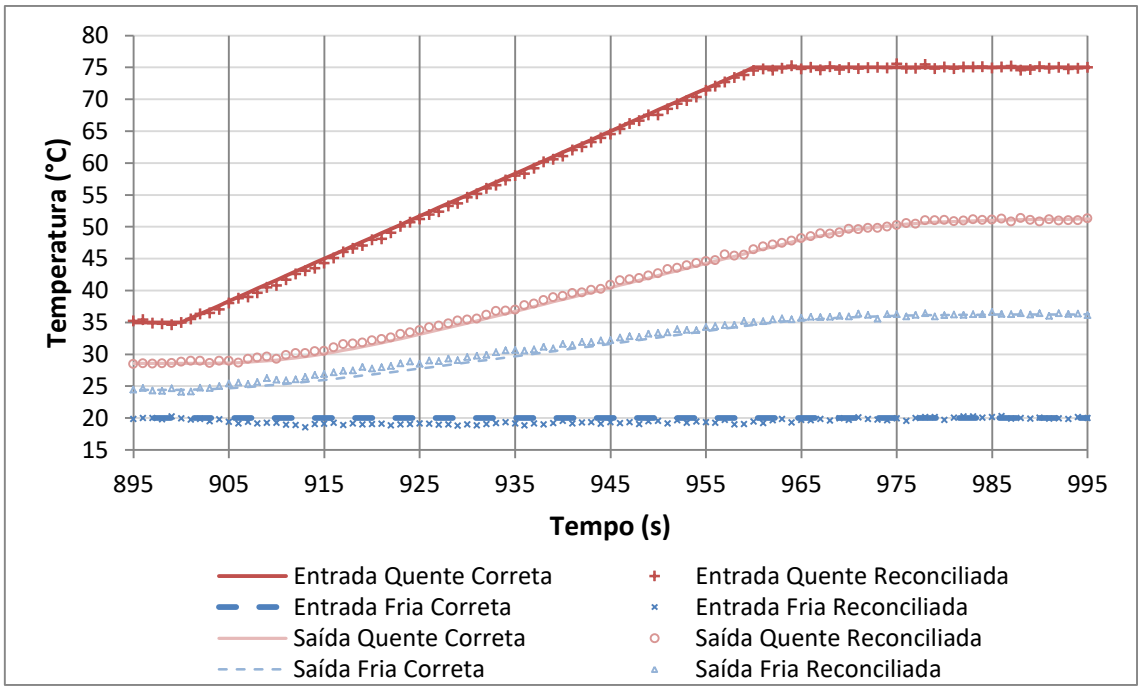

Figura 4.69 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares).

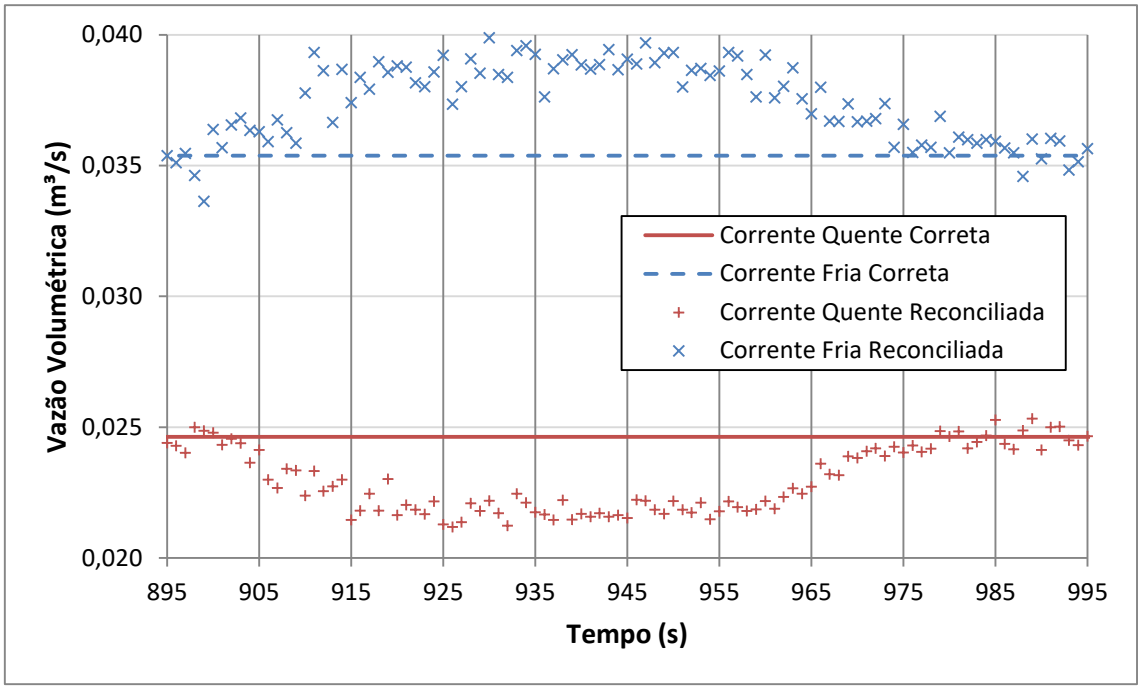

Figura 4.70 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros regulares).

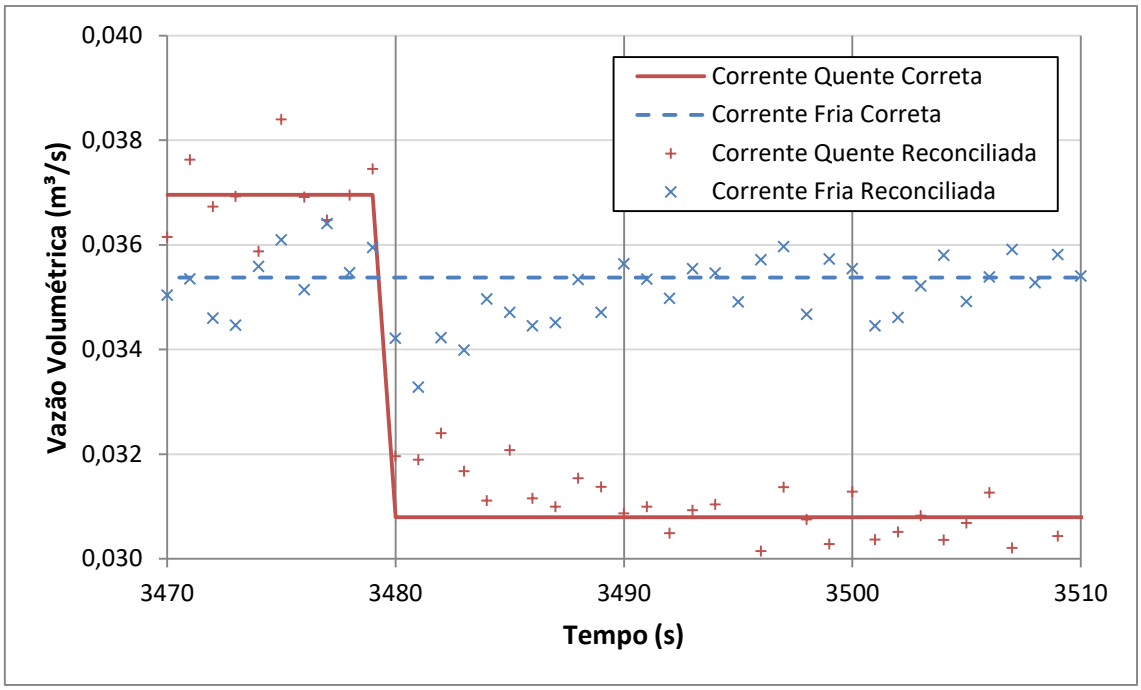

Figura 4.71 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros regulares).

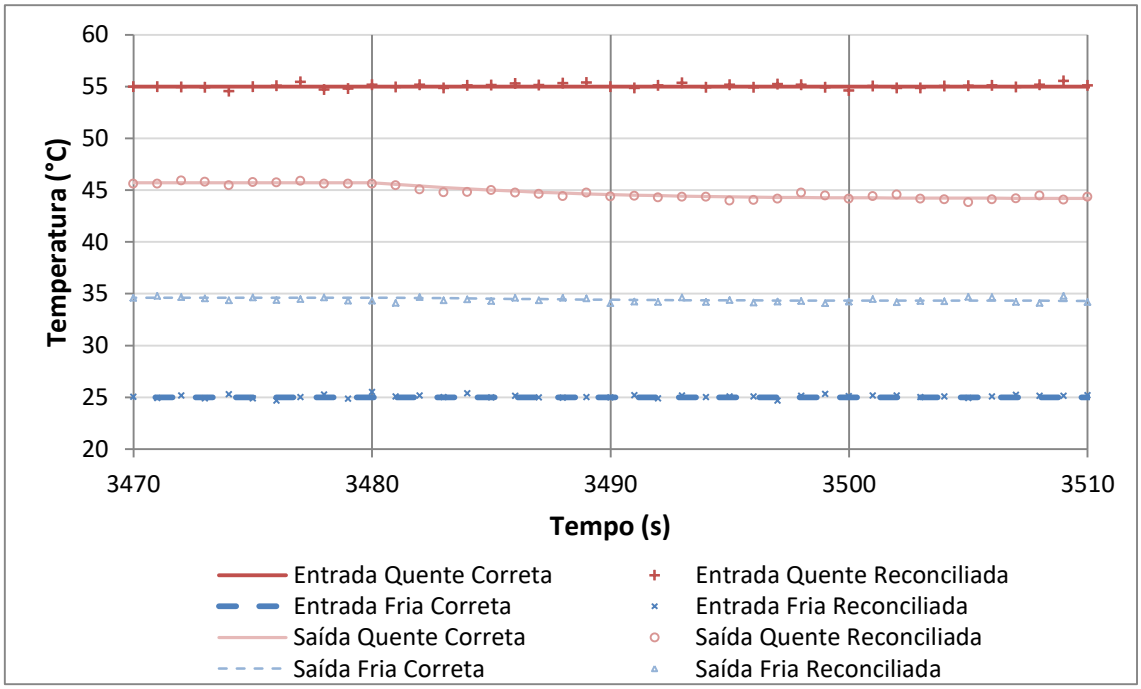

Figura 4.72 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros regulares).

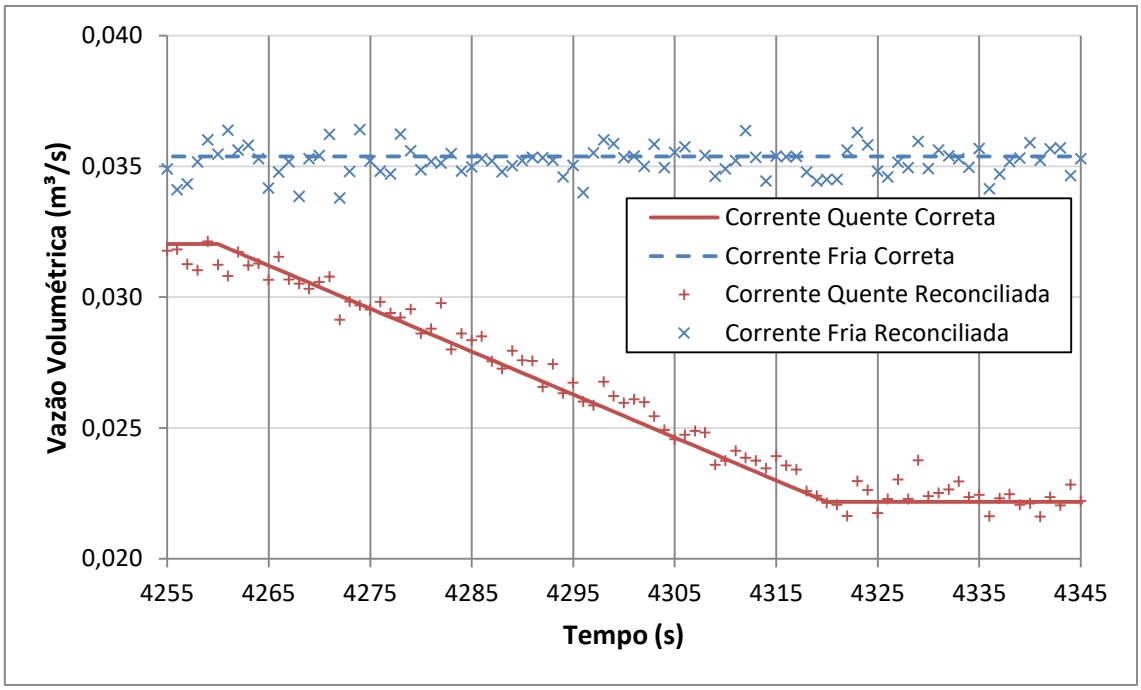

Figura 4.73 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros regulares).

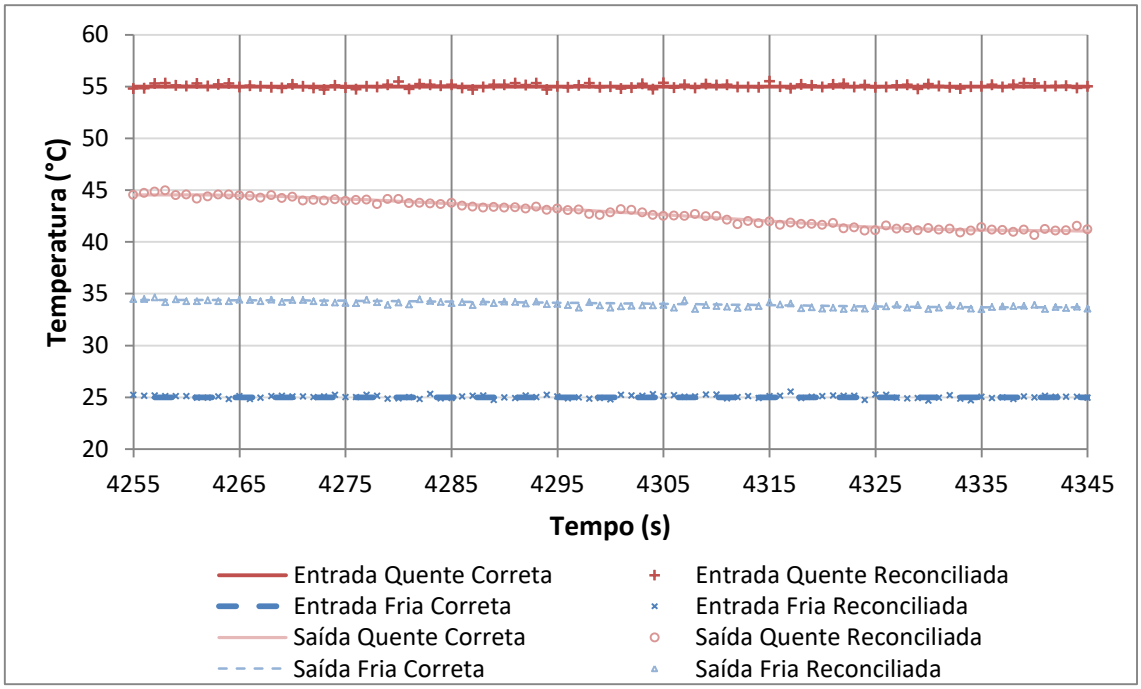

Figura 4.74 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros regulares).

4.4.3 Reconciliação dos Resultados com Erros Acentuados

Nesta seção são apresentados os resultados da reconciliação de dados, com as equações de balanço em estado estacionário, utilizando os conjunto de valores gerados com erros aleatórios acentuados. Os resultados são apresentados na Figura 4.75, Figura 4.76, Figura 4.77, Figura 4.78, Figura 4.79, Figura 4.80, Figura 4.81 e Figura 4.82.

Observou-se que os resultados se aproximaram daqueles obtidos na reconciliação de dados com os resultados corretos, porém com maiores desvios quando comparados aos resultados obtidos na reconciliação dos dados com erros aleatórios regulares. Também foi observada uma redução no desvio das variáveis quando comparadas com os resultados sem reconciliação, apresentados na Seção 4.2.2.

Durante os períodos em que o trocador de calor encontrava-se em estado estacionário os valores reconciliados da temperatura apresentaram desvios dos valores corretos de até 2°C, enquanto os resultados para a vazão volumétrica apresentaram maiores desvios, como pode ser observado na Figura 4.79 (ver tempos 3485s, 3487s e 3499s). Isso pode ser explicado pela maior variância das vazões volumétricas, que faz com que os resultados reconciliados se aproximem mais dos dados de temperatura, com menor variância.

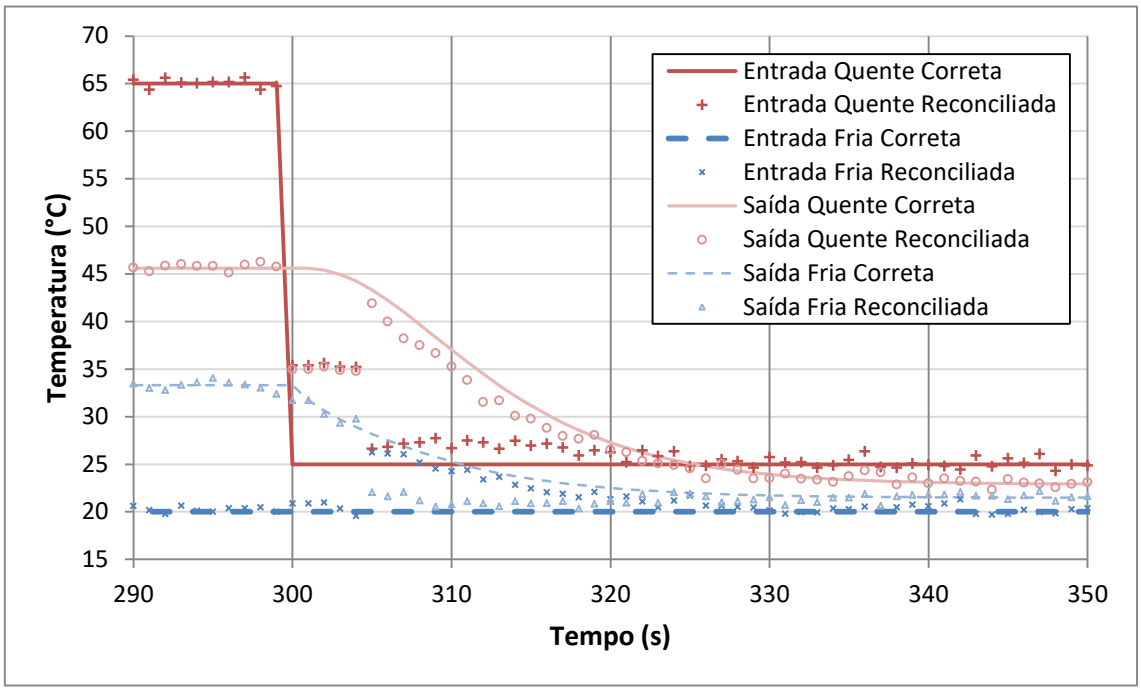

Figura 4.75 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados).

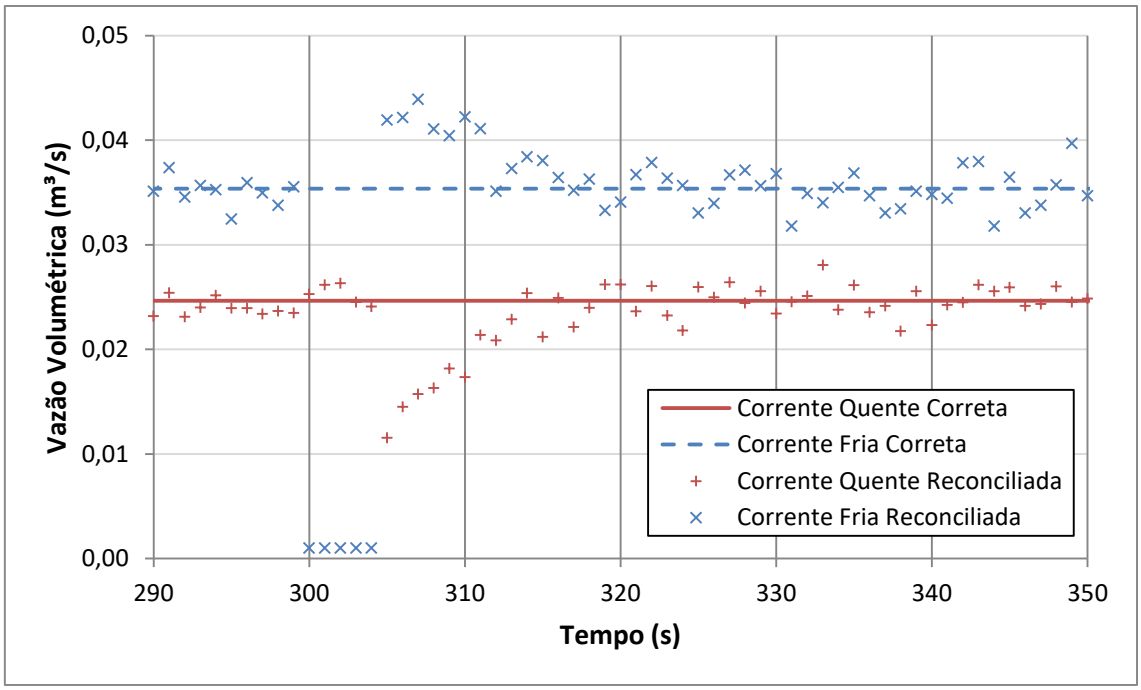

Figura 4.76 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados).

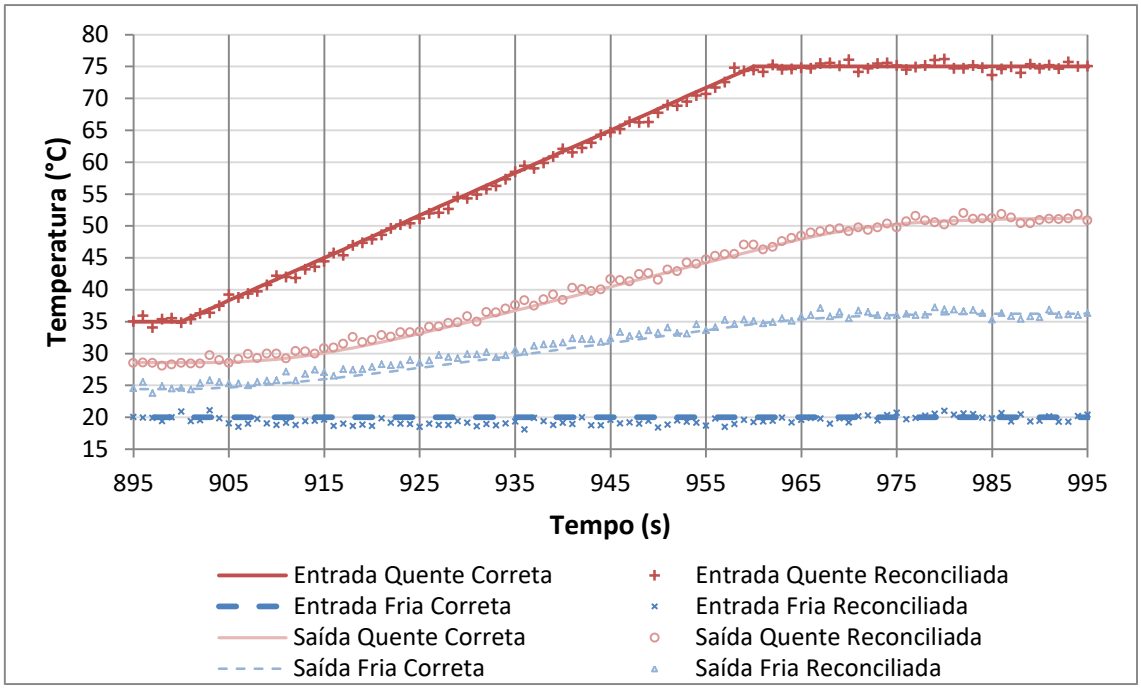

Figura 4.77 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados).

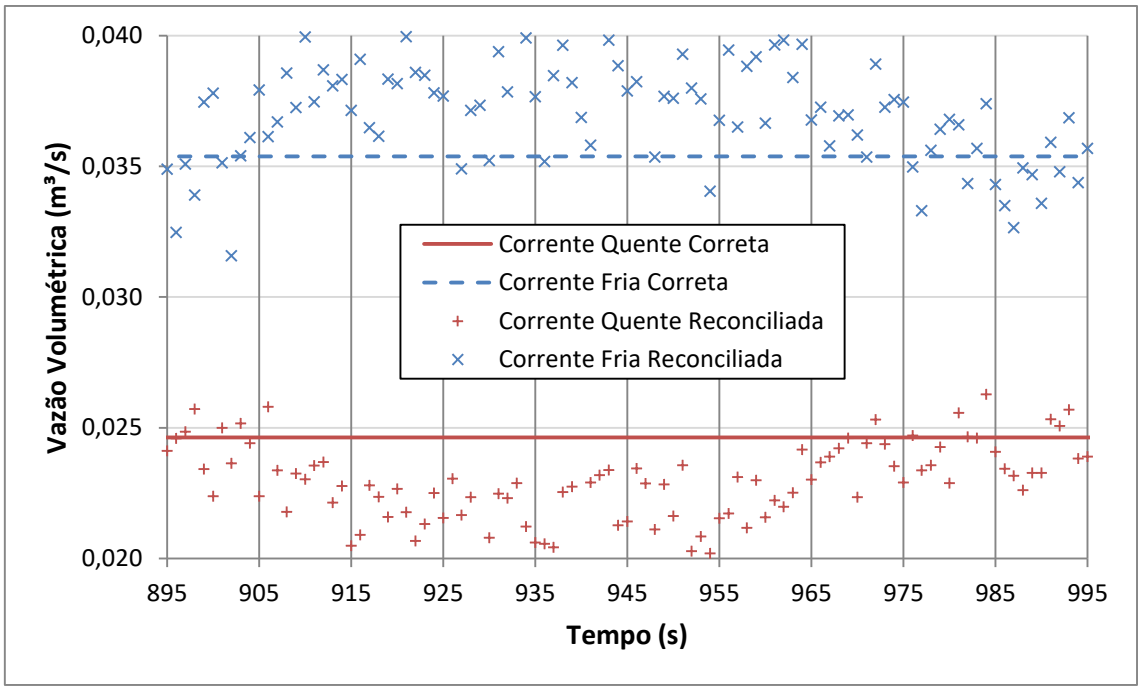

Figura 4.78 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com erros acentuados).

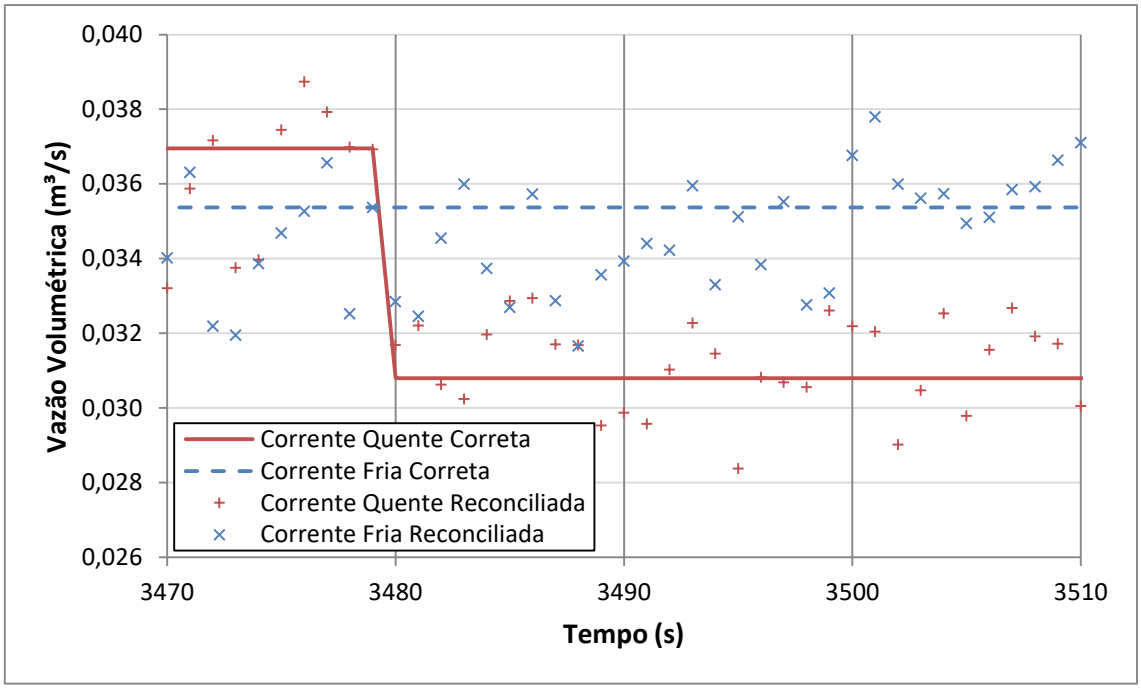

Figura 4.79 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados).

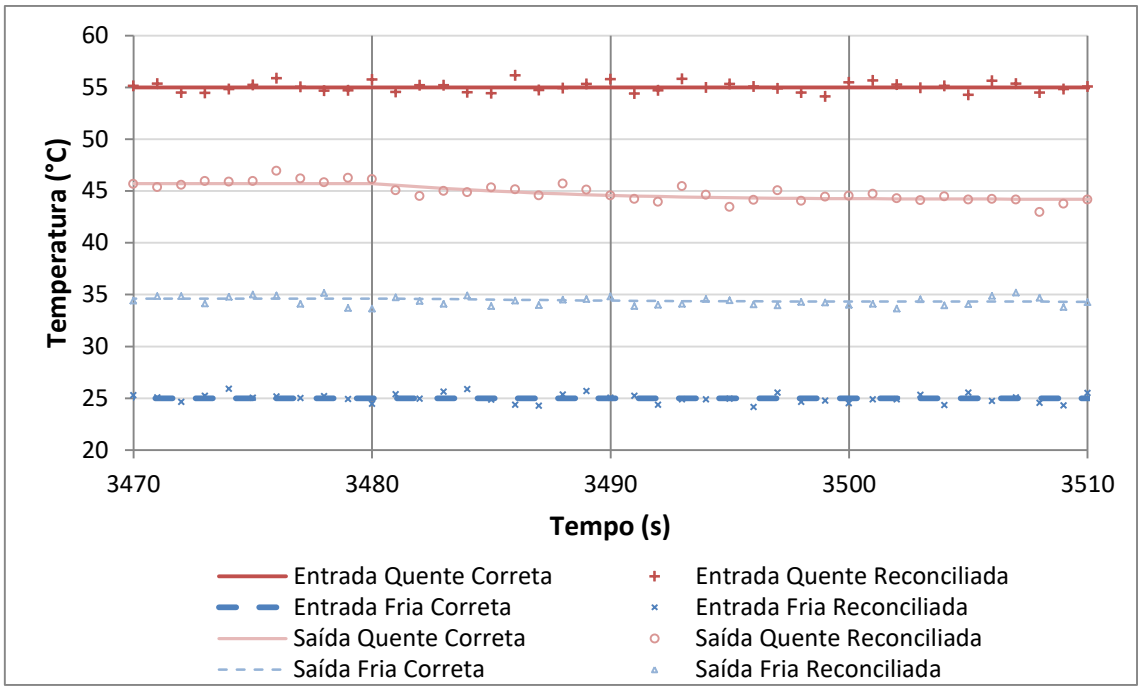

Figura 4.80 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados).

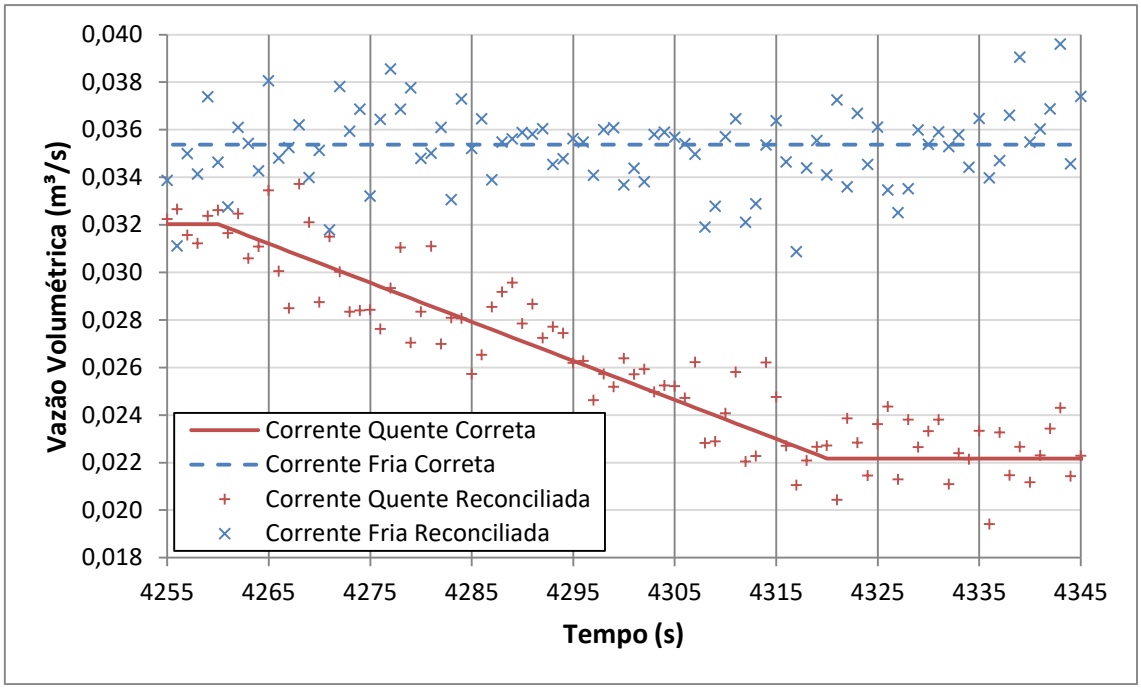

Figura 4.81 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados).

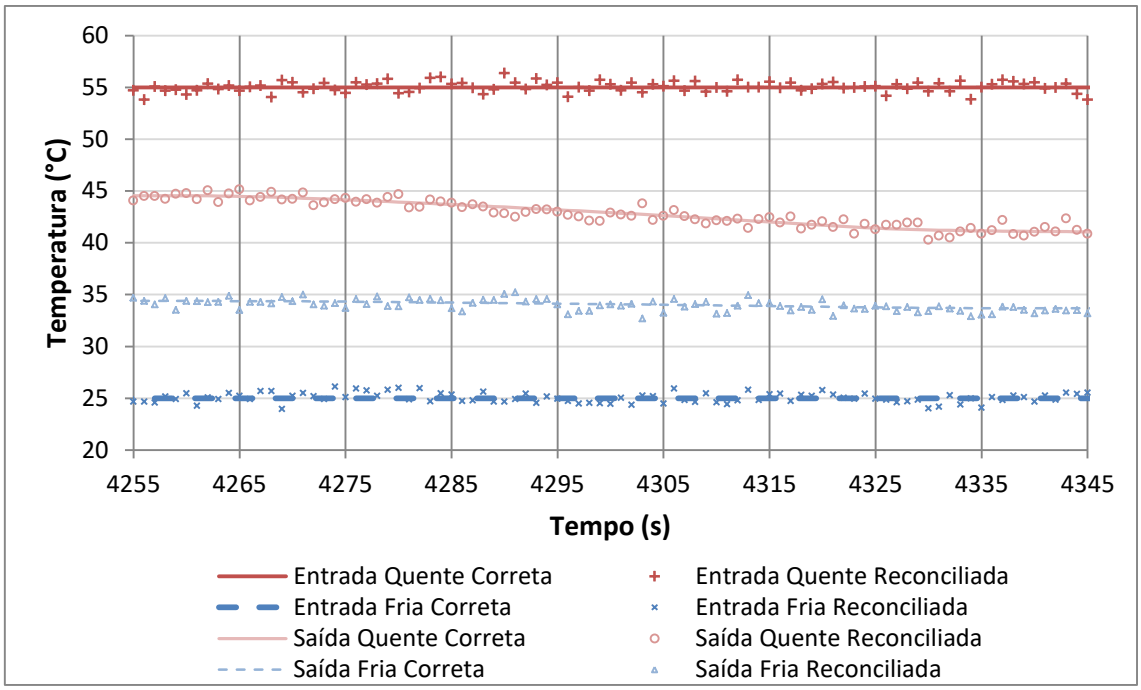

Figura 4.82 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com erros acentuados).

4.4.4 ***Reconciliação dos Resultados com Janela Móvel sobre Erros Regulares***

Foram utilizados os resultados da janela móvel de dados no tempo aplicada sobre os valores com erros aleatórios regulares (caso 2 da Tabela 3.6), que considera a amostragem de dados de 5 em 5 segundos e comprimento da janela móvel de 30 segundos, para realizar a reconciliação de dados com as equações de balanço em estado estacionário. Os resultados são apresentados na Figura 4.83, Figura 4.84, Figura 4.85, Figura 4.86, Figura 4.87, Figura 4.88, Figura 4.89 e Figura 4.90.

Observou-se que os resultados reconciliados apresentam um atraso quando comparados com os resultados corretos, devido às janelas móveis, porém os valores reconciliados nos períodos estacionários exibem desvios menores que os obtidos sem a aplicação das janelas móveis, mesmo com a amostragem dos dados ocorrendo apenas de 5 em 5 segundos.

Durante os períodos em que o trocador de calor encontrava-se em estado estacionário os valores reconciliados apresentaram desvios desprezíveis dos valores corretos, tanto para as temperturas quanto para as vazões volumétricas. Outro comportamento interessante foi observado ao comparar a Figura 4.84, com a Figura 4.68 e a Figura 4.60, sendo que os valores reconciliados das vazões volumétricas se

aproximaram mais dos valores corretos quando foi utilizada a janela móvel de tempo, mesmo ao comparar com a reconciliação de dados que utilizou os resultados sem erros aleatórios, devido a menores variâncias para as variáveis de vazão e maiores variâncias para as variáveis de temperatura, que alteraram os pesos da função objetivo (do tipo mínimos quadrados ponderados) da reconciliação de dados.

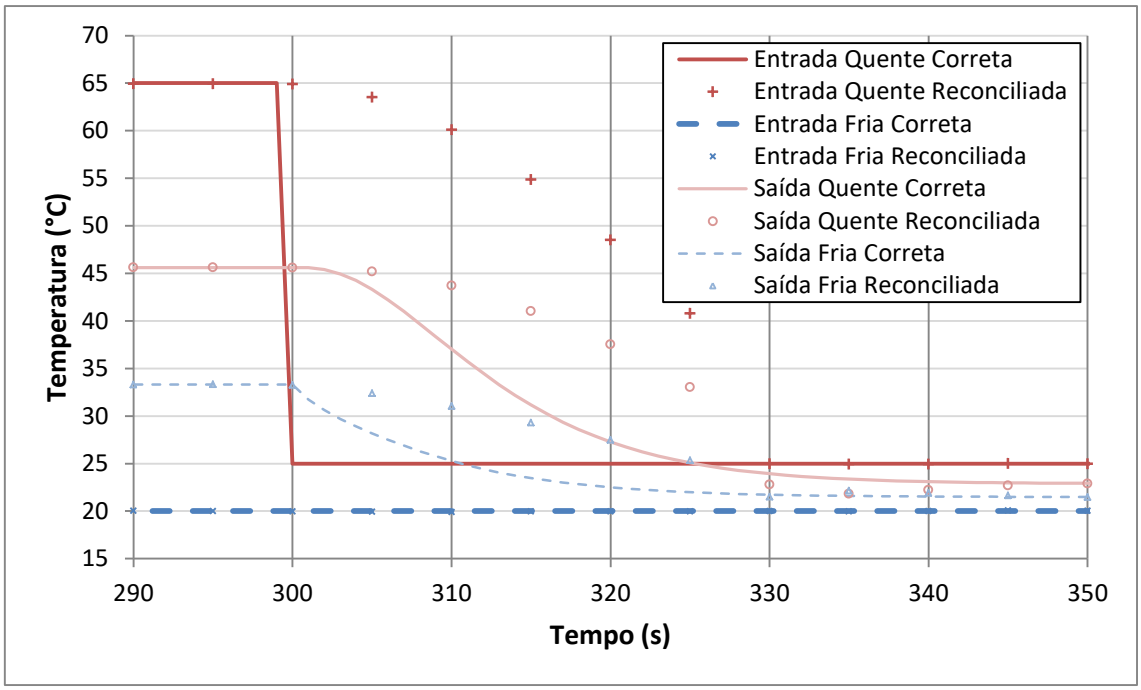

Figura 4.83 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

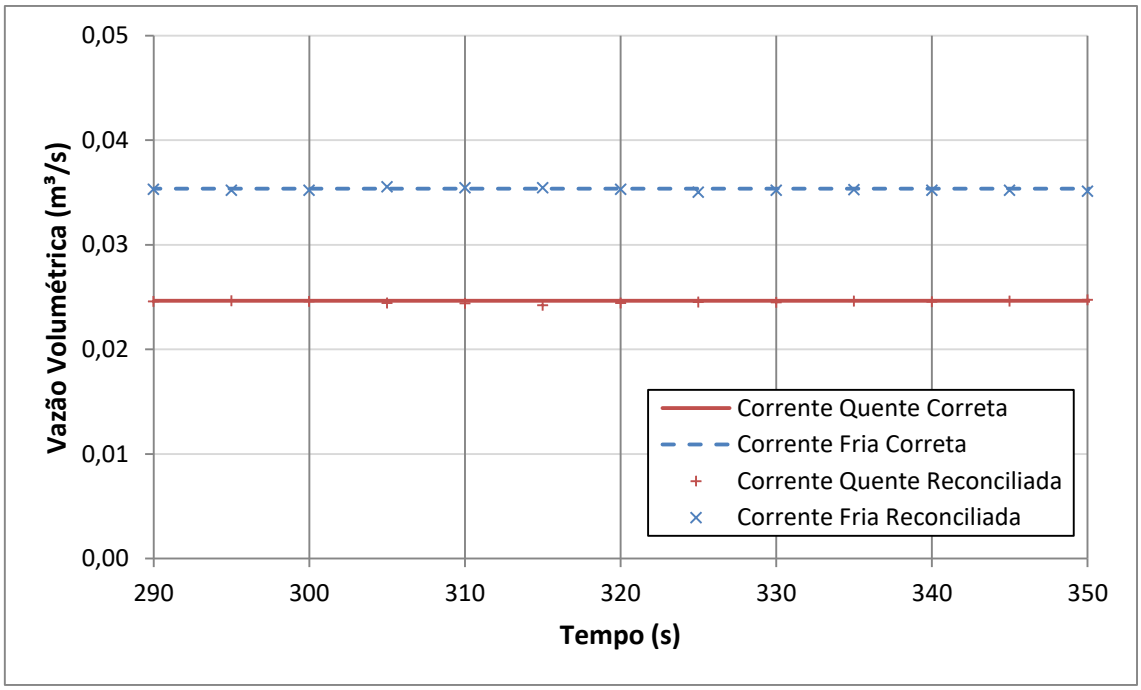

Figura 4.84 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

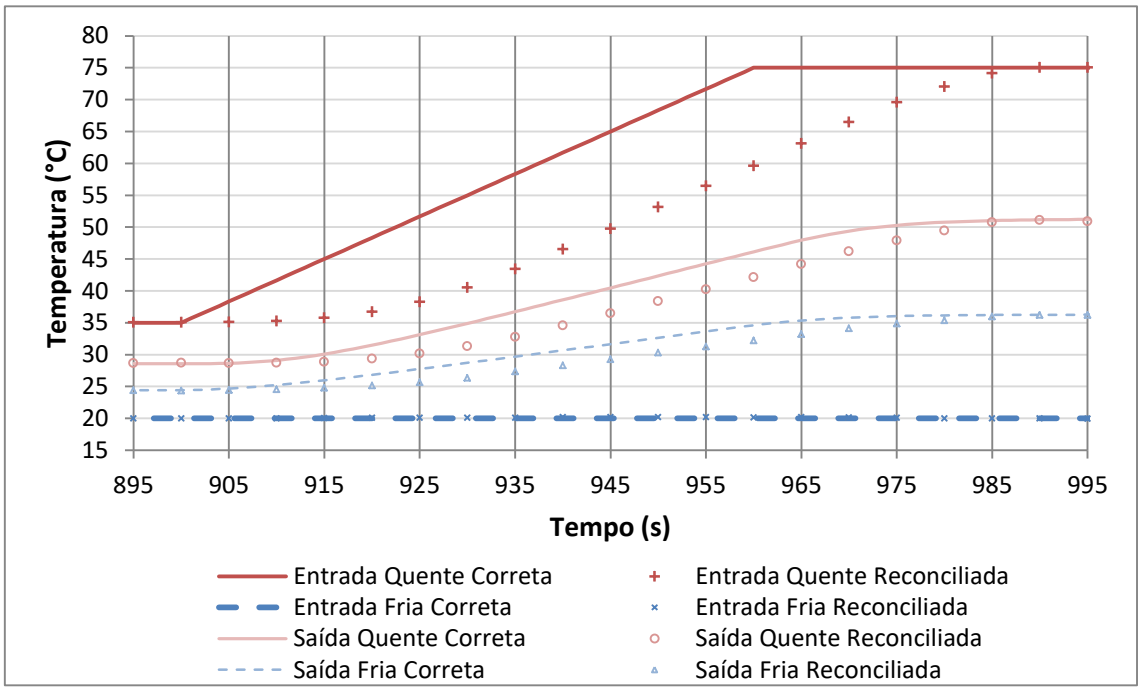

Figura 4.85 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

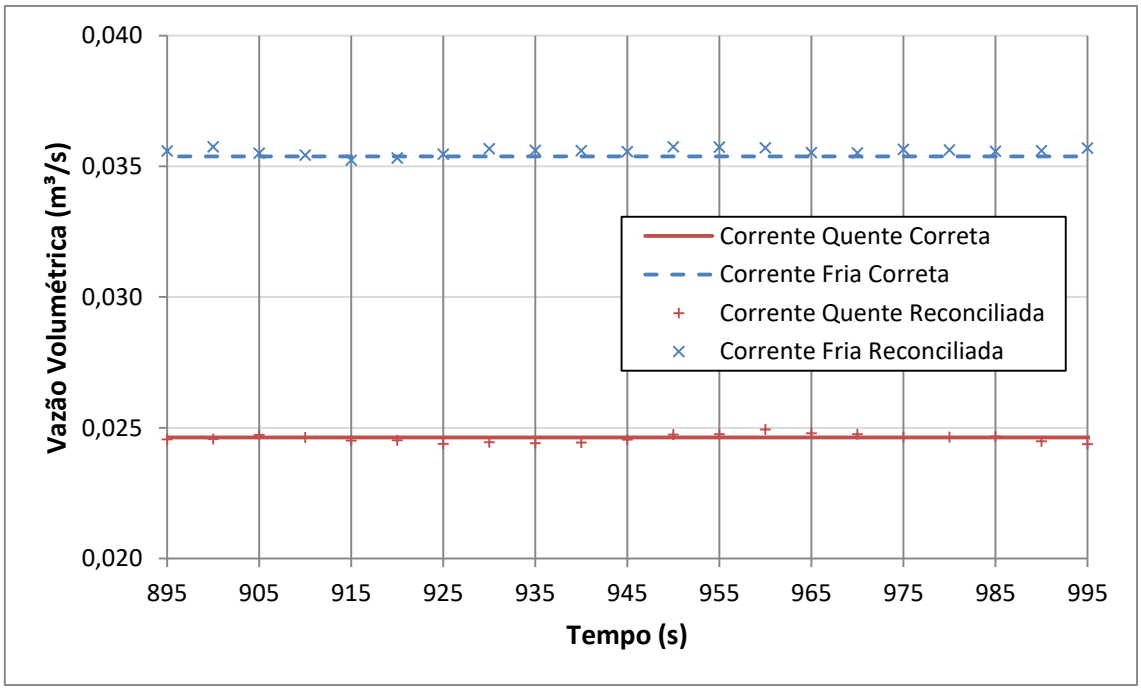

Figura 4.86 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

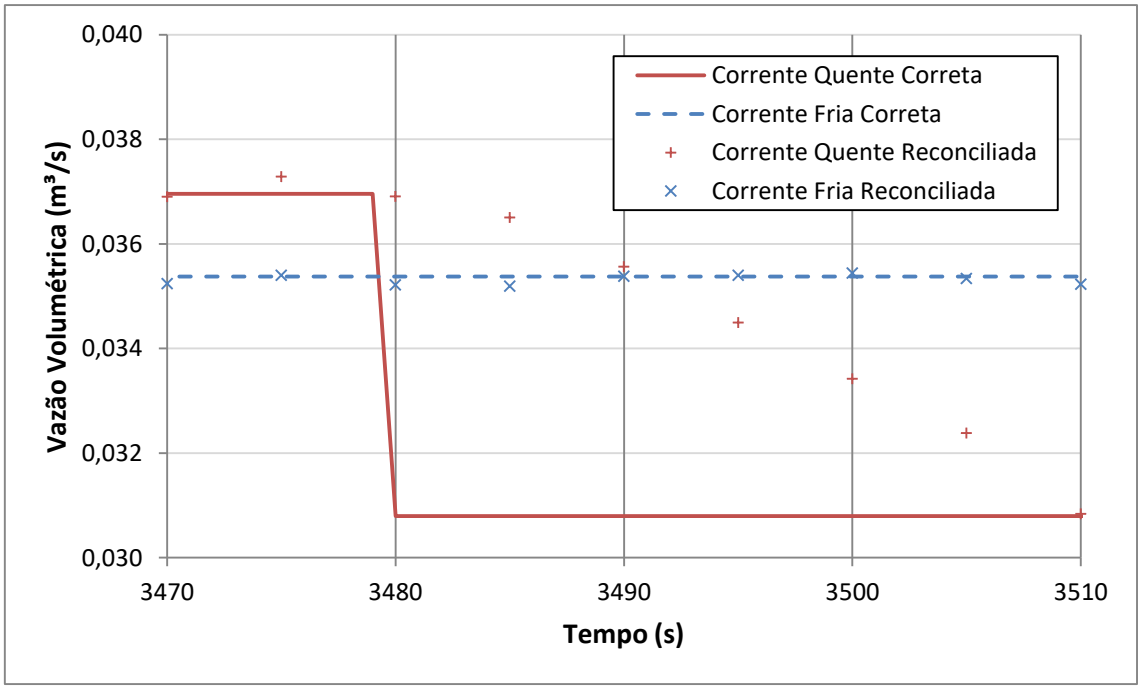

Figura 4.87 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

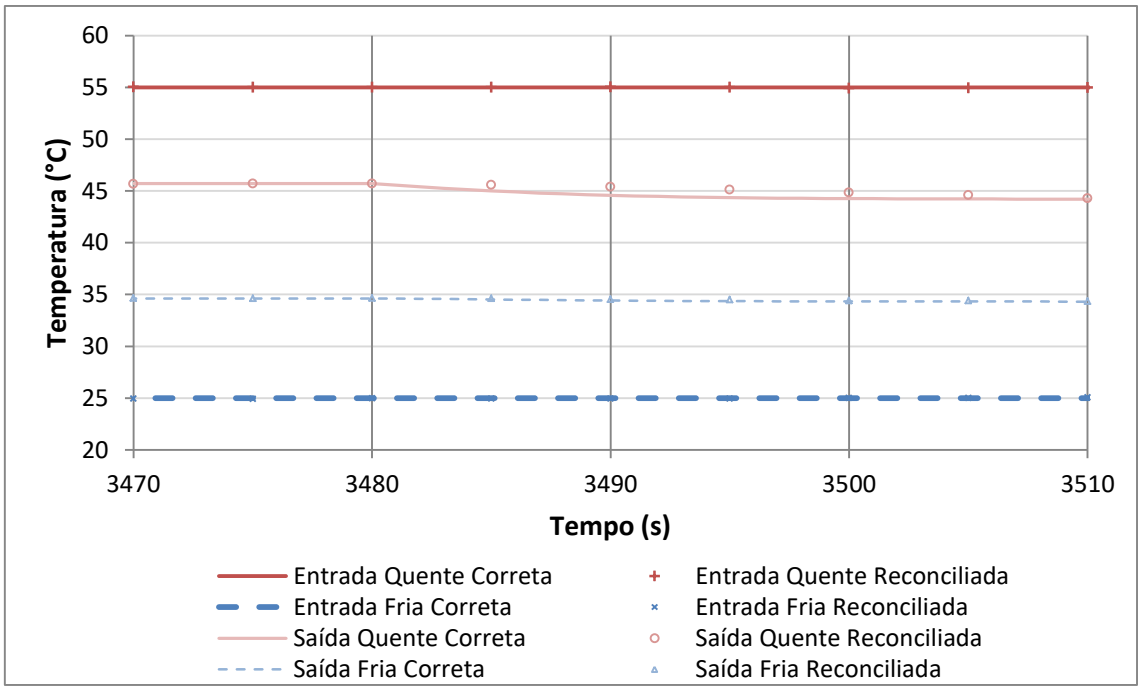

Figura 4.88 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

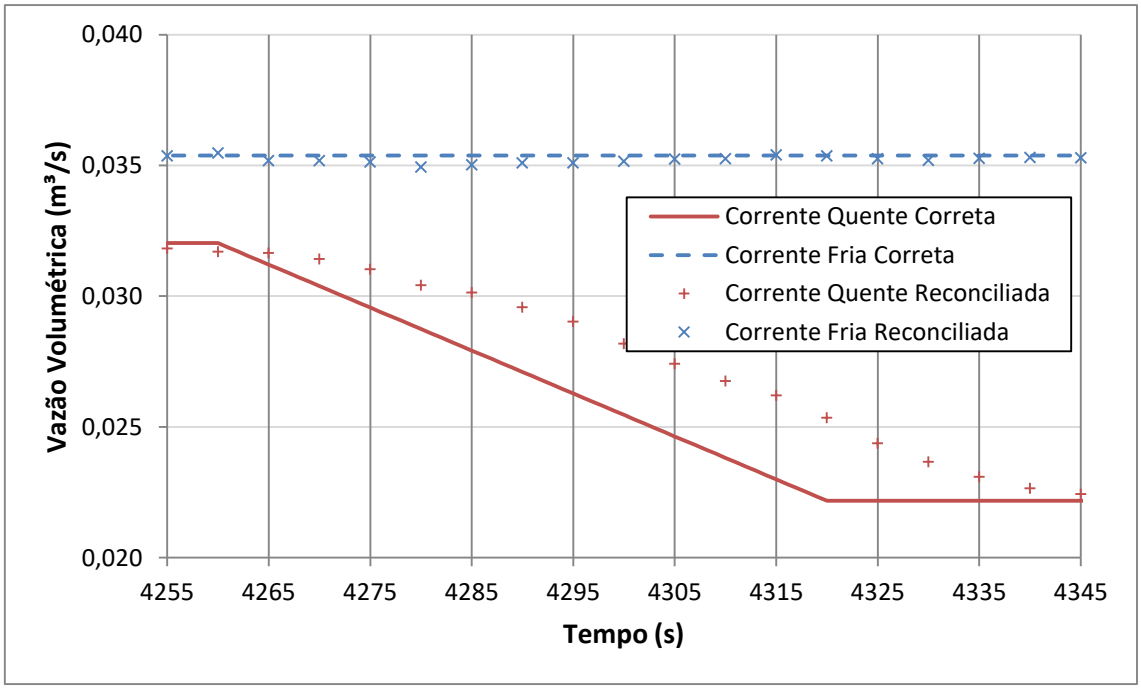

Figura 4.89 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

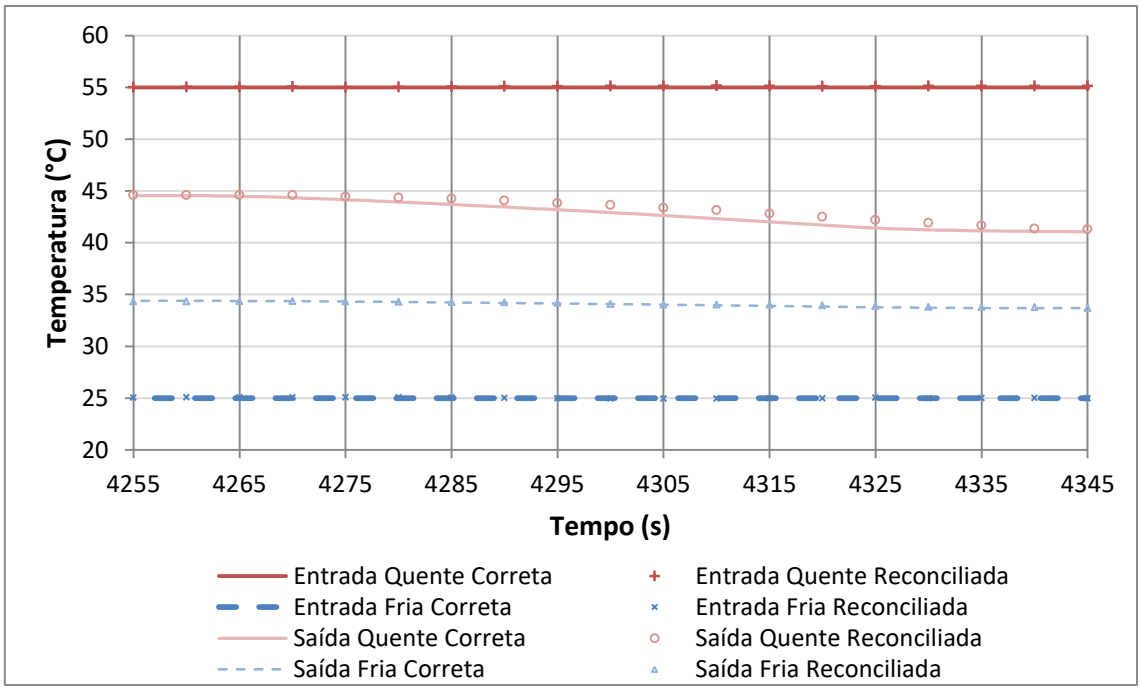

Figura 4.90 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros regulares).

4.4.5 ***Reconciliação dos Resultados com Janela Móvel sobre Erros Acentuados***

Foram utilizados os resultados da janela móvel de dados no tempo aplicada sobre os valores com erros aleatórios acentuados (caso 7 da Tabela 3.6), que considera a amostragem de dados de 5 em 5 segundos e comprimento da janela móvel de 30 segundos, para realizar a reconciliação de dados com as equações de balanço em estado estacionário. Os resultados são apresentados na Figura 4.91, Figura 4.92, Figura 4.93, Figura 4.94, Figura 4.95, Figura 4.96, Figura 4.97 e Figura 4.98.

Observou-se que os resultados reconciliados apresentam um comportamento análogo ao apresentado na Secção 4.4.4, porém com maiores desvios devido ao maiores erros nos dados utilizados para a reconciliação.

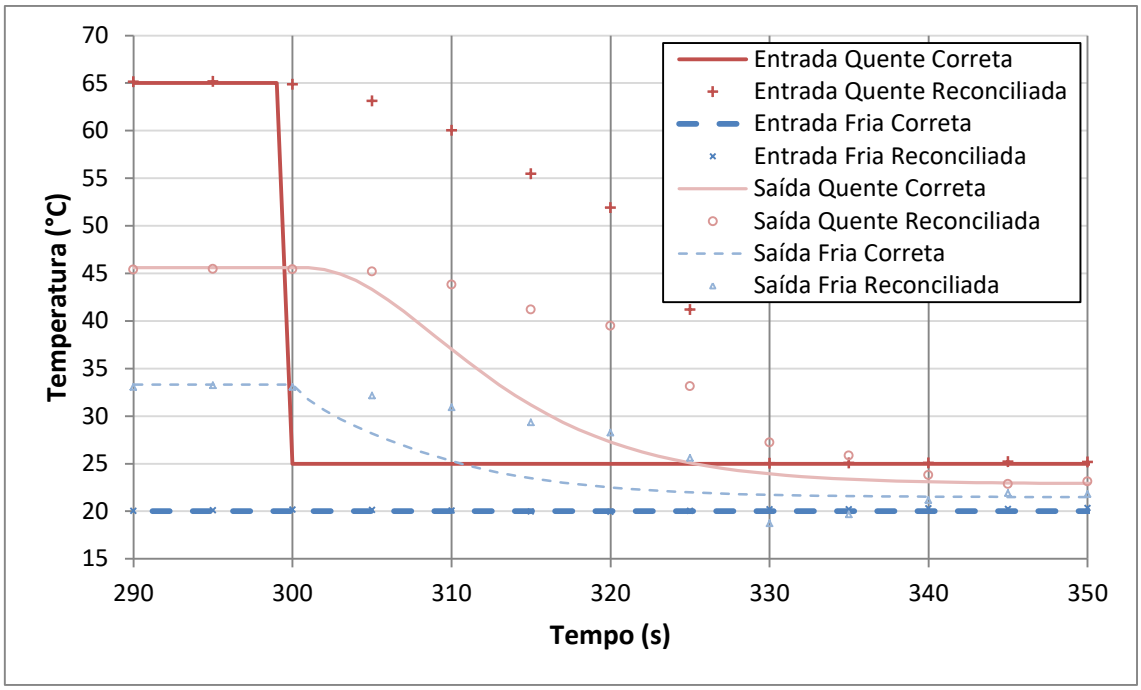

Figura 4.91 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

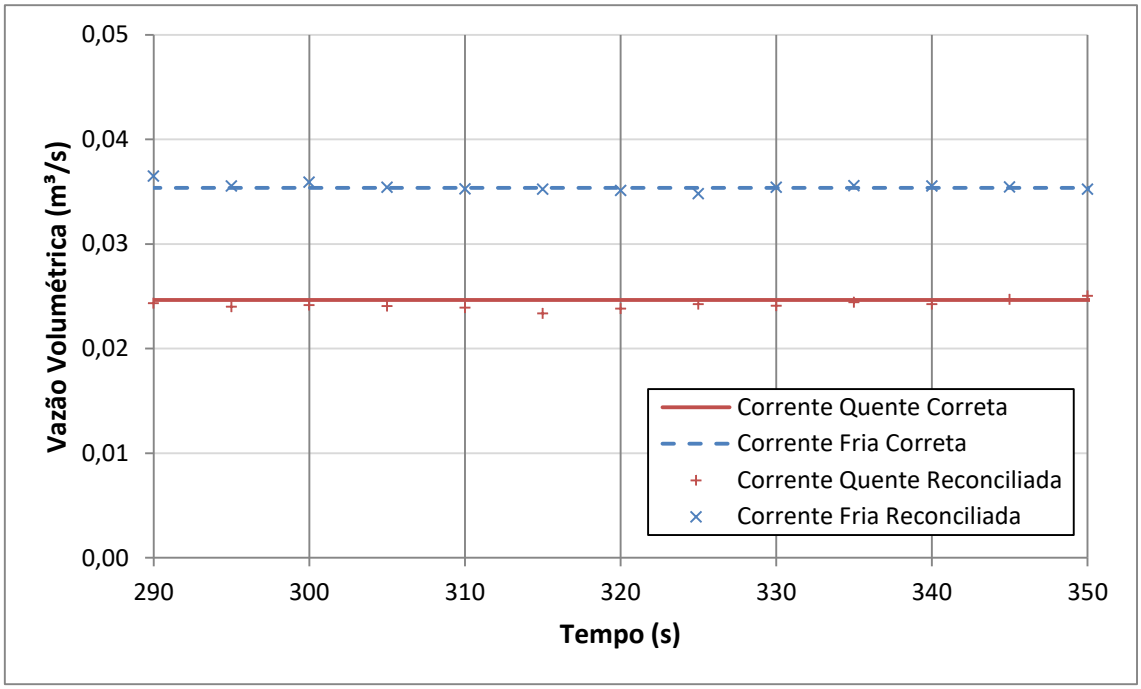

Figura 4.92 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

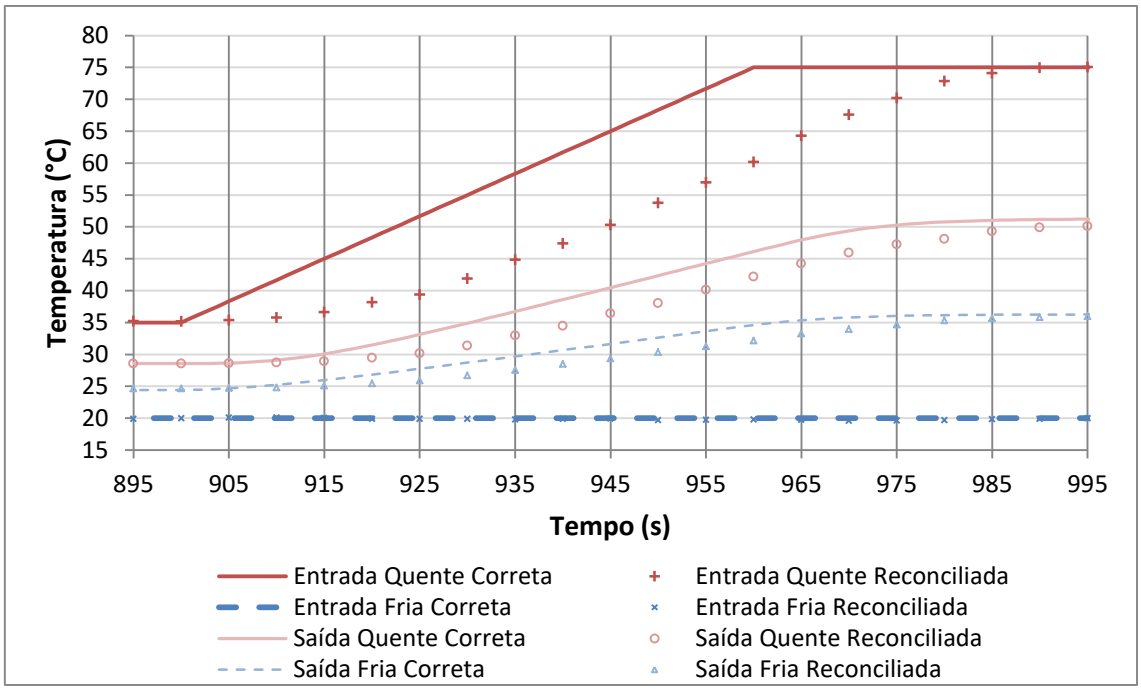

Figura 4.93 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados)

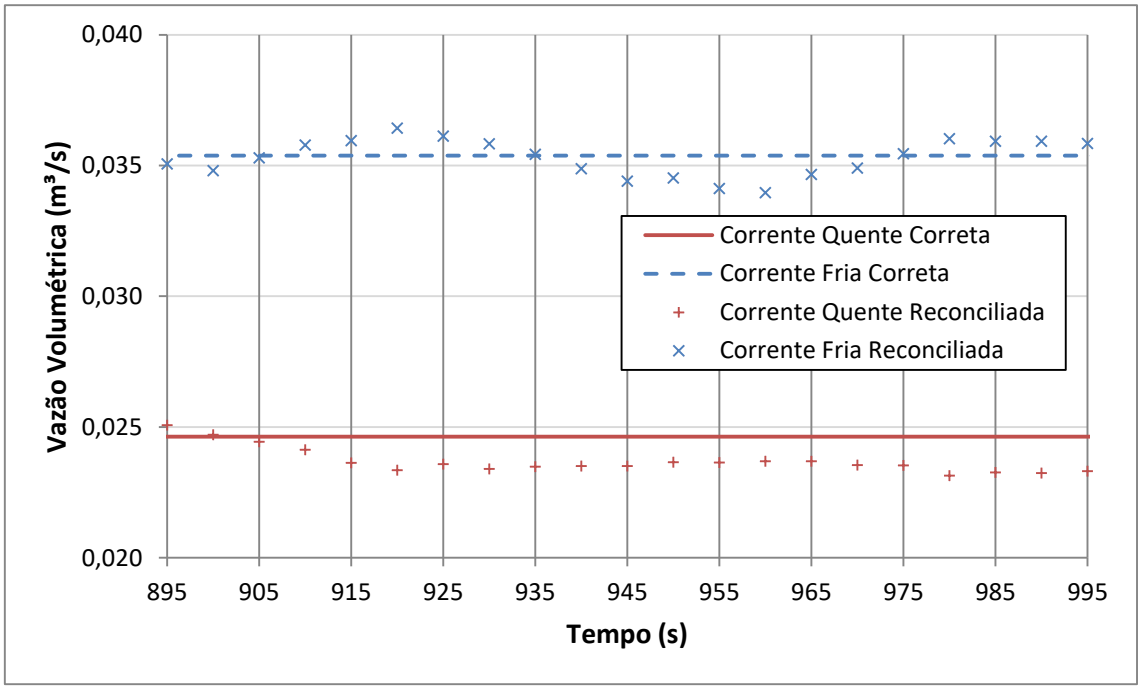

Figura 4.94 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na temperatura de entrada da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

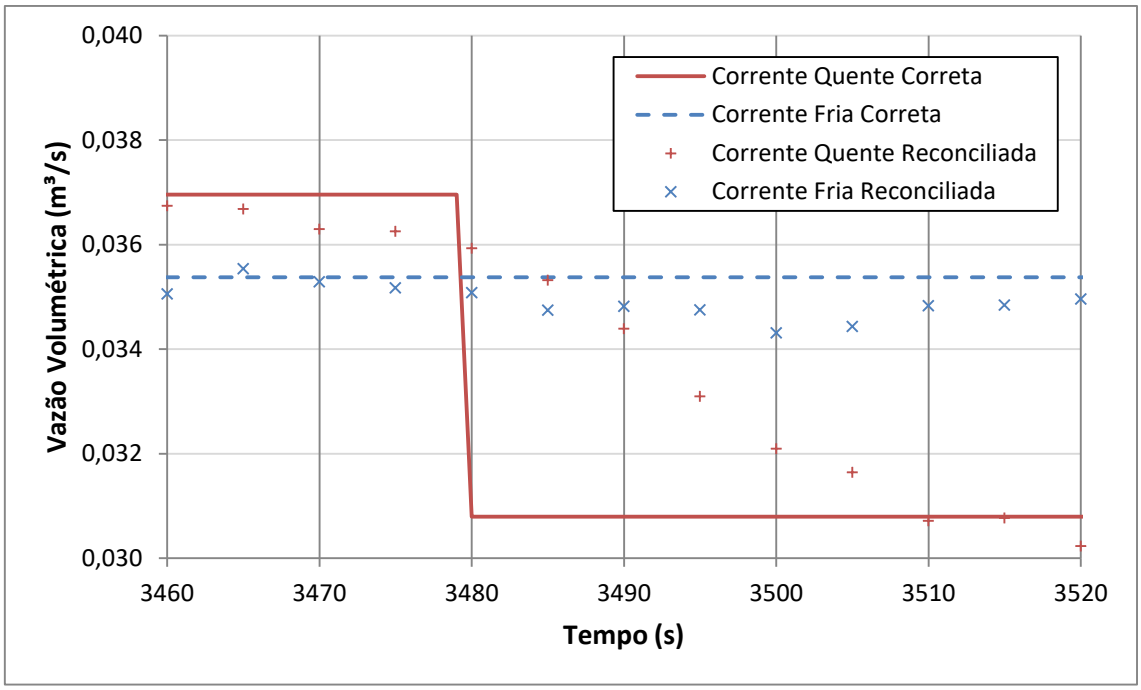

Figura 4.95 – Vazões reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

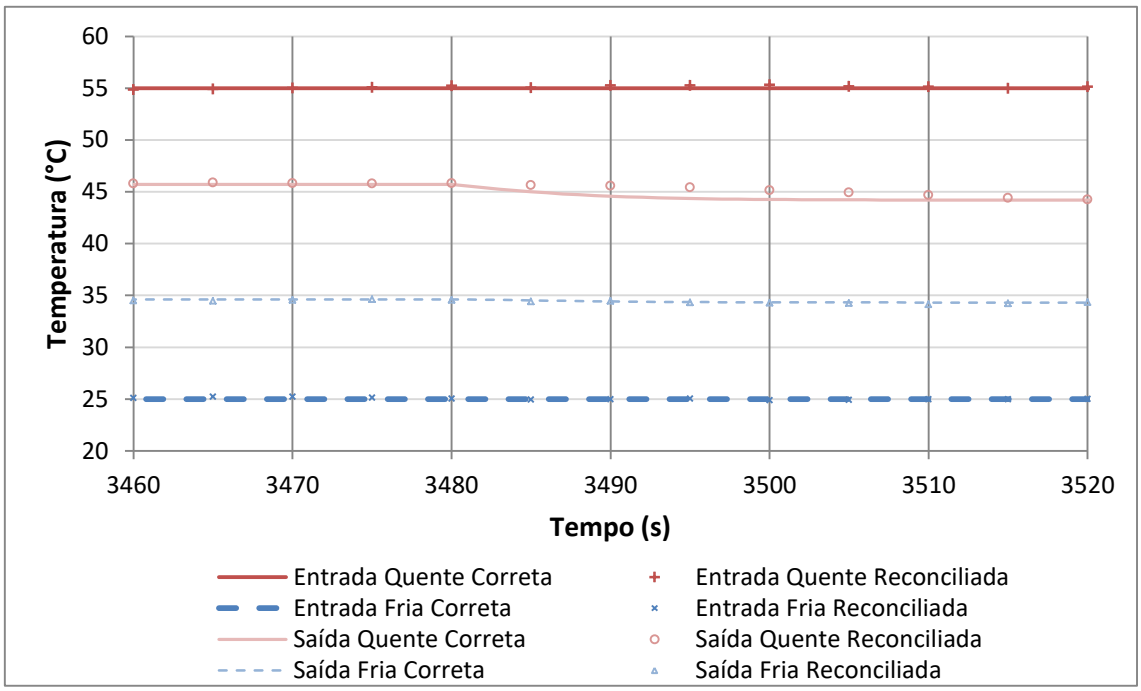

Figura 4.96 – Temperaturas reconciliadas para perturbação degrau na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

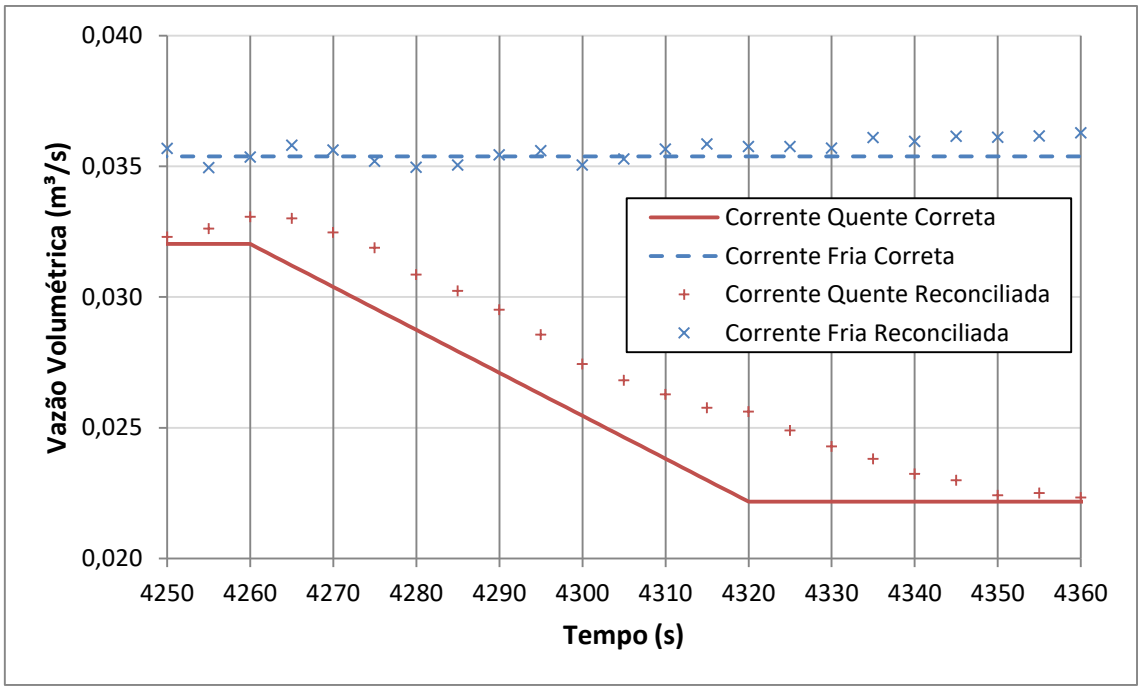

Figura 4.97 – Vazões reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

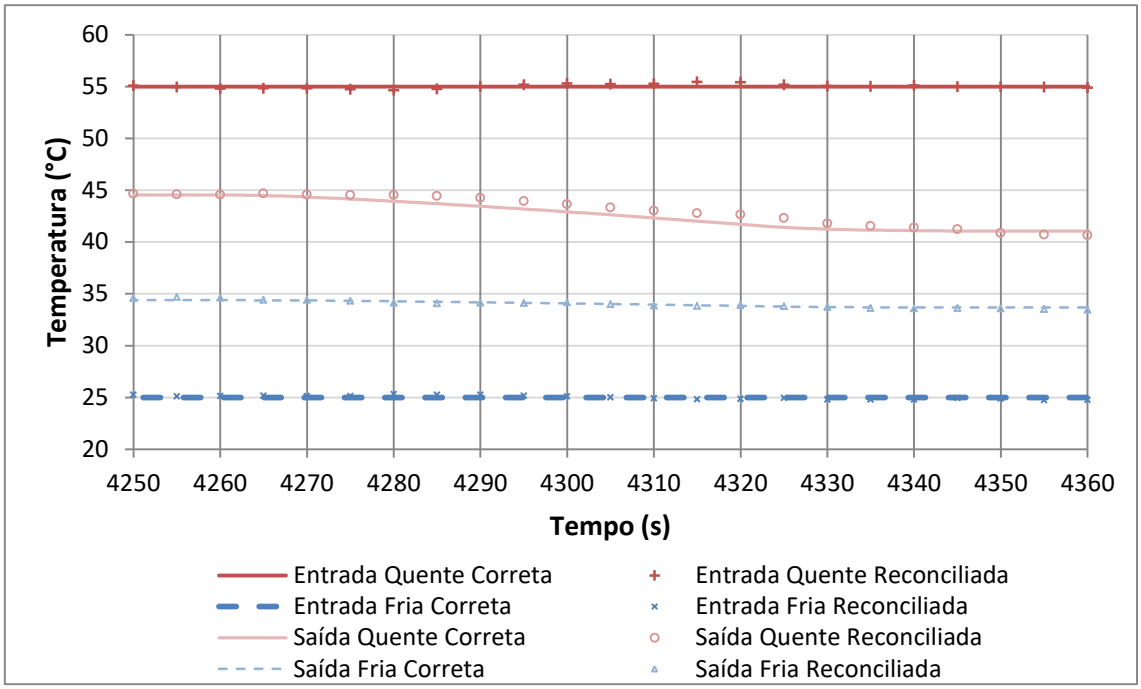

Figura 4.98 – Temperaturas reconciliadas para perturbação rampa na vazão da corrente quente (dados com janela móvel sobre erros acentuados).

4.5 Detecção de Estados Estacionários

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na detecção de estados estacionários para os dois métodos propostos, incluindo a comparação dos mesmos com um método aceito na literatura. O resultado correto esperado é determinado inicialmente, para que seja possível qualificar os resultados das metodologias sendo avaliadas.

4.5.1 Definição dos Períodos Estacionários Corretos

Foram identificados os pontos que representavam estados transientes para as temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria (Figura 4.99), bem como para as vazões volumétricas (Figura 4.100). Os períodos em que todas as variáveis encontravam-se em estado estacionário definiram os pontos em que o trocador de calor encontrava-se em estado estacionário, no entanto, quando qualquer uma das variáveis foi identificada como transiente, o trocador de calor também foi definido como em estado transiente.

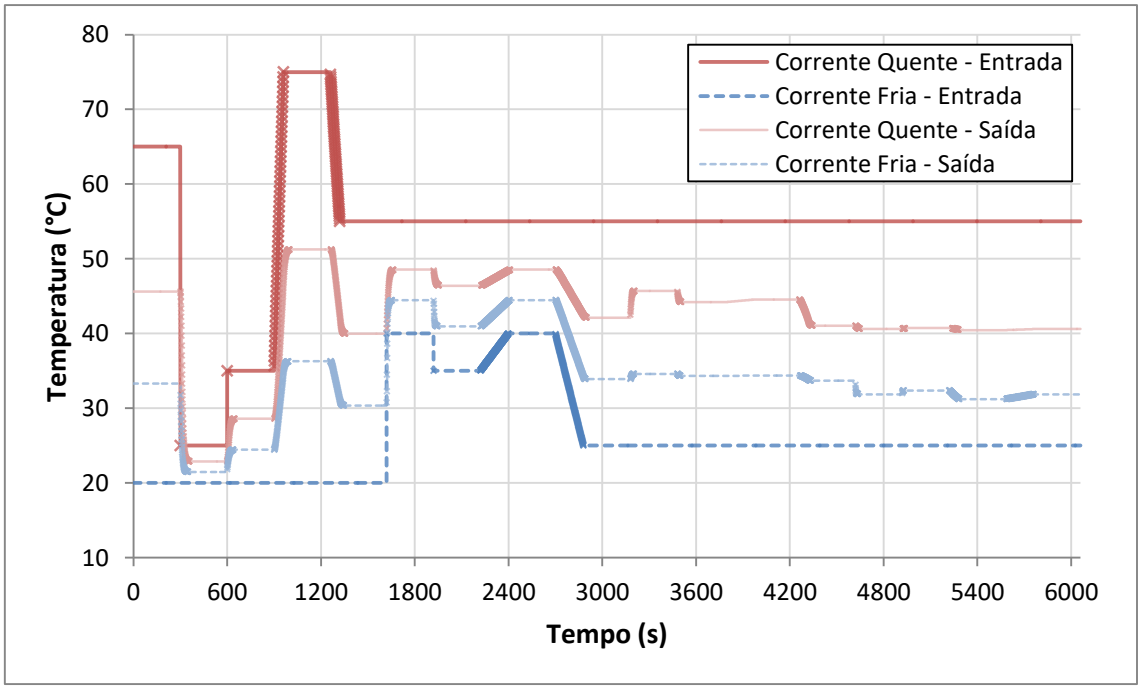

Figura 4.99 – Pontos transientes corretos para as temperaturas de entrada e saída.

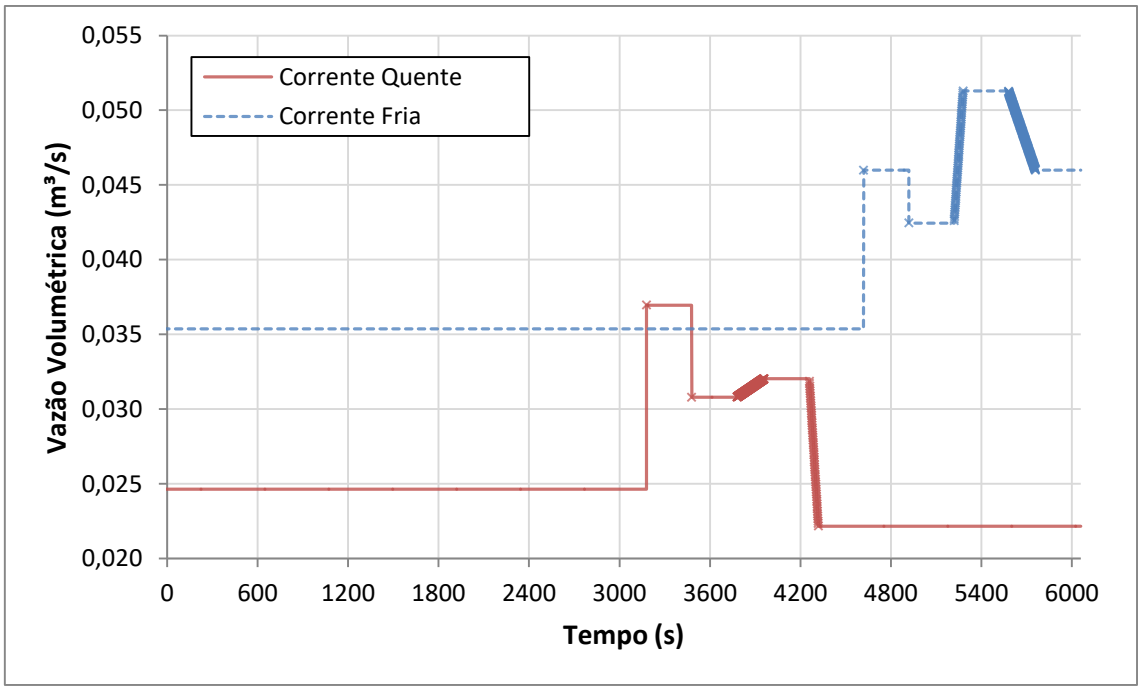

Figura 4.100 – Pontos transientes corretos para as vazões volumétricas.

Na Figura 4.101 é possível observar os períodos corretos em que o trocador de calor encontrava-se em estado estacionário (traço no ponto máximo do eixo das ordenadas), assim como as regiões de operação transiente (traço no ponto mínimo do eixo das ordenadas).

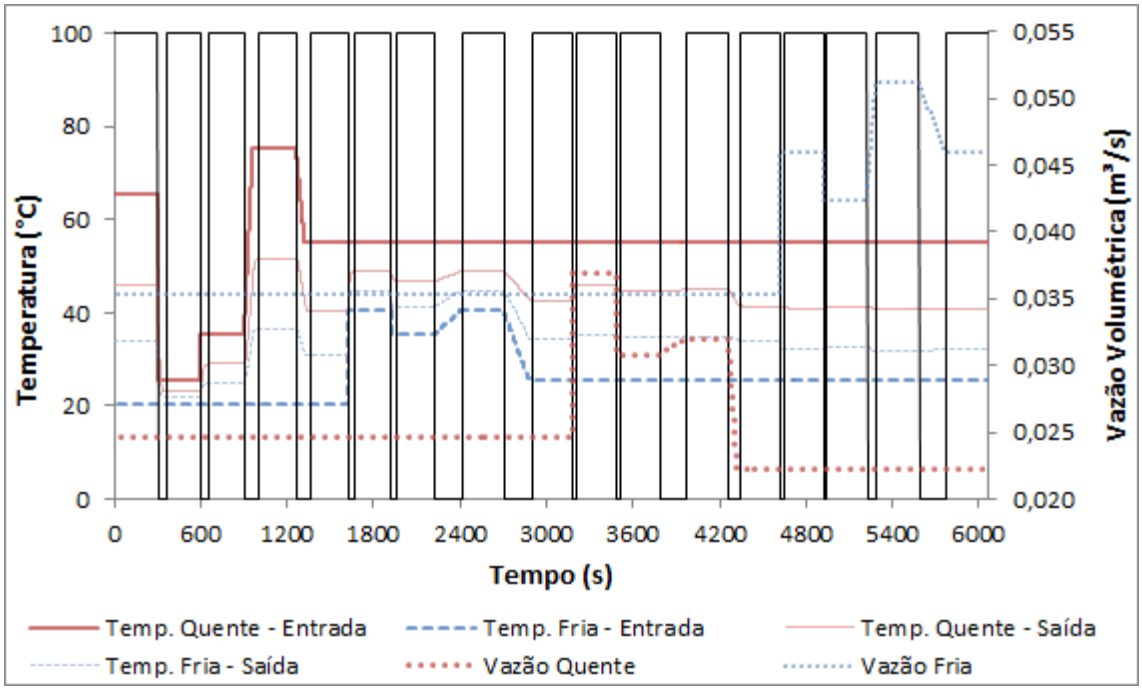

Figura 4.101 – Regiões corretas de operação em estado estacionário e estado transiente.

4.5.2 Detecção de Estados Estacionários com Método 1: Avaliação da Função Objetivo da Reconciliação de Dados

Este método baseia-se na avaliação do valor da função objetivo da reconciliação de dados em estado estacionário. Como pode ser observado na Figura 4.102 e Figura 4.103, obtidas da reconciliação de dados com os valores corretos das variáveis (sem erros aleatórios), a função objetivo apresenta valores elevados quando os dados medidos se distanciam do estado estacionário, o que possibilita a identificação de estados estacionários e transientes.

Como previamente exposto na Seção 3.4.2, o valor limite da função objetivo, que determina se os pontos encontram-se em estado estacionário ou transiente, foi otimizado para cada caso, de modo a maximizar as detecções corretas tanto de estados estacionários quanto de estados transientes.

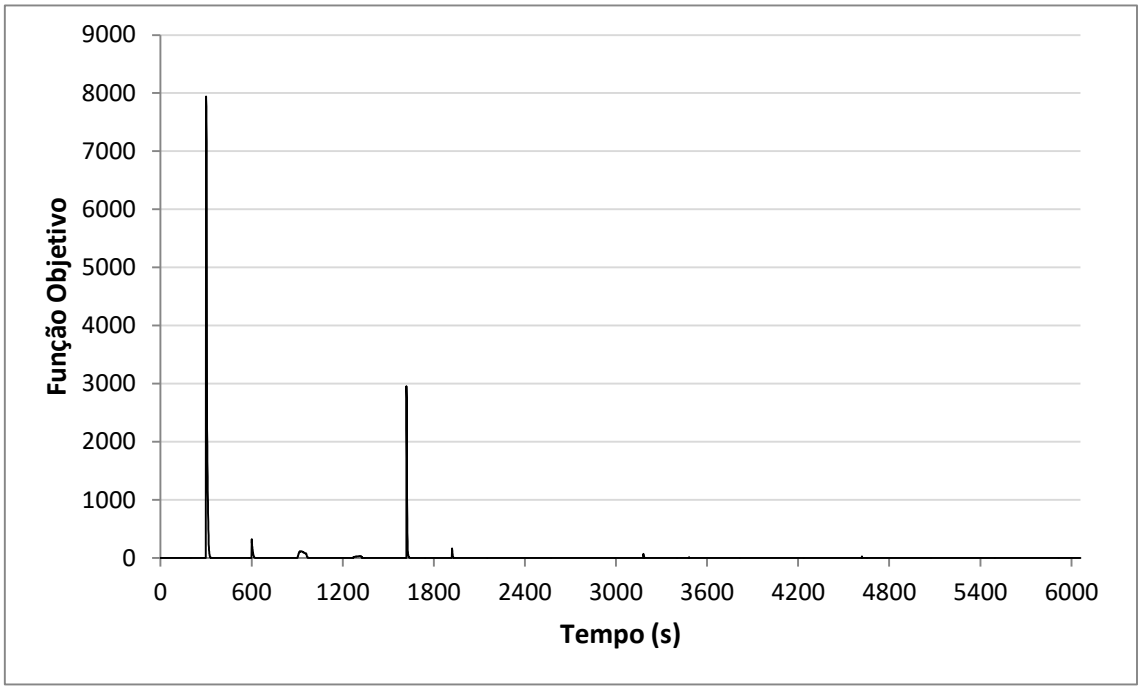

Figura 4.102 – Máximos valores da função objetivo na reconciliação de dados com valores corretos.

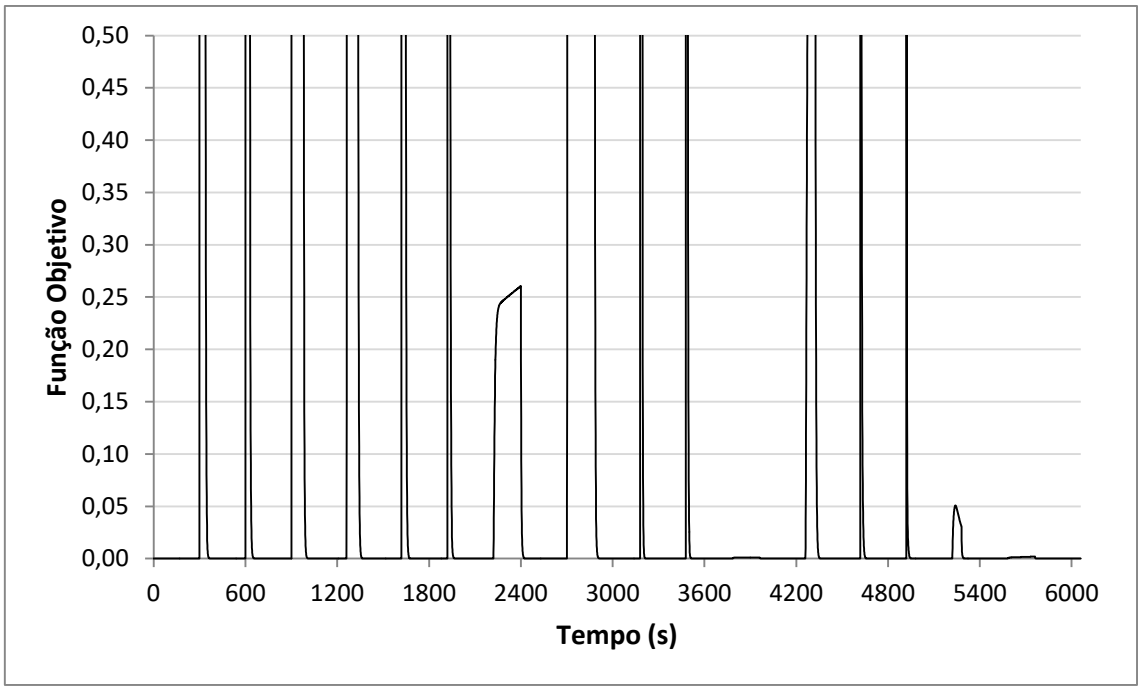

Figura 4.103 – Função objetivo da reconciliação de dados com valores corretos.

As subseções seguintes mostram os resultados obtidos quando aplicado o método 1 de detecção de estados estacionários aos resultados corretos, resultados com erros aleatórios e resultados com as janelas móveis de dados no tempo previamente descritas.

4.5.2.1 Detecção com Método 1: Resultados Corretos (sem erros aleatórios)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados sem erros aleatórios é apresentado na Figura 4.104, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,000486). A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes são bem delimitadas quando utilizados os valores corretos das variáveis (sem erros aleatórios).

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.105 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por

um “X” no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um “X” no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários apresentou bons resultados para o método 1 quando utilizados os dados sem erros aleatórios, mostrando a validade da metodologia. Os efeitos de erros aleatórios e de métodos para reduzir as incertezas dos dados de campo sobre o método 1 são avaliados nas próximas seções.

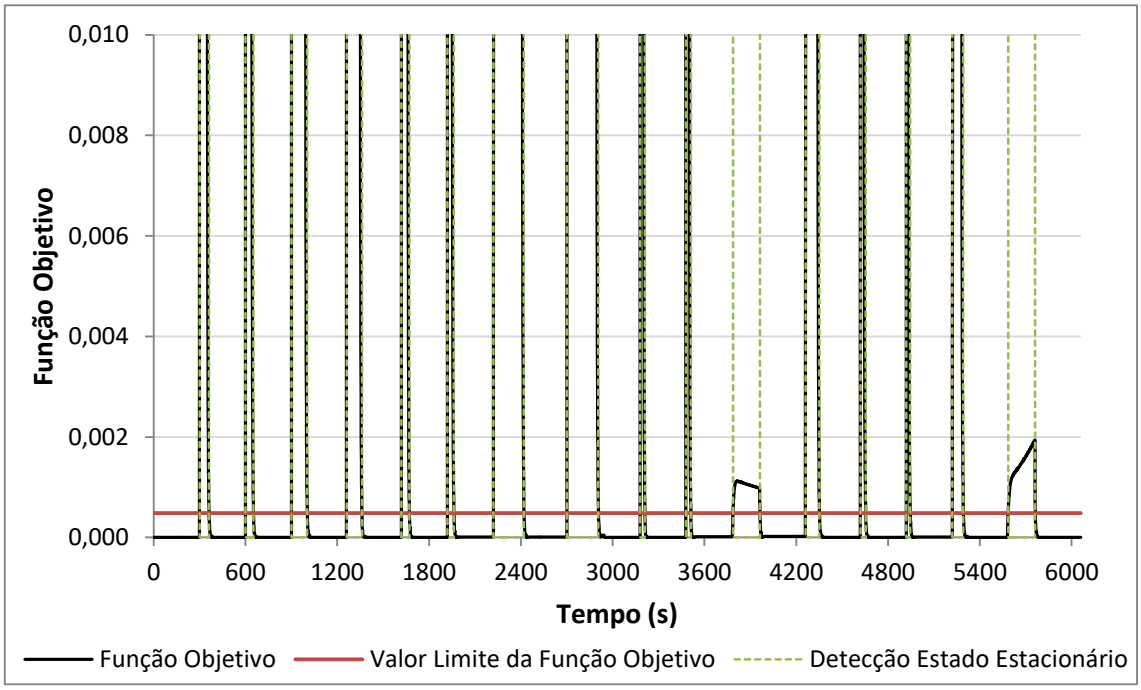

Figura 4.104 – Método 1: Função Objetivo para resultados sem erros aleatórios.

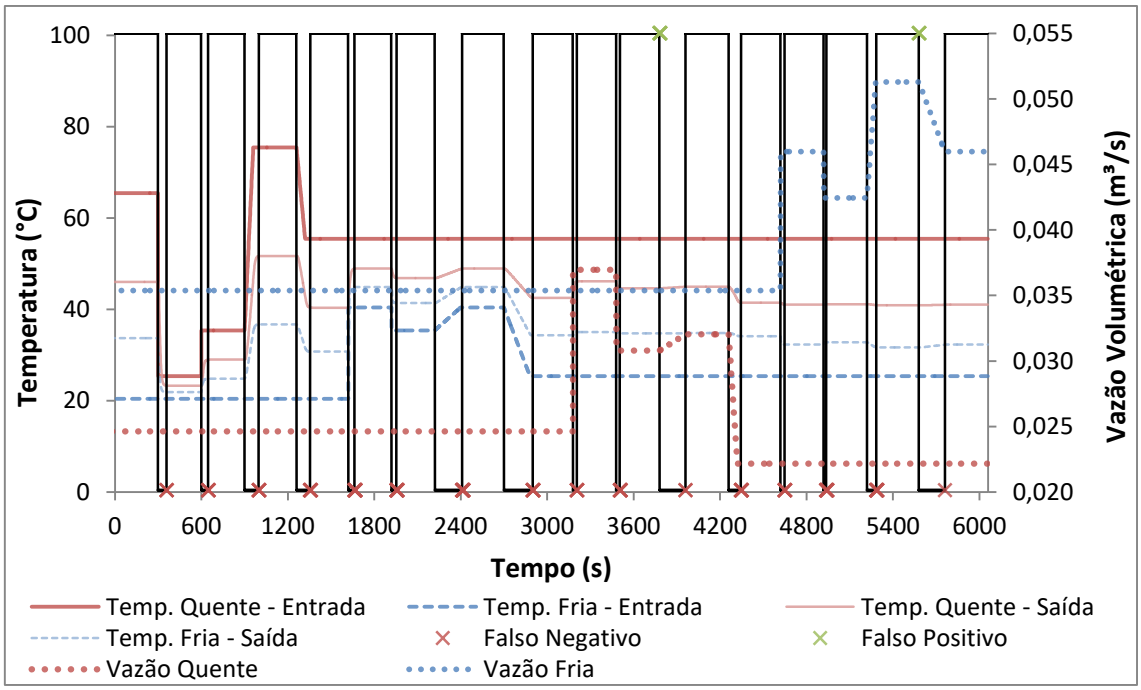

Figura 4.105 – Método 1: Erros de Detecção para resultados sem erros aleatórios.

4.5.2.2 Detecção com Método 1: Resultados Com Erros Aleatórios Regulares

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com erros aleatórios regulares é apresentado na Figura 4.106, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (1,9). A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes não são bem delimitadas quando utilizados os valores com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.107 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários apresentou resultados ruins para o método 1 quando

utilizados os dados com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

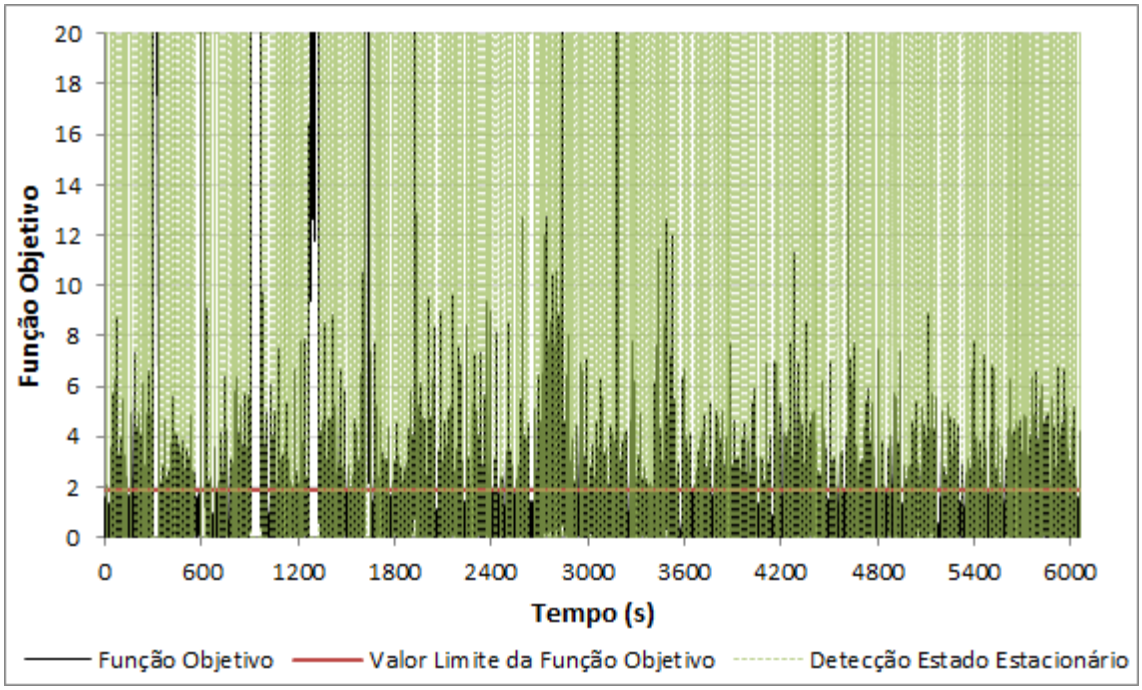

Figura 4.106 – Método 1: Função Objetivo para resultados com erros aleatórios regulares.

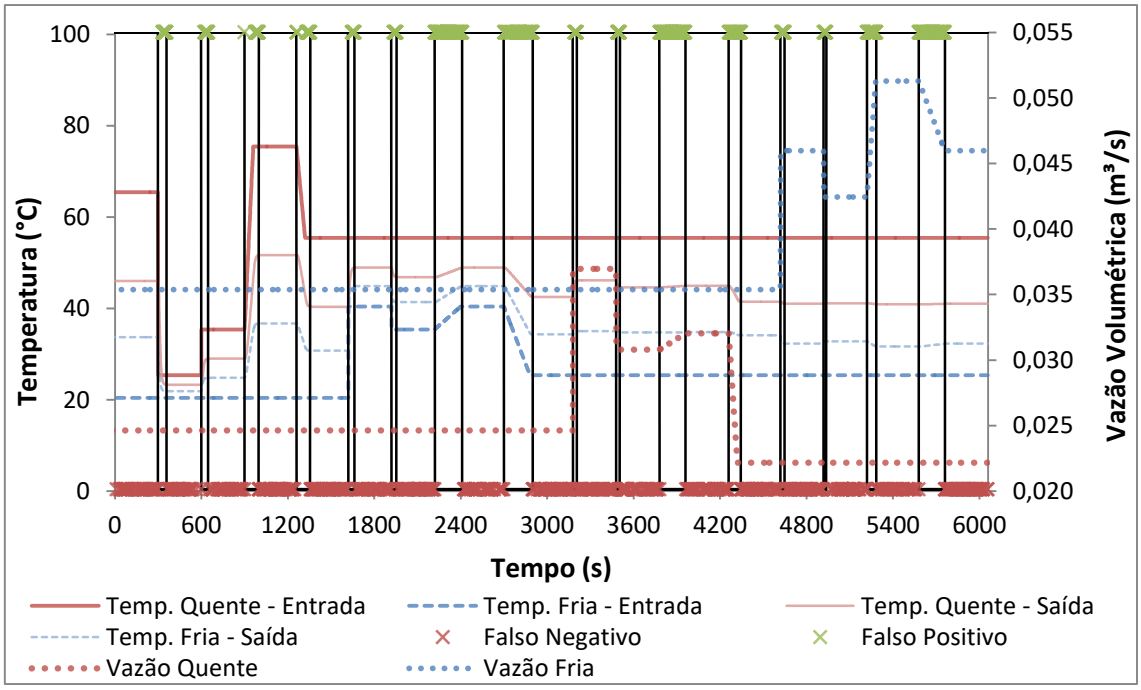

Figura 4.107 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios regulares.

4.5.2.3 Detecção com Método 1: Resultados Com Erros Aleatórios Acentuados

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com erros aleatórios acentuados é apresentado na Figura 4.108, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (2,49). A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes não são bem delimitadas quando utilizados os valores com erros aleatórios acentuados, assim como foi observado no caso de valores com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.109 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários apresentou resultados ruins para o método 1 quando utilizados os dados com erros aleatórios acentuados. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

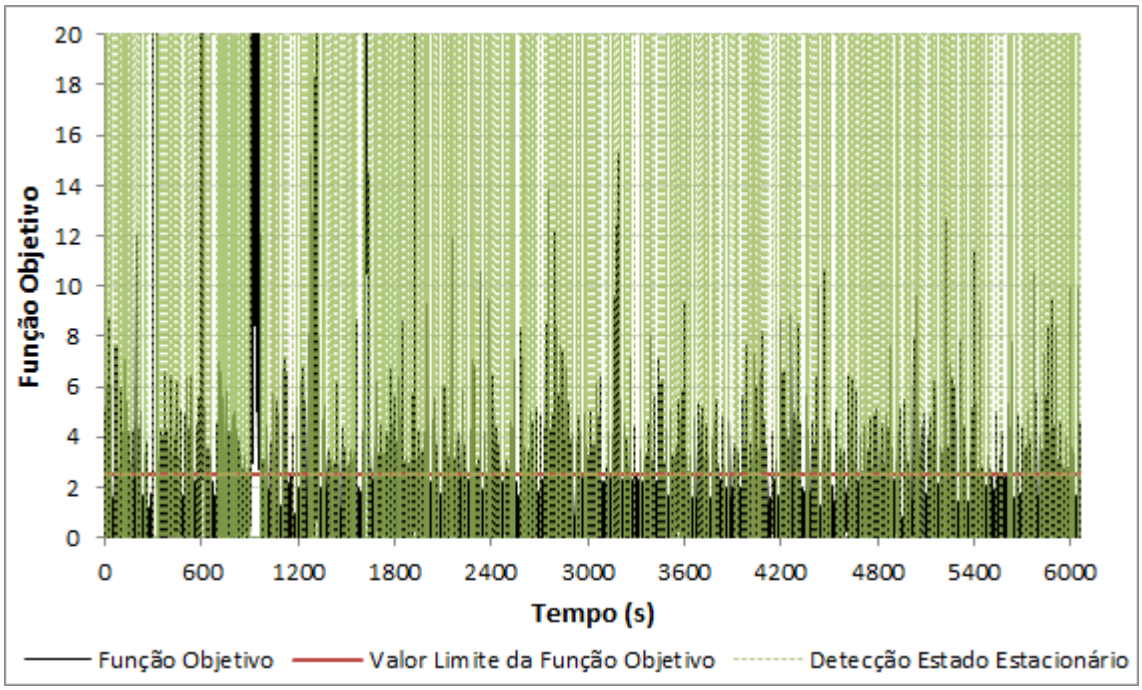

Figura 4.108 – Método 1: Função Objetivo para resultados com erros aleatórios acentuados.

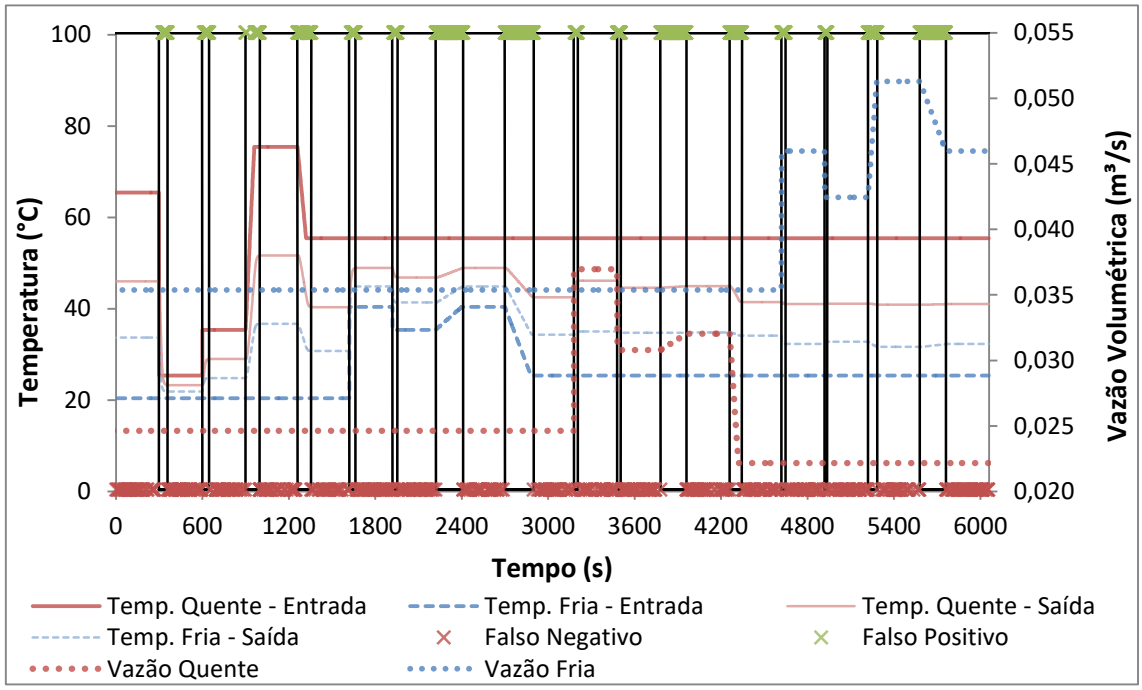

Figura 4.109 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios acentuados.

4.5.2.4 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 1)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 1) é apresentado na Figura 4.110, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,05). A janela móvel do caso 1 possui frequência de amostragem de 1 em 1 segundo, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.111 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 1) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

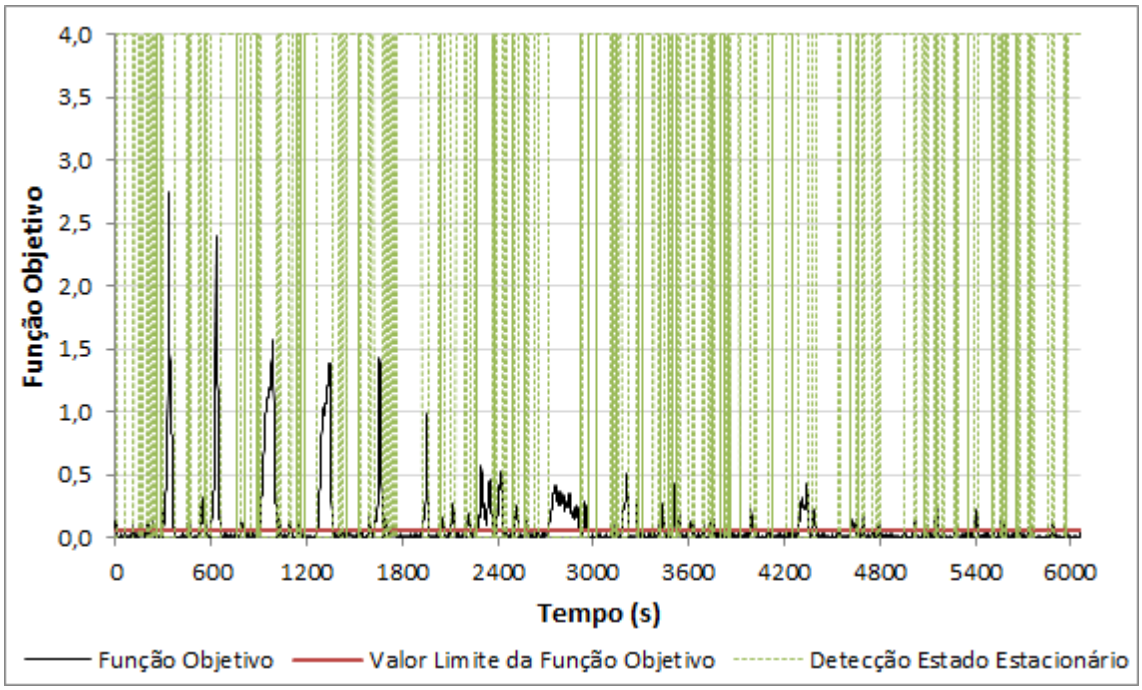

Figura 4.110 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 1).

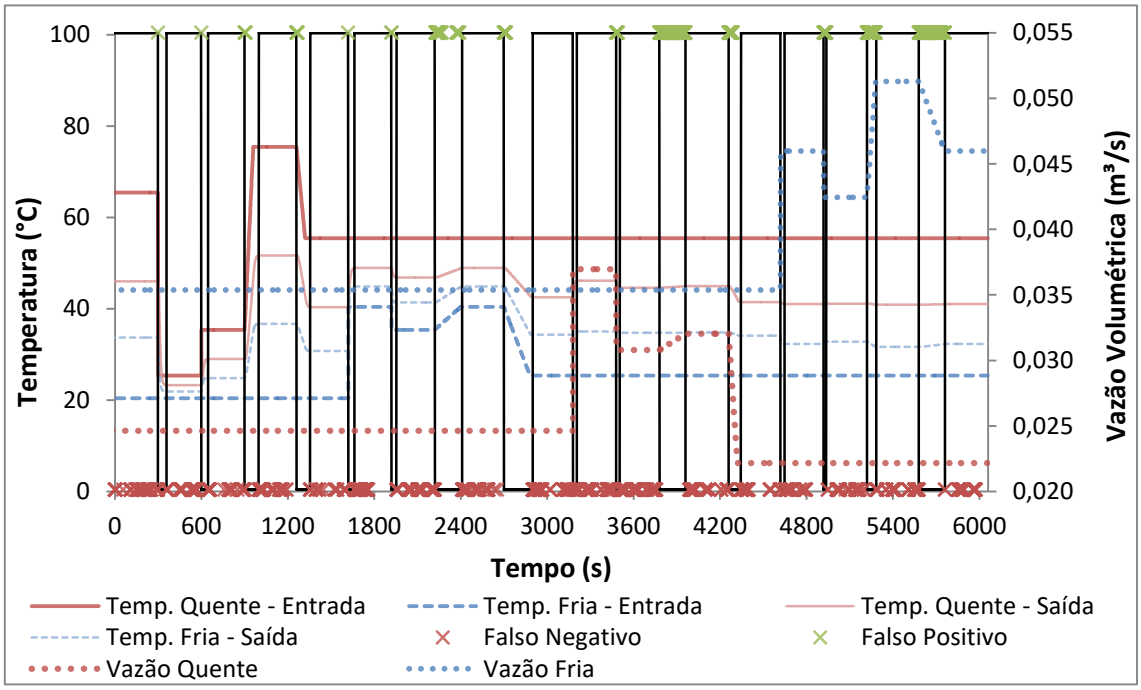

Figura 4.111 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 1).

4.5.2.5 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 2)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 2) é apresentado na Figura 4.112, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,11). A janela móvel do caso 2 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.113 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 2) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

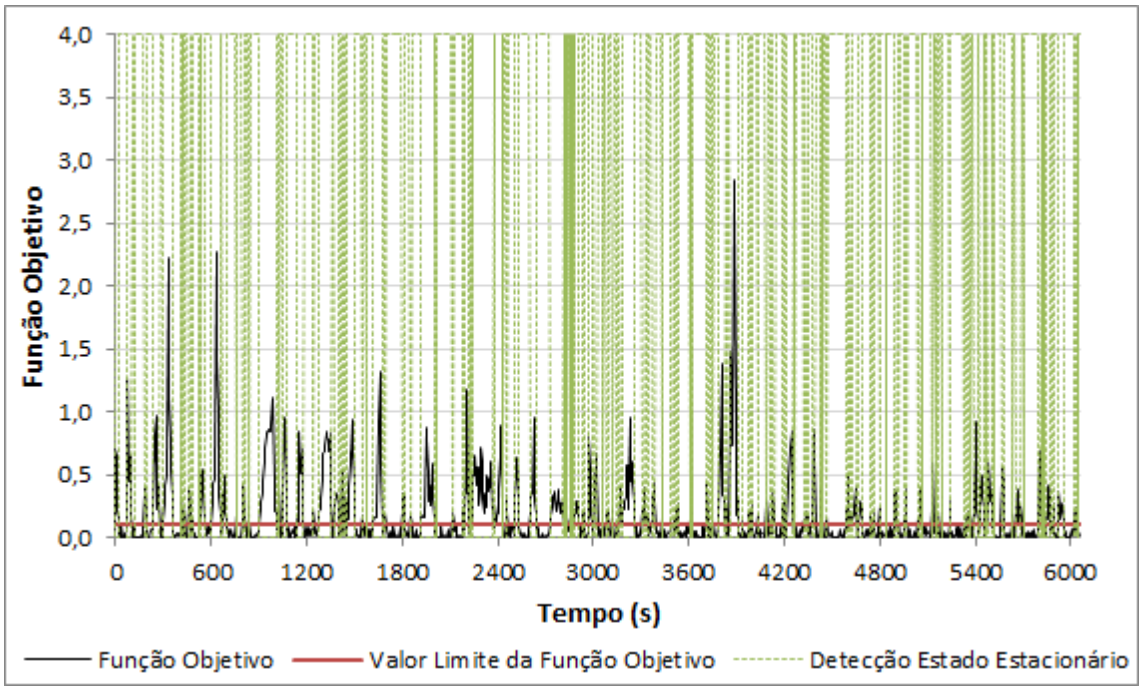

Figura 4.112 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 2).

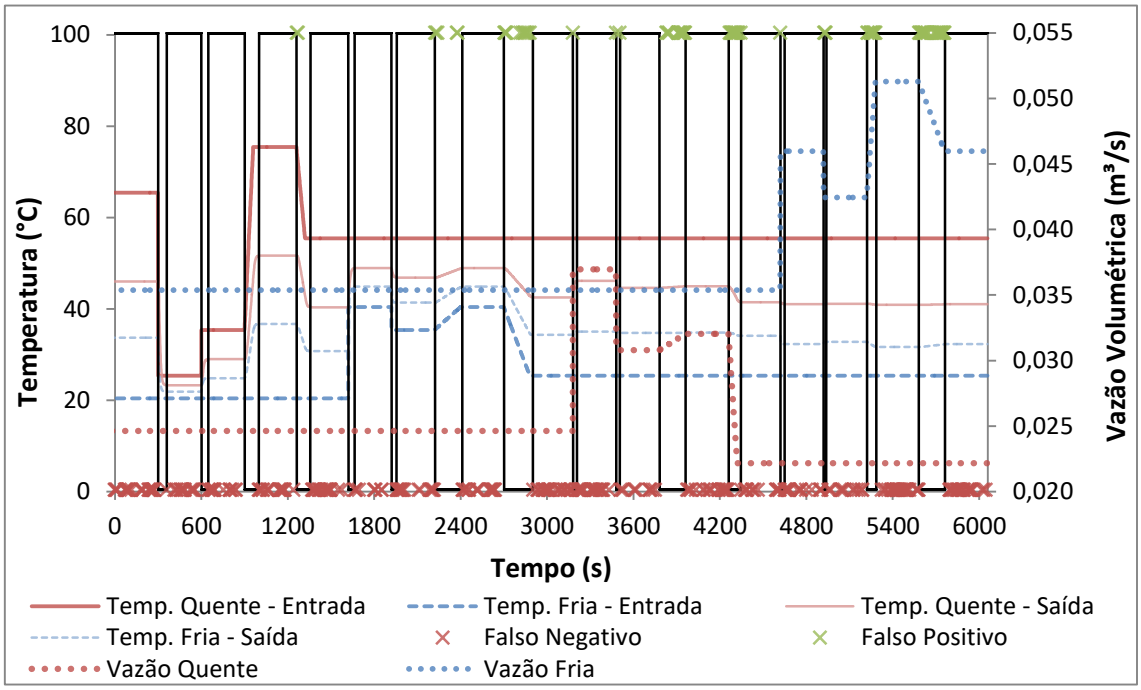

Figura 4.113 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 2).

4.5.2.6 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 3)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 3) é apresentado na Figura 4.114, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,02). A janela móvel do caso 3 possui frequência de amostragem de 15 em 15 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.115 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 3) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

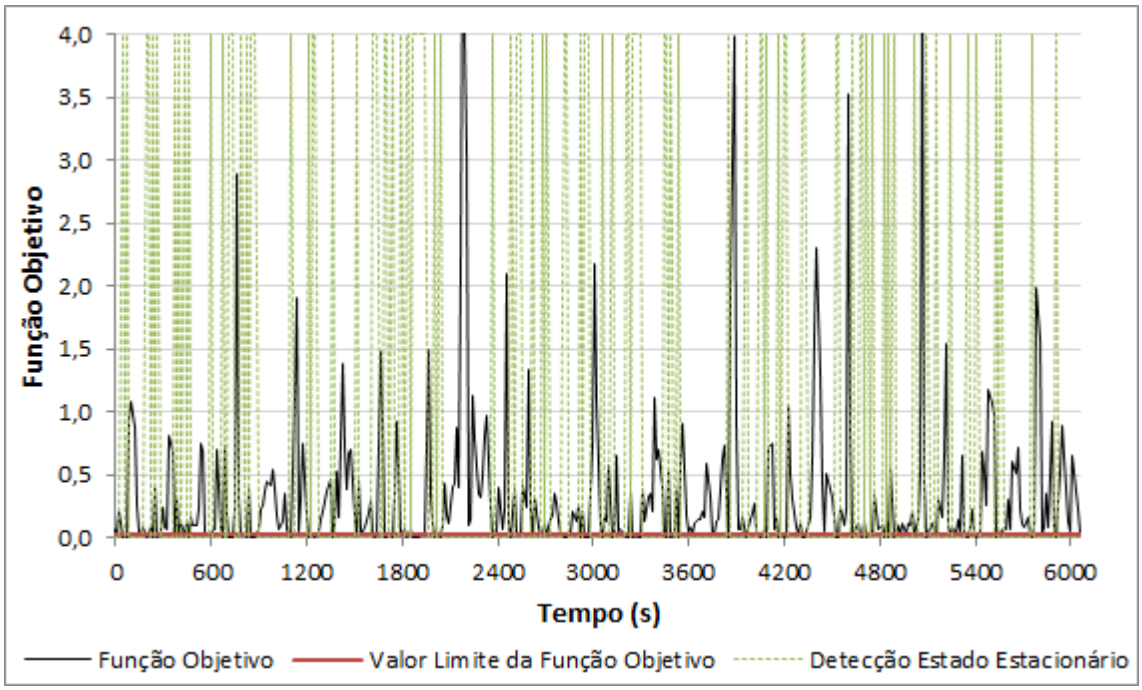

Figura 4.114 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 3).

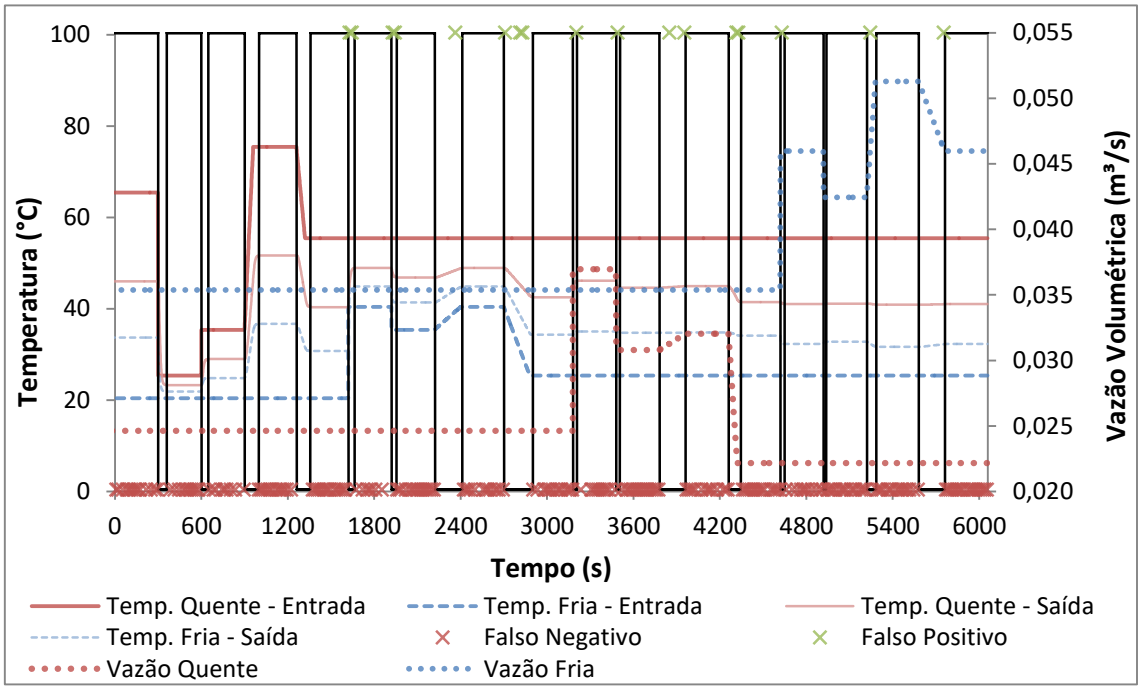

Figura 4.115 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 3).

4.5.2.7 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 4)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 4) é apresentado na Figura 4.116, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,66). A janela móvel do caso 4 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 10 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.117 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 4) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

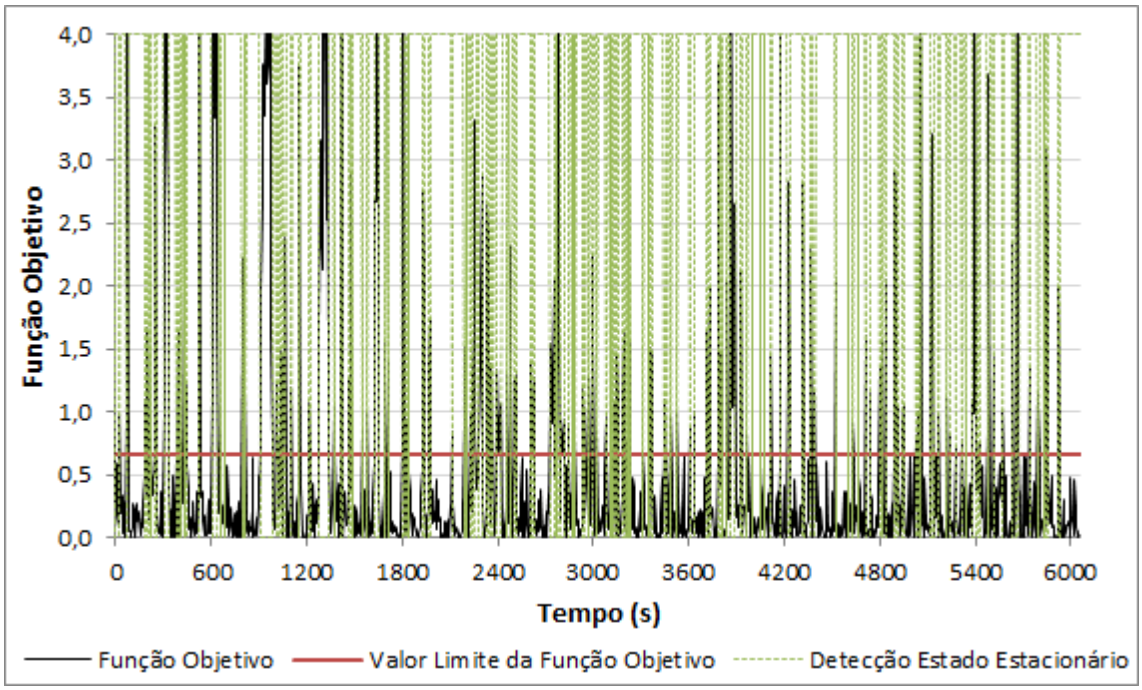

Figura 4.116 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 4).

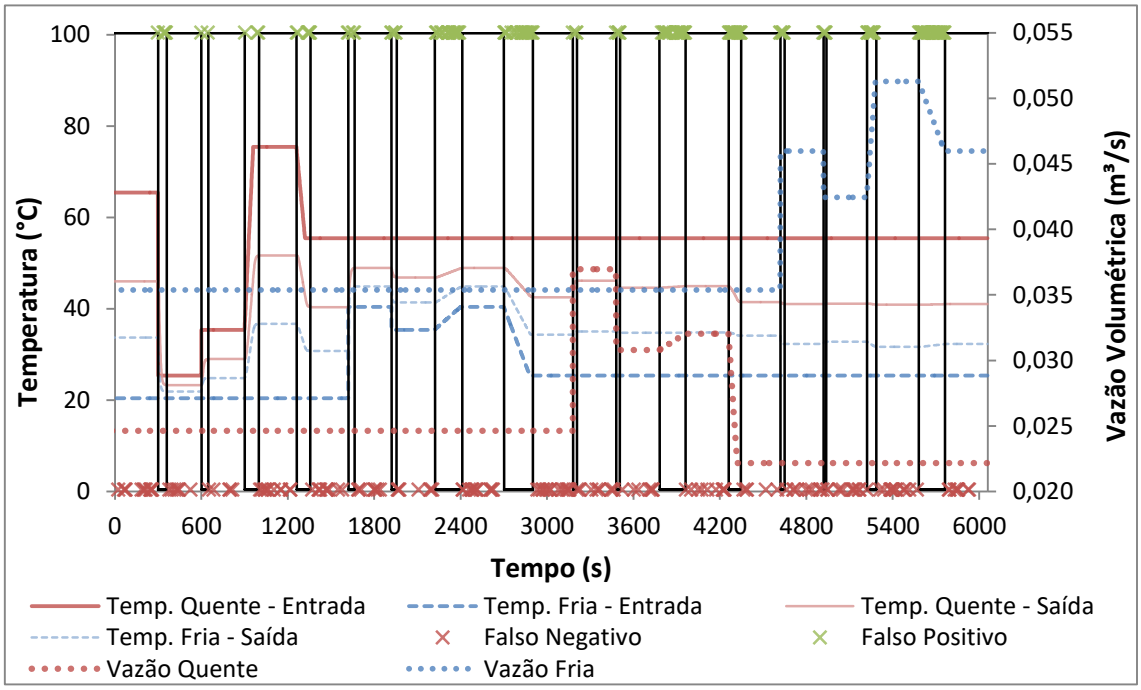

Figura 4.117 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 4).

4.5.2.8 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 5)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 5) é apresentado na Figura 4.118, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,03). A janela móvel do caso 5 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 60 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.119 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 5) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

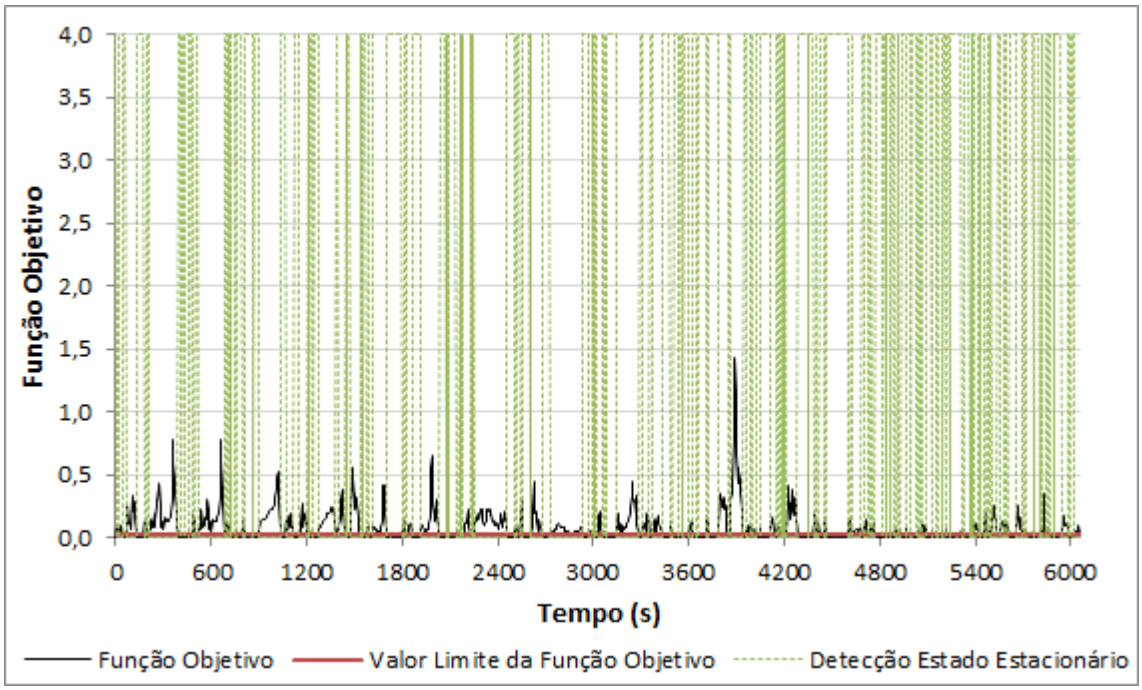

Figura 4.118 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 5).

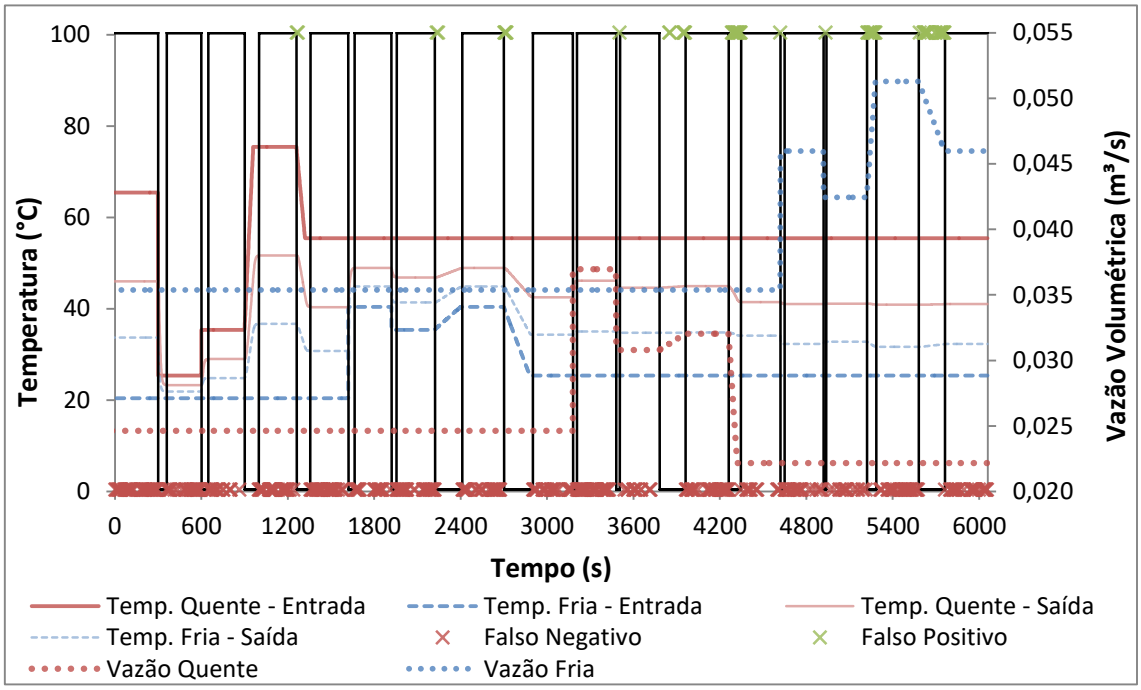

Figura 4.119 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 5).

4.5.2.9 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 6)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 6) é apresentado na Figura 4.120, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,17). A janela móvel do caso 6 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "simétrica" e erros aleatórios "regulares". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.121 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 6) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

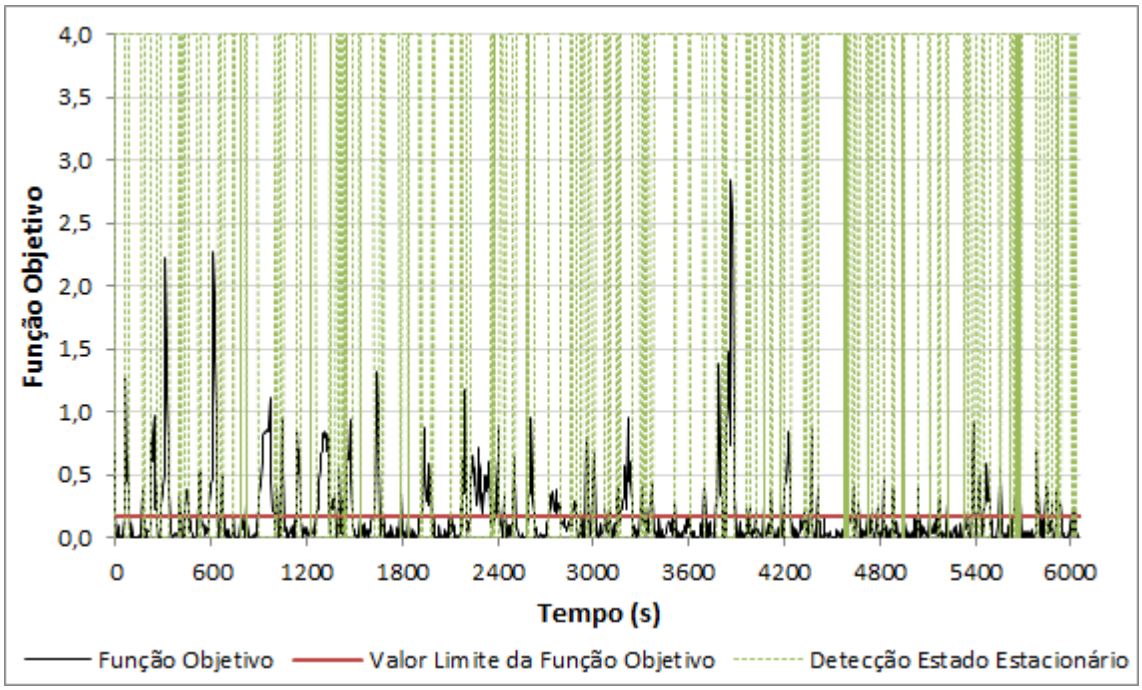

Figura 4.120 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 6).

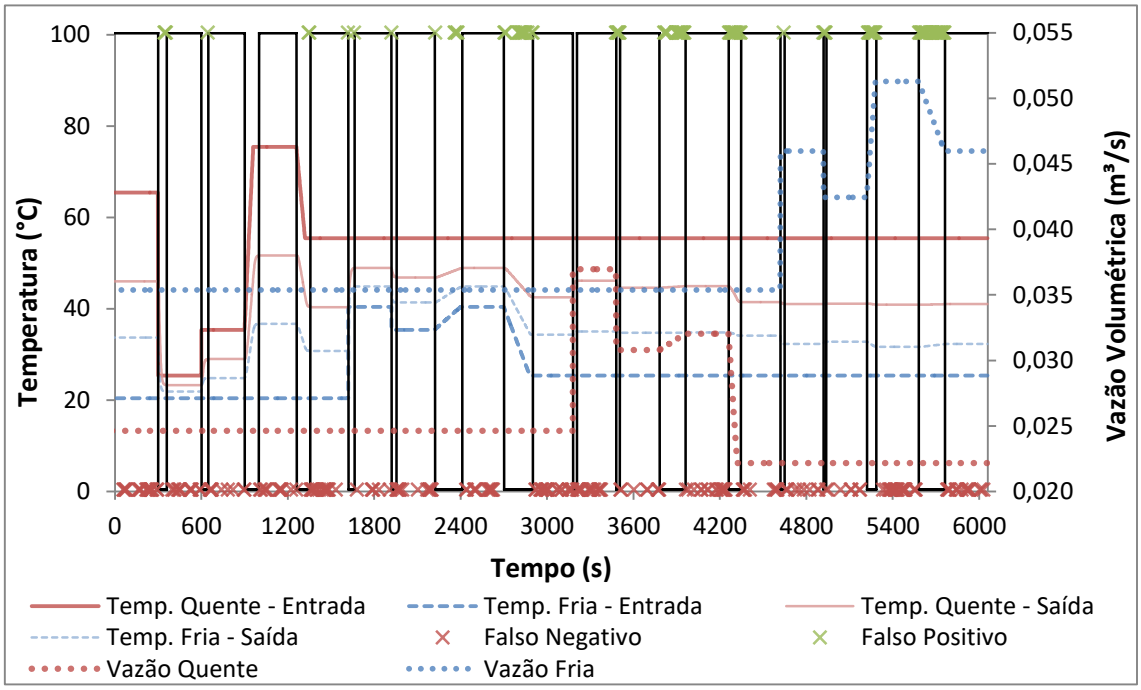

Figura 4.121 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 6).

4.5.2.10 Detecção com Método 1: Resultados Com Janela Móvel (Caso 7)

O valor da função objetivo da reconciliação utilizando dados com janela móvel (caso 7) é apresentado na Figura 4.122, bem como o valor limite da função objetivo que otimizou a detecção de estados estacionários e transientes (0,13). A janela móvel do caso 7 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "acentuados". A linha verde tracejada indica a detecção de estados estacionários quando a mesma encontra-se no mínimo valor do eixo das ordenadas, enquanto os estados transientes são indicados pela linha verde tracejada no valor máximo do eixo das ordenadas. É possível observar que as regiões estacionárias e transientes estão melhor delimitadas quando comparadas com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.123 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 1 apresentou resultados melhores quando utilizados os dados com janela móvel (caso 7) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.2.11.

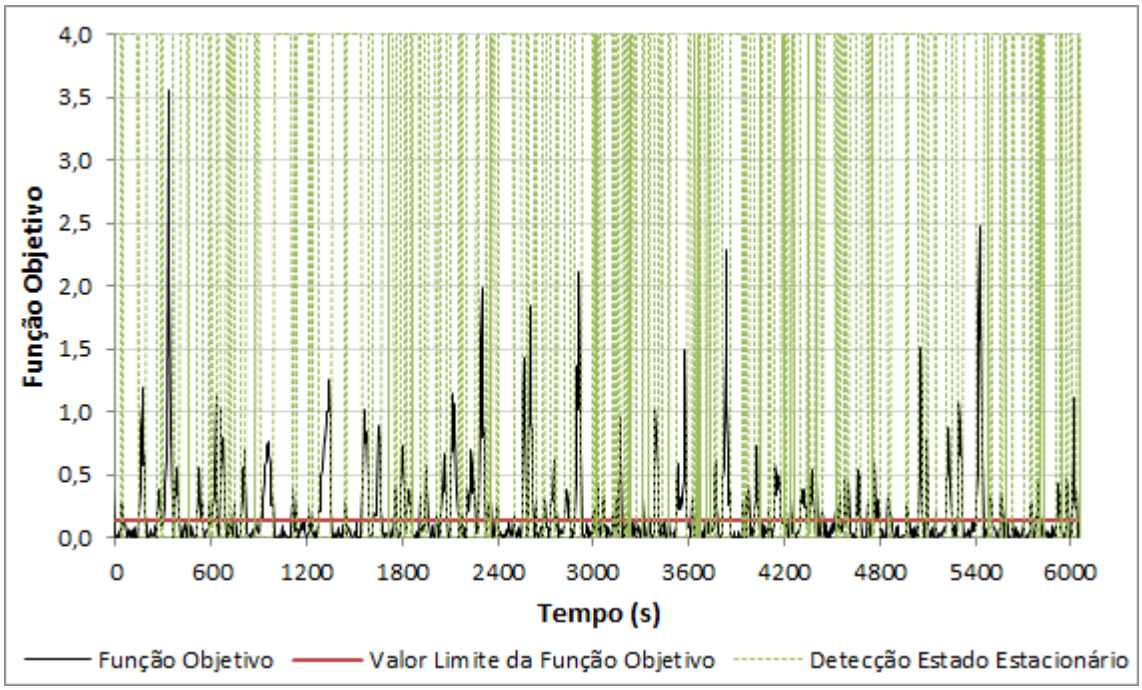

Figura 4.122 – Método 1: Função Objetivo para resultados com janela móvel (caso 7).

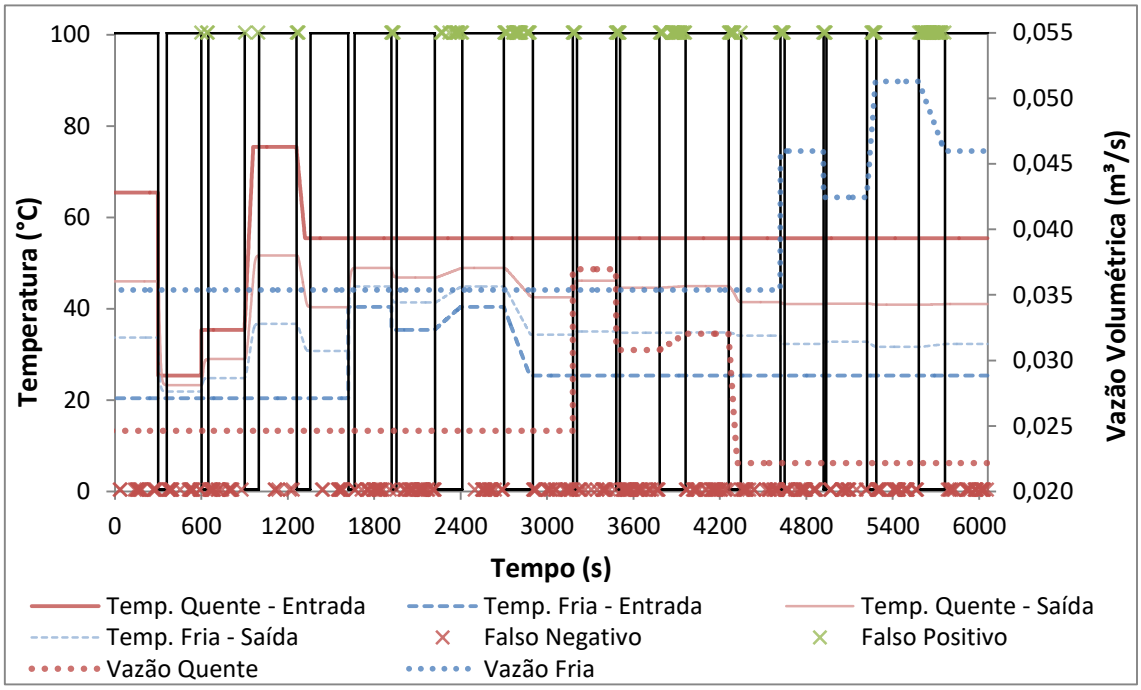

Figura 4.123 – Método 1: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 7).

4.5.2.11 Detecção com Método 1: Comparações dos Resultados

Foram comparados todos os resultados obtidos na detecção de estados estacionários com o método 1. Também foram incluídos resultados para duas metodologias hipotéticas: a primeira detecta todos os pontos como estacionários (chamada "100% estacionário") e a segunda detecta todos os pontos como transientes (chamada "100% transiente").

Pode-se concluir que a utilização do método 1 em dados sem erros de medida apresentou bons resultados, com 98% dos estados estacionários identificados e 99,3% dos estados transientes identificados, resultando em 98,3% dos pontos corretamente identificados (ver Tabela 4.24 e Figura 4.124). Os erros do tipo I ocorreram em 0,2% dos pontos, enquanto os erros do tipo II ocorreram em 6,2% dos pontos (ver Tabela 4.24 e Figura 4.125). A função objetivo maximizada durante a otimização dos parâmetros do modelo foi de 1,97 (ver Tabela 4.24 e Figura 4.126), valor próximo do máximo possível (2,0) como apresentado na Seção 3.4.2, indicando que o modelo apresentou uma boa detecção tanto dos estados estacionários quanto dos estados transientes.

Com a inclusão de erros aleatórios nos dados foi possível observar uma redução na detecção de estados estacionários e transientes (Tabela 4.24, Figura 4.124, Figura 4.125 e Figura 4.126). Para o caso de erros regulares foram identificados 83,6% dos estados estacionários, 39,8% dos estados transientes e 73,3% no geral. Para o caso de erros acentuados foram identificados 88,1% dos estados estacionários, 25,7% dos estados transientes e 73,5% no geral. Os erros do tipo I e tipo II foram de 18,1% e 57,3% respectivamente para o caso com erros regulares, enquanto que para o caso com erros acentuados os erros do tipo I foram de 20,6% e os erros do tipo II foram de 60,0%. A função objetivo maximizada durante a otimização dos parâmetros do modelo foi de 1,23 para erros regulares e 1,14 para erros acentuados. É importante notar que, apesar dos valores superiores obtidos no percentual de identificação de estados estacionários e na identificação geral com os dados contendo erros acentuados, isso apenas indica que o algoritmo apresentou uma maior tendência de identificar os pontos como estados estacionários, o que de forma geral resultou em mais erros do tipo I e tipo II, bem como um menor valor da função objetivo. Conclui-se que erros maiores nos dados resultam em piores resultados na detecção de estados estacionários e transientes.

A aplicação de uma janela móvel aos dados com erros possibilitou a melhora dos resultados obtidos pelo método 1. Os resultados para o caso 1 foram os melhores obtidos dentre as avaliações com janelas móveis, representando a situação com erros

regulares, dados amostrados de 1 em 1 segundo, com comprimento da janela de 30 segundos, utilizando apenas dados passados dentro da janela. Foram identificados 79,1% dos estados estacionários, 65,7% dos estados transientes e 76,0% no geral. Os erros do tipo I e tipo II foram de 11,8% e 50,8%, respectivamente. A função objetivo maximizada durante a otimização dos parâmetros do modelo foi de 1,45. Conclui-se que a inclusão da janela móvel (caso 1) resultou em melhorias significativas para o método 1, elevando a identificação de transientes, reduzindo os erros do tipo I e tipo II, bem como aumentando o valor da função objetivo da otimização dos parâmetros do modelo.

A comparação das janelas móveis, casos 1, 2 e 3, possibilita avaliar o impacto da redução da frequência de amostragem dos dados nos resultados de identificação de estados estacionários. Foi possível concluir que os resultados pioram com a redução da frequência de amostragem de 1s (caso 1) para 5s (caso 2) e de 5s para 15s (caso 3). É importante observar que os resultados obtidos para o caso 3 são piores que aqueles obtidos sem o uso de janelas móveis, indicando assim que os resultados do método 1 com uso de janelas móveis apresenta forte dependência da frequência de amostragem.

Comparando-se as janelas móveis, casos 4, 2 e 5, avalia-se o impacto do comprimento da janela móvel nos resultados de identificação de estados estacionários. Não foi possível observar melhora ou piora significativa nos resultados obtidos ao aumentar o comprimento da janela móvel de de 10s (caso 4) para 30s (caso 2) e para 60s (caso 5).

A variação do tipo de janela móvel entre média do tipo “passado” e média do tipo “simétrica” foi realizada entre os casos 2 e 6, respectivamente. Assim como foi concluído para a avaliação do impacto do comprimento da janela móvel na detecção de estados estacionários, a variação do tipo de média também não apresentou mudanças significativas nos resultados do método 1.

Foi aplicada a janela móvel nos dados com erros acentuados (caso 7), sendo que os resultados obtidos não demonstraram significativo ganho na aplicação da janela móvel. Houve uma redução dos erros tipo I, enquanto os erros do tipo II aumentaram. O valor da função objetivo do método de otimização dos parâmetros do modelo apresentou aumento de 1,14 para 1,18 (3,5%).

Para todos os casos avaliados do método 1, os resultados foram melhores que para as metodologias hipotéticas “100% estacionário” e “100% transiente”. Isso indica que a aplicação da metodologia resultou em detecções melhores do que a não aplicação de metodologia alguma de identificação.

Tabela 4.24 – Comparação dos resultados de detecção com Método 1.

Caso	Correto Geral	Estacionários Identificados	Transientes Identificados	Erro Tipo I	Erro Tipo II	Função Objetivo
"100% Estacionário"	76,5%	100%	0,0%	23,5%	0,0%	1,00
"100% Transiente"	23,5%	0,0%	100%	0,0%	76,5%	1,00
Sem Erros de Medida	98,3%	98,0%	99,3%	0,2%	6,2%	1,97
Erros Regulares	73,3%	83,6%	39,8%	18,1%	57,3%	1,23
Erros Acentuados	73,5%	88,1%	25,7%	20,6%	60,0%	1,14
Janela Móvel (Caso 1)	76,0%	79,1%	65,7%	11,8%	50,8%	1,45
Janela Móvel (Caso 2)	65,8%	65,2%	67,9%	13,2%	62,4%	1,33
Janela Móvel (Caso 3)	39,1%	26,3%	81,3%	17,7%	74,9%	1,08
Janela Móvel (Caso 4)	73,1%	82,0%	44,4%	17,3%	56,7%	1,26
Janela Móvel (Caso 5)	56,7%	50,1%	78,0%	12,0%	67,4%	1,28
Janela Móvel (Caso 6)	71,2%	75,1%	58,5%	14,6%	57,9%	1,34
Janela Móvel (Caso 7)	62,5%	65,6%	52,3%	18,3%	68,0%	1,18

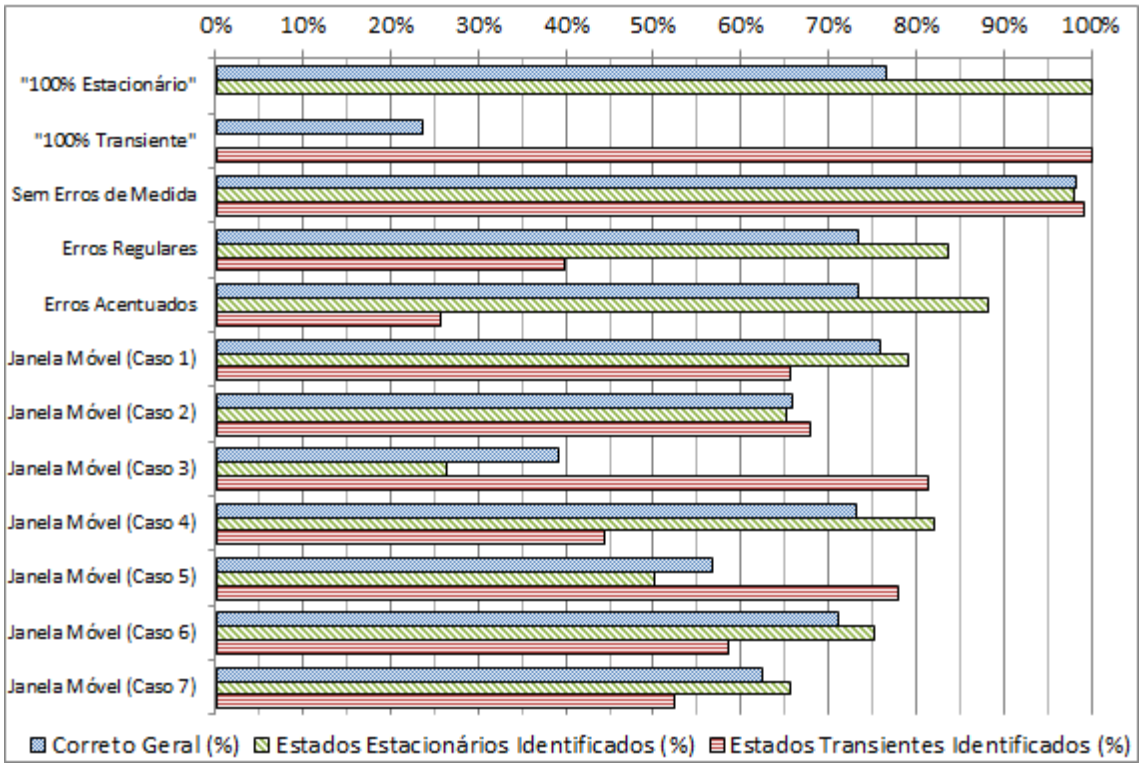

Figura 4.124 – Comparação dos percentuais de detecção com Método 1.

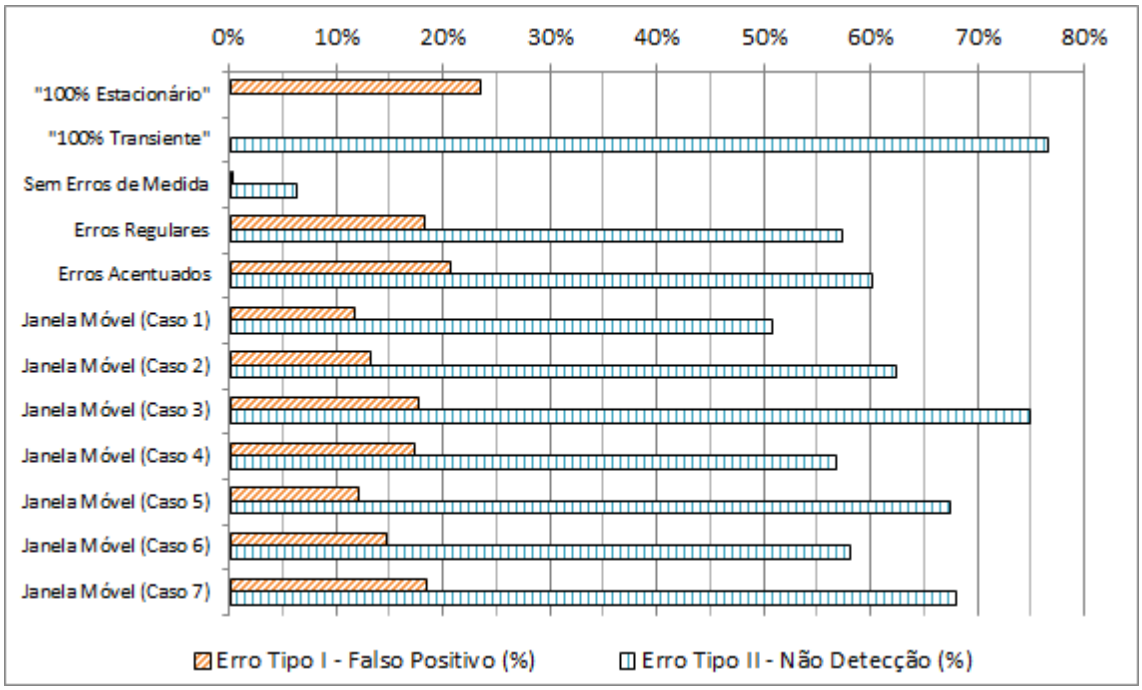

Figura 4.125 – Comparação dos erros tipo I e tipo II com Método 1.

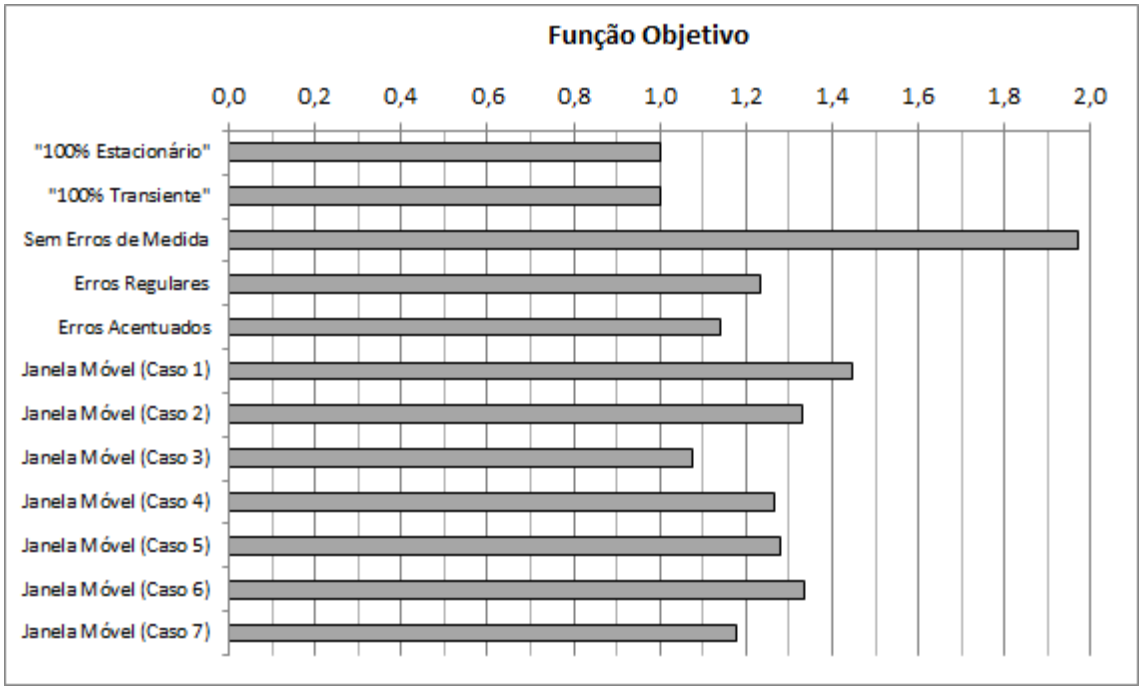

Figura 4.126 – Comparação da função objetivo com Método 1.

4.5.3 Detecção de Estados Estacionários com Método 2: Avaliação do Desvio entre Variáveis Medidas e Reconciliadas

Este método baseia-se na avaliação do desvio entre o valor das variáveis medidas e o valor das variáveis reconciliadas. Maiores desvios indicam que as variáveis medidas se distanciam de uma solução para o balanço de energia em estado estacionário, utilizado pela metodologia de reconciliação de dados.

Como previamente exposto na Seção 3.4.3, o valor limite do desvio entre as variáveis medidas e reconciliadas, que determina se os pontos encontram-se em estado estacionário ou transiente, foi otimizado de modo a maximizar as detecções corretas tanto de estados estacionários quanto de estados transientes. O estado estacionário do trocador de calor para o método 2 depende da estacionariedade de todas as seis variáveis medidas simultaneamente.

4.5.3.1 Detecção com Método 2: Resultados Corretos (sem erros aleatórios)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados sem erros aleatórios, são apresentados na Figura 4.127 e Figura 4.128. Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.25.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.129 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um “X” no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um “X” no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários apresentou bons resultados para o método 2 quando utilizados os dados sem erros aleatórios, mostrando a validade da metodologia. Os efeitos de erros aleatórios e de métodos para reduzir as incertezas dos dados de campo sobre o método 2 são avaliados nas próximas seções.

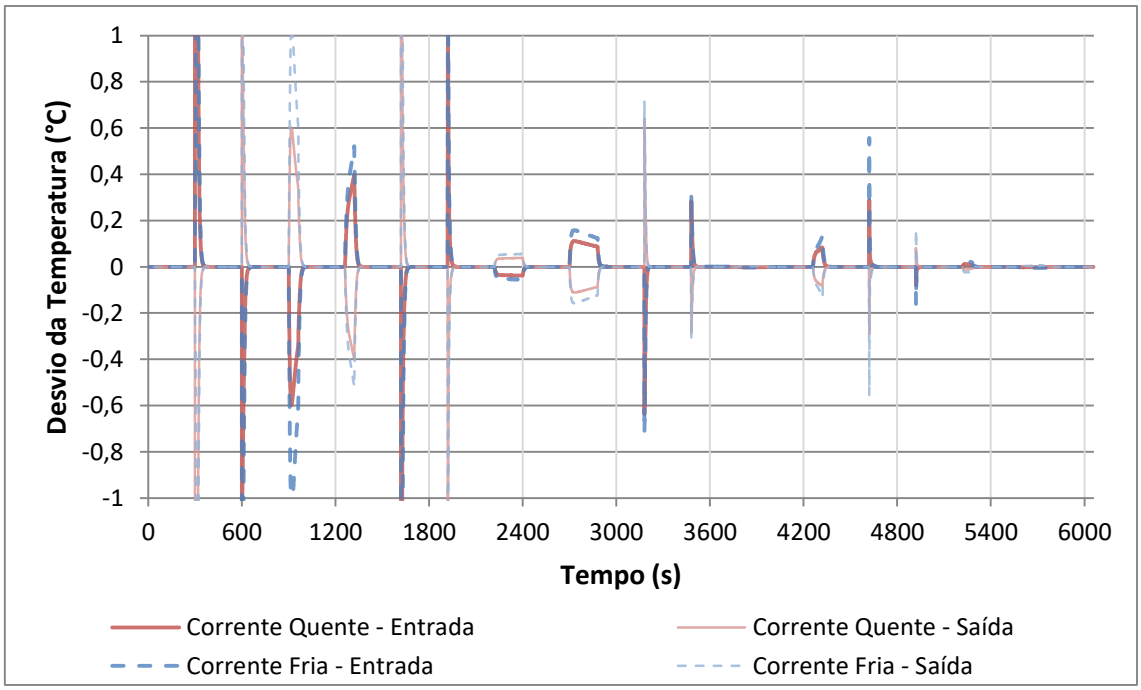

Figura 4.127 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados sem erros aleatórios.

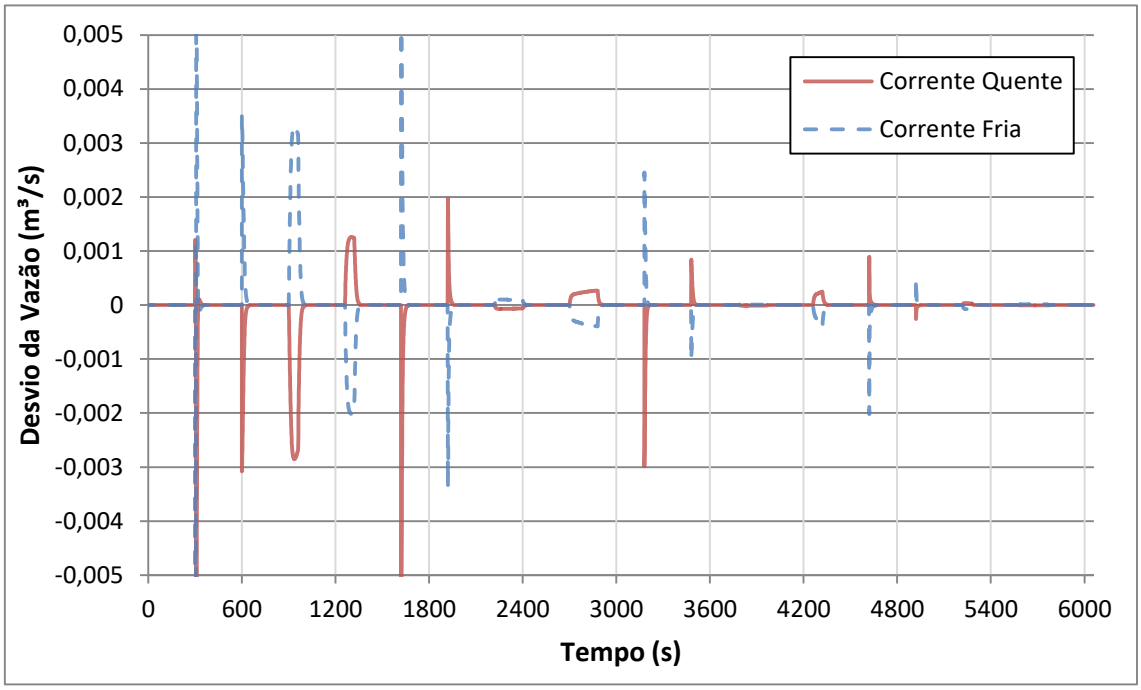

Figura 4.128 – Método 2: Desvios da vazão para resultados sem erros aleatórios.

Tabela 4.25 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados sem erros aleatórios.

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,121	°C
	Entrada Corrente Fria	0,029	°C
	Saída Corrente Quente	0,003	°C
	Saída Corrente Fria	0,003	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000007	m³/s
	Corrente Fria	0,000010	m³/s

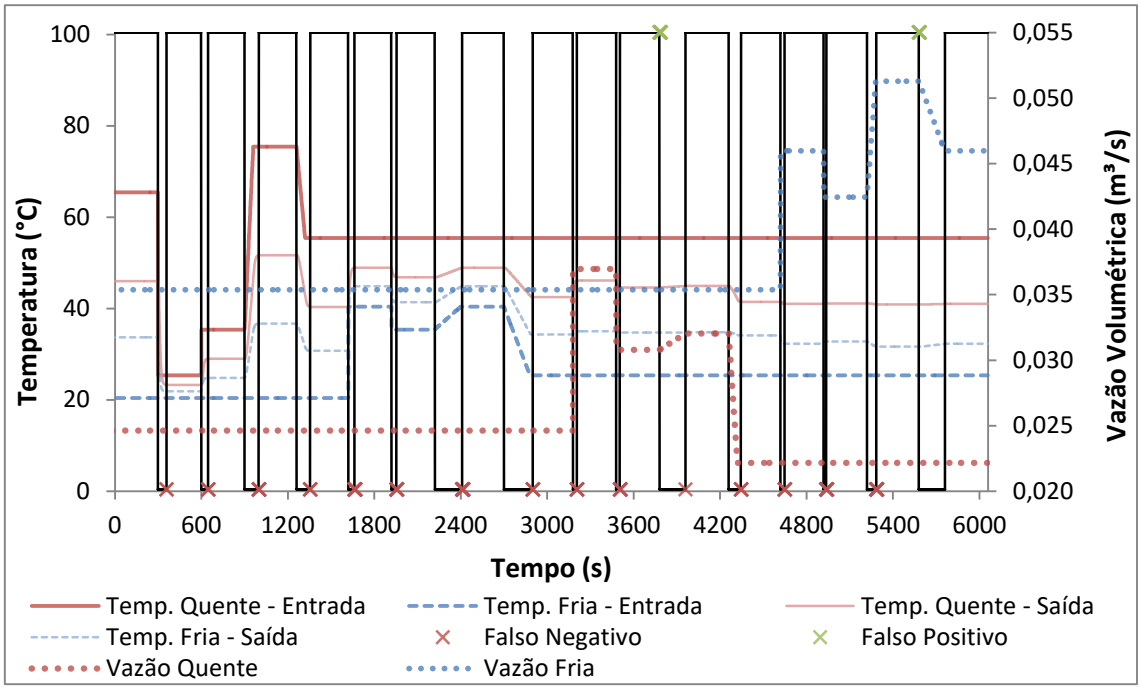

Figura 4.129 – Método 2: Erros de Detecção para resultados sem erros aleatórios.

4.5.3.2 Detecção com Método 2: Resultados Com Erros Aleatórios Regulares

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com erros aleatórios regulares, são apresentados na Figura 4.130 e Figura 4.131. Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.26.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.132 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das

ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um “X” no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um “X” no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários apresentou resultados ruins para o método 2 quando utilizados os dados com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

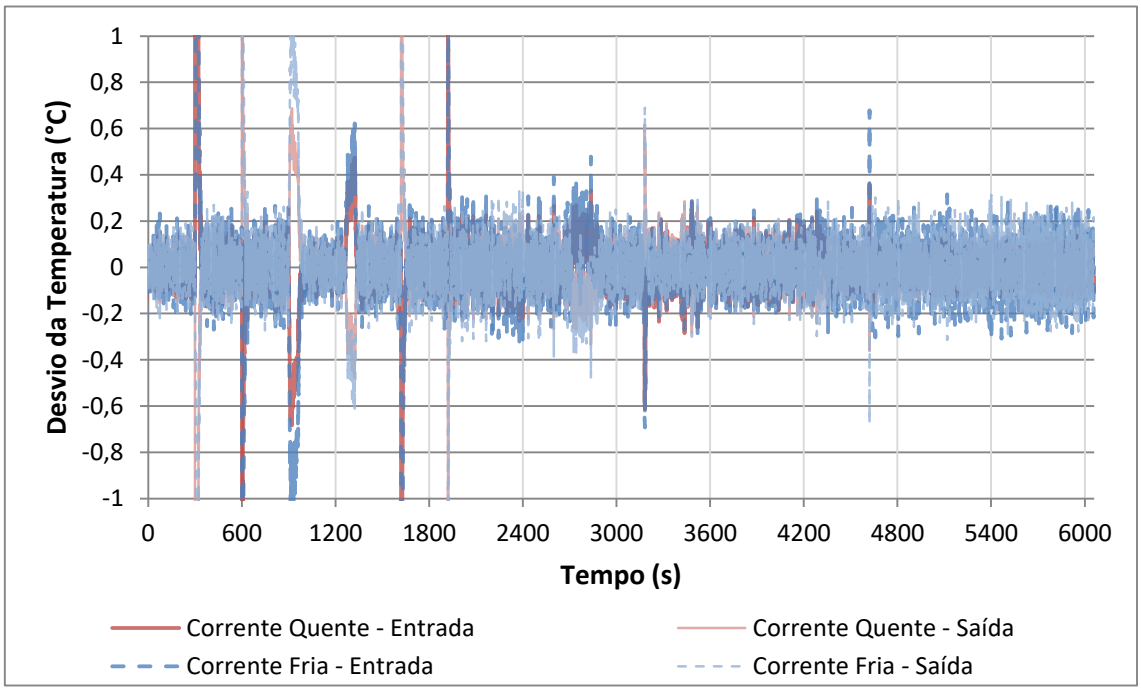

Figura 4.130 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com erros aleatórios regulares.

Tabela 4.26 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com erros aleatórios regulares.

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,175	°C
	Entrada Corrente Fria	0,120	°C
	Saída Corrente Quente	0,095	°C
	Saída Corrente Fria	0,130	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000150	m^3/s
	Corrente Fria	0,000265	m^3/s

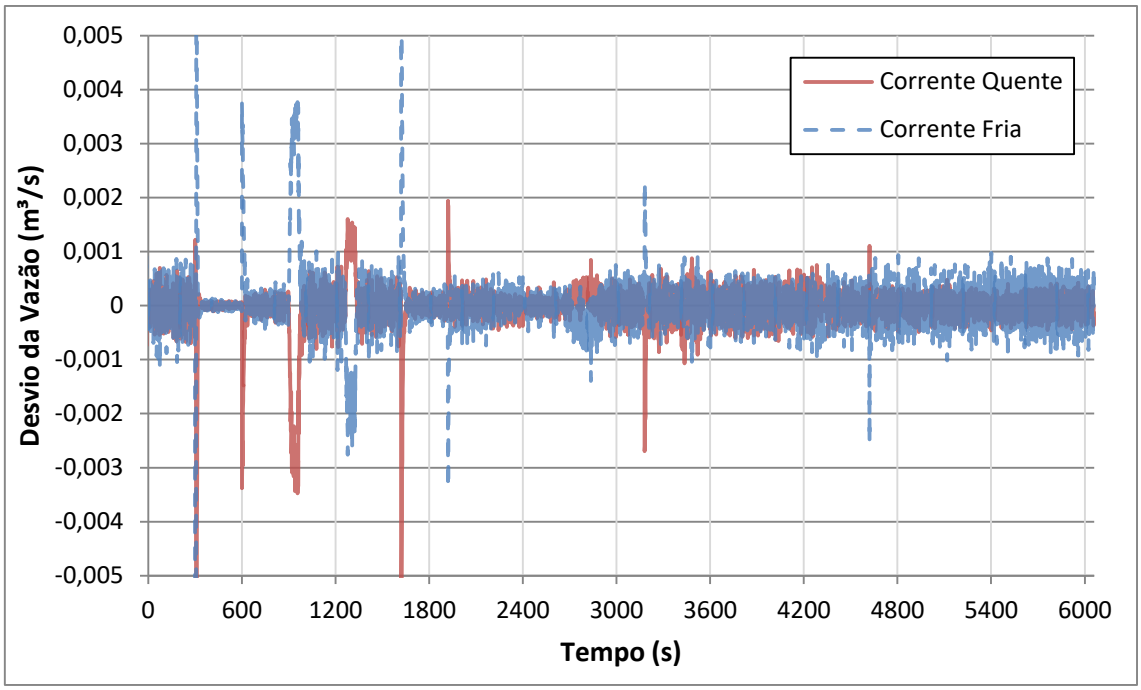

Figura 4.131 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com erros aleatórios regulares.

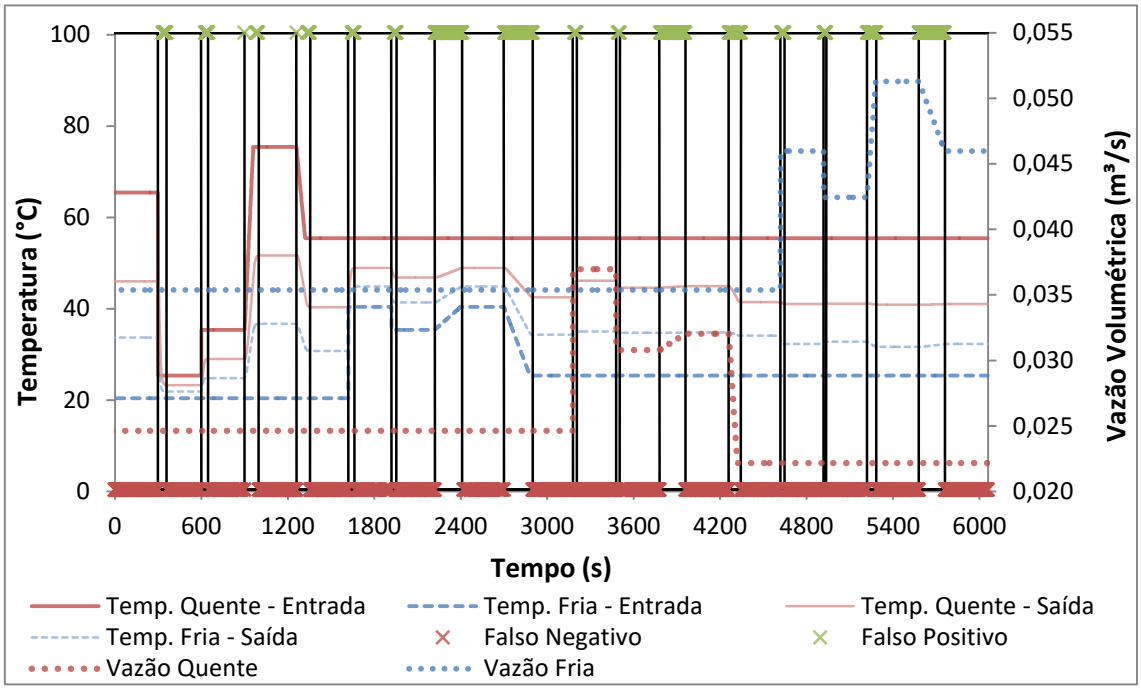

Figura 4.132 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios regulares.

4.5.3.3 Detecção com Método 2: Resultados Com Erros Aleatórios Acentuados

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com erros aleatórios acentuados, são apresentados na Figura 4.133 e Figura 4.134. Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.27.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.135 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários apresentou resultados ruins para o método 2 quando utilizados os dados com erros aleatórios acentuados. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

Tabela 4.27 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com erros aleatórios acentuados.

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,260	°C
	Entrada Corrente Fria	0,235	°C
	Saída Corrente Quente	0,260	°C
	Saída Corrente Fria	0,260	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000390	m^3/s
	Corrente Fria	0,000755	m^3/s

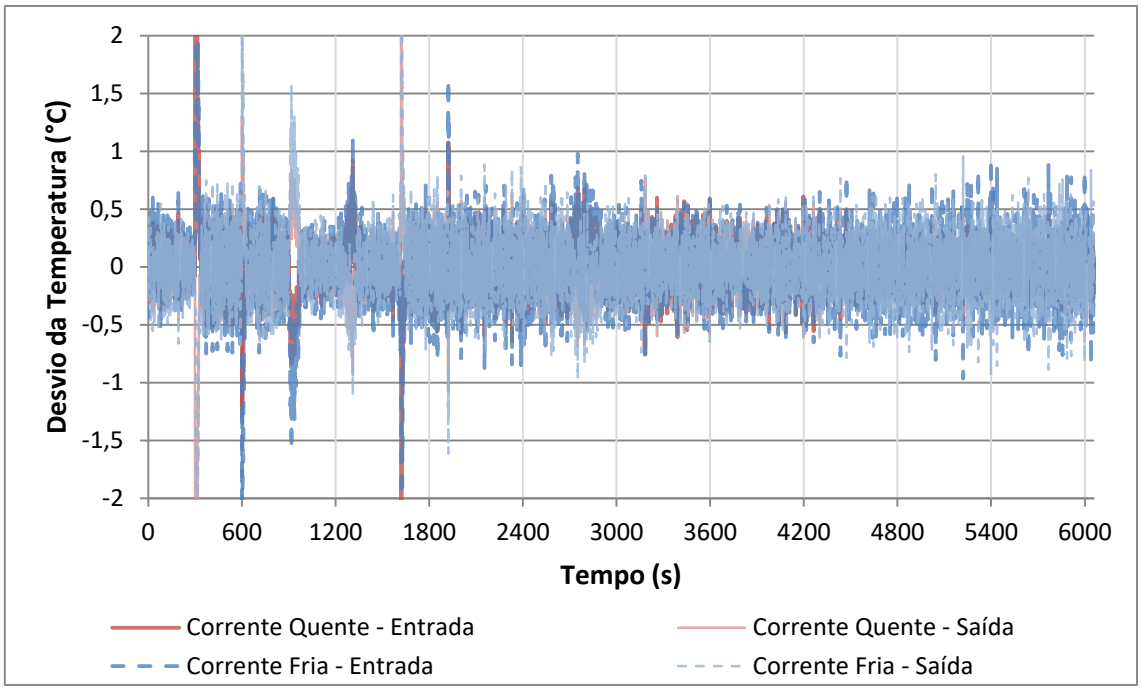

Figura 4.133 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com erros aleatórios acentuados.

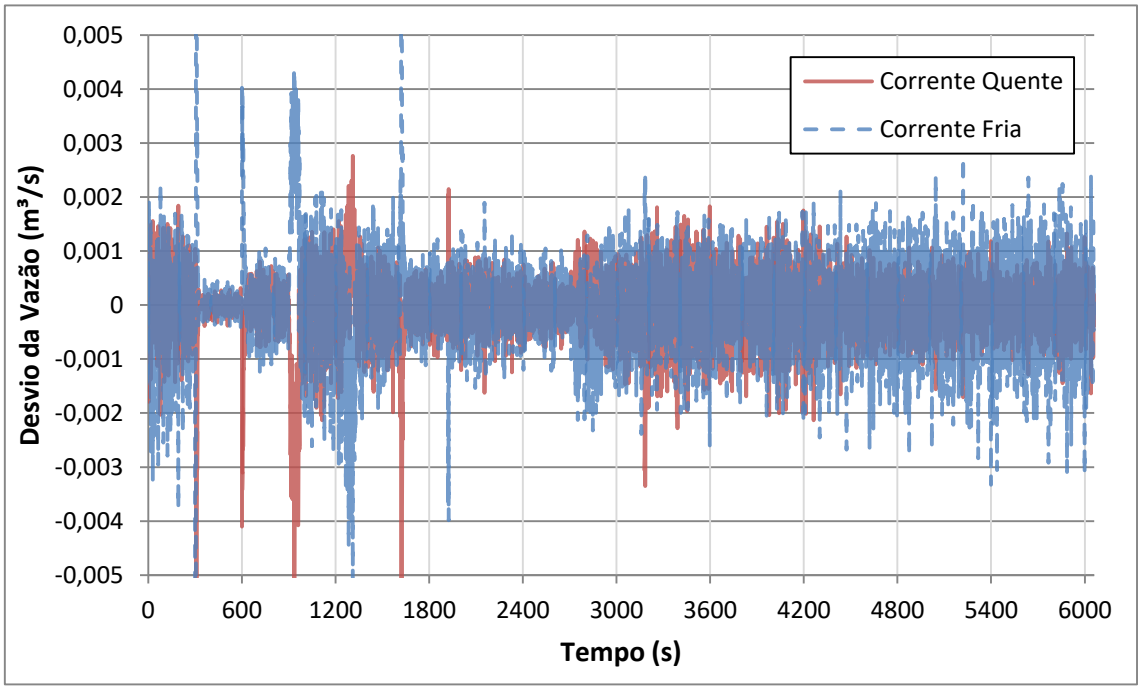

Figura 4.134 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com erros aleatórios acentuados.

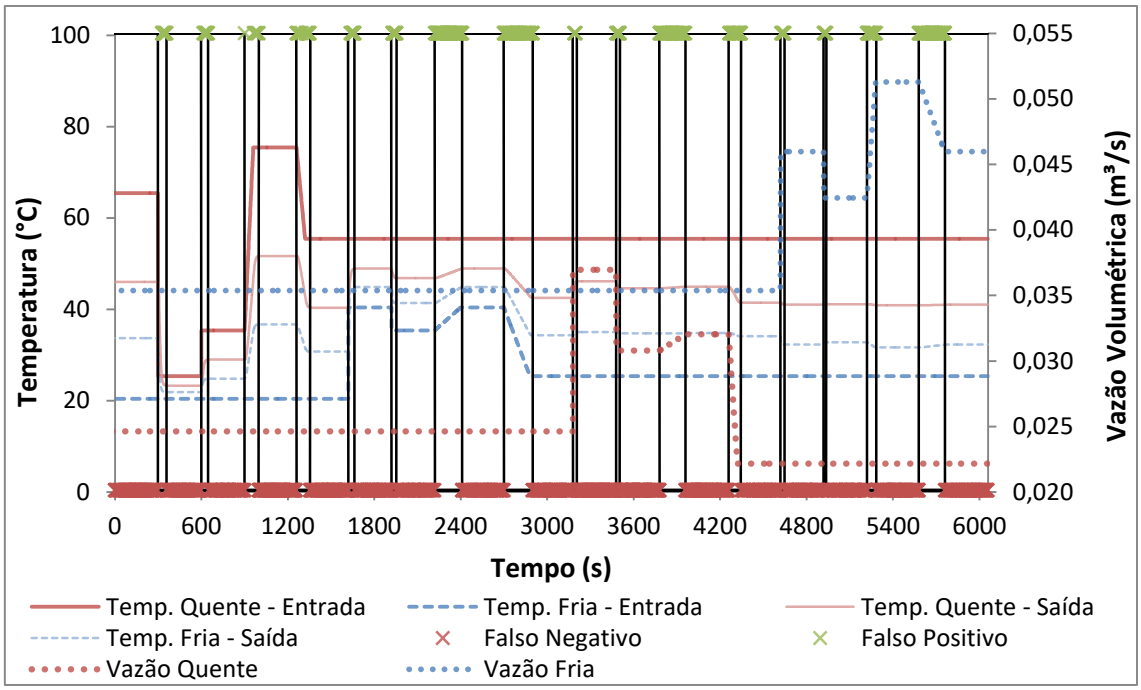

Figura 4.135 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com erros aleatórios acentuados.

4.5.3.4 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 1)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 1), são apresentados na Figura 4.136 e Figura 4.137. A janela móvel do caso 1 possui frequência de amostragem de 1 em 1 segundo, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.28.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.138 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 1) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

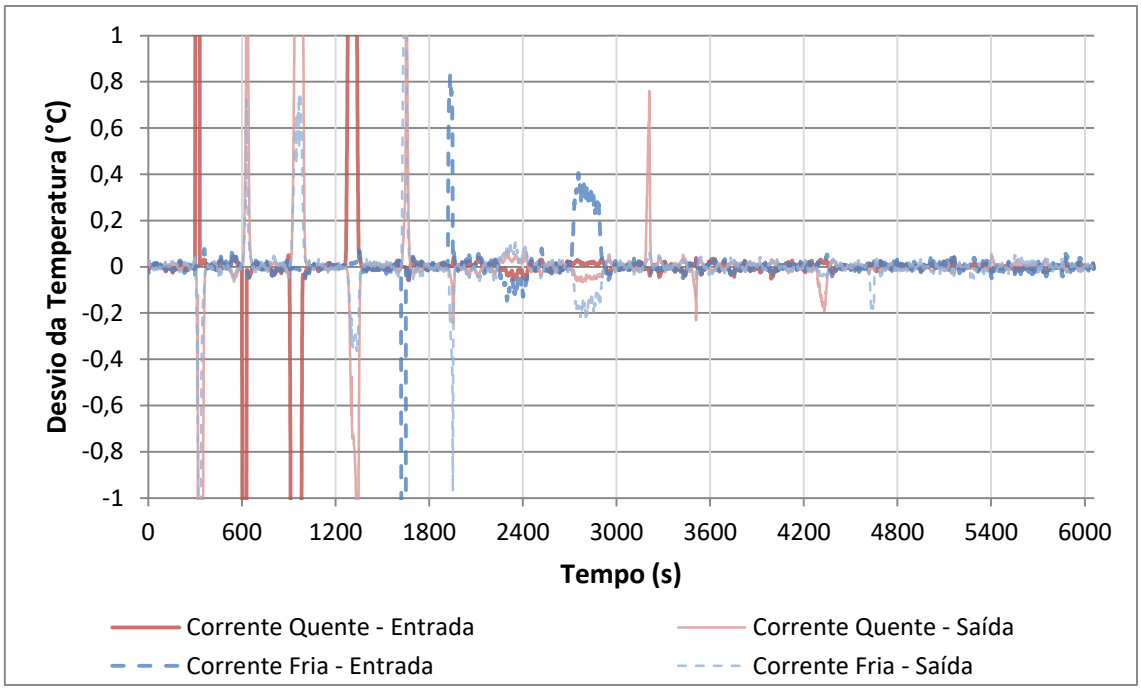

Figura 4.136 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 1).

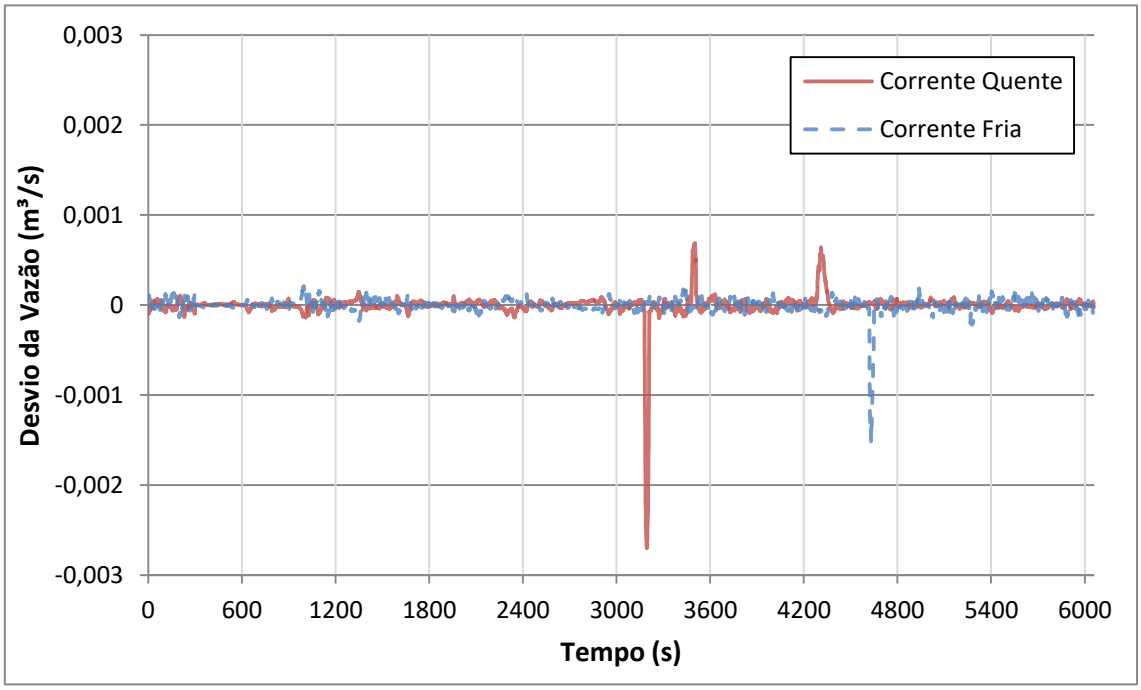

Figura 4.137 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 1).

Tabela 4.28 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 1).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,035	°C
	Entrada Corrente Fria	0,035	°C
	Saída Corrente Quente	0,020	°C
	Saída Corrente Fria	0,025	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000032	m³/s
	Corrente Fria	0,000020	m³/s

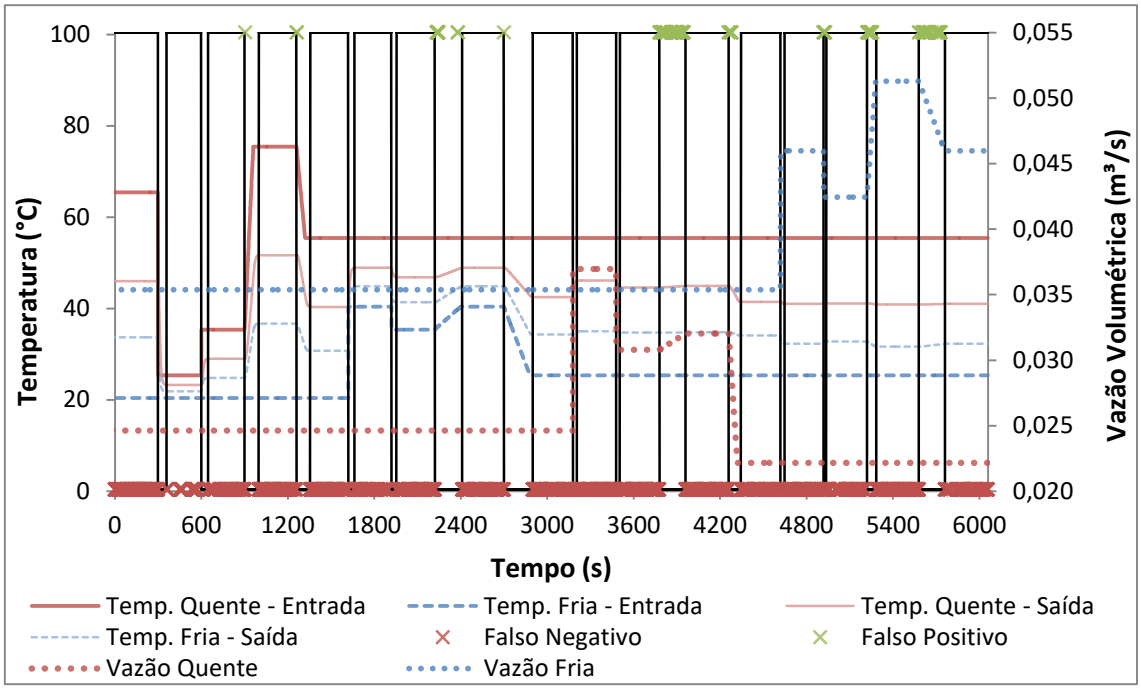

Figura 4.138 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 1).

4.5.3.5 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 2)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 2), são apresentados na Figura 4.139 e Figura 4.140. A janela móvel do caso 2 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.29.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.141 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o

resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 2) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

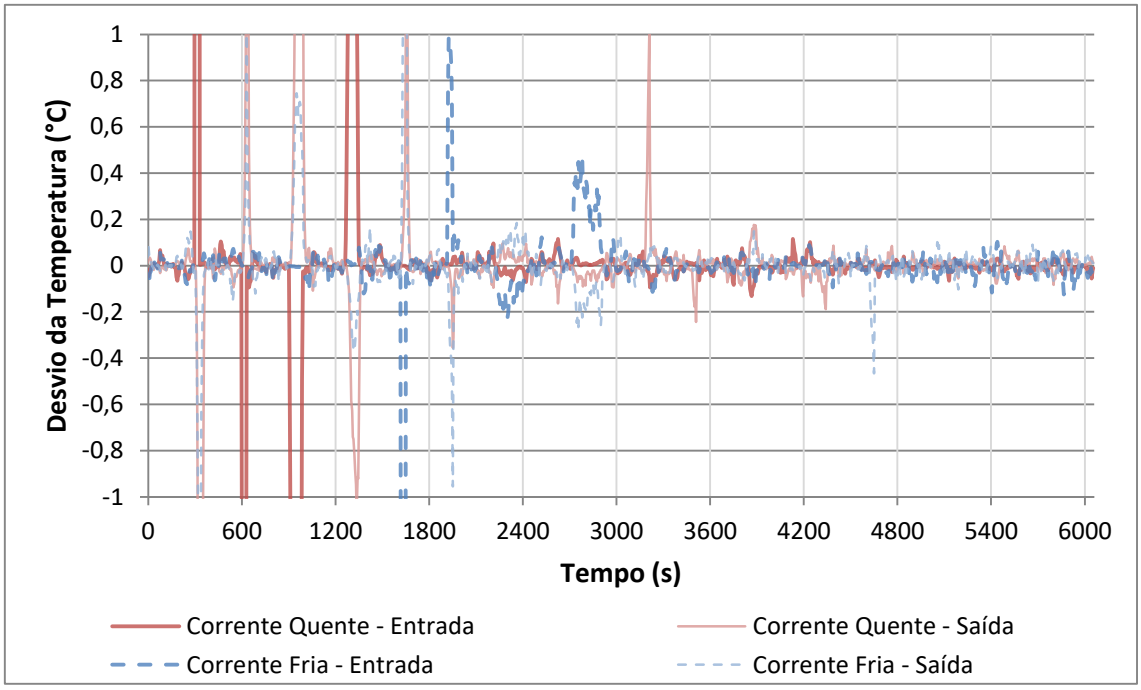

Figura 4.139 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 2).

Tabela 4.29 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 2).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,110	°C
	Entrada Corrente Fria	0,065	°C
	Saída Corrente Quente	0,030	°C
	Saída Corrente Fria	0,065	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,00007	m^3/s
	Corrente Fria	0,00012	m^3/s

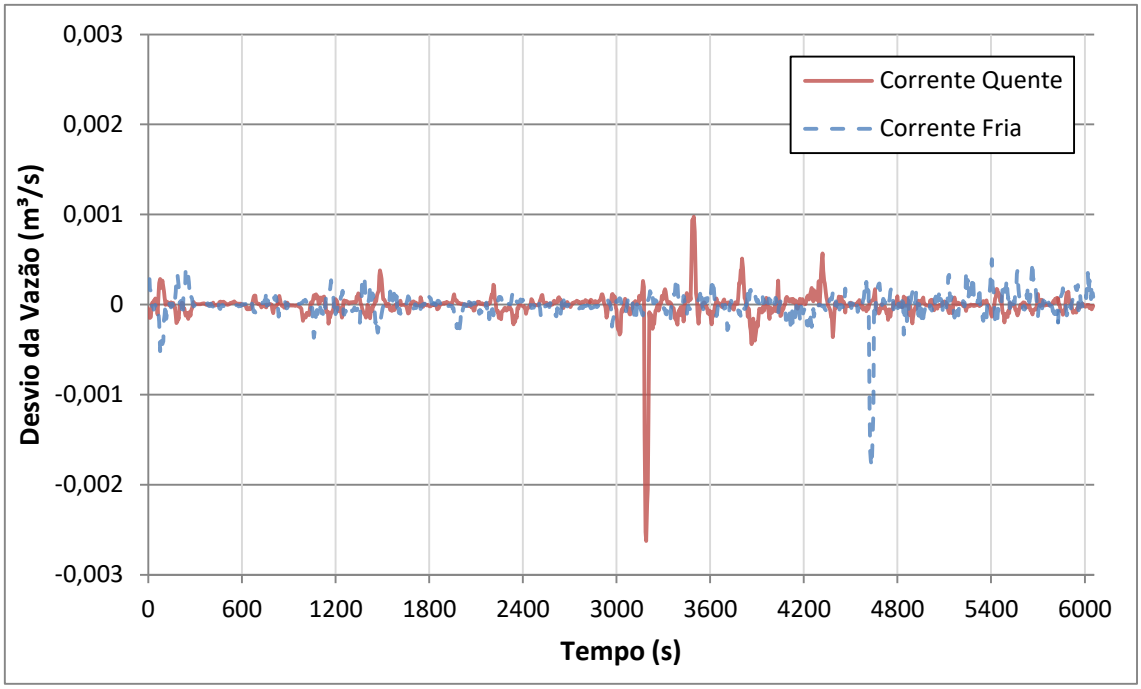

Figura 4.140 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 2).

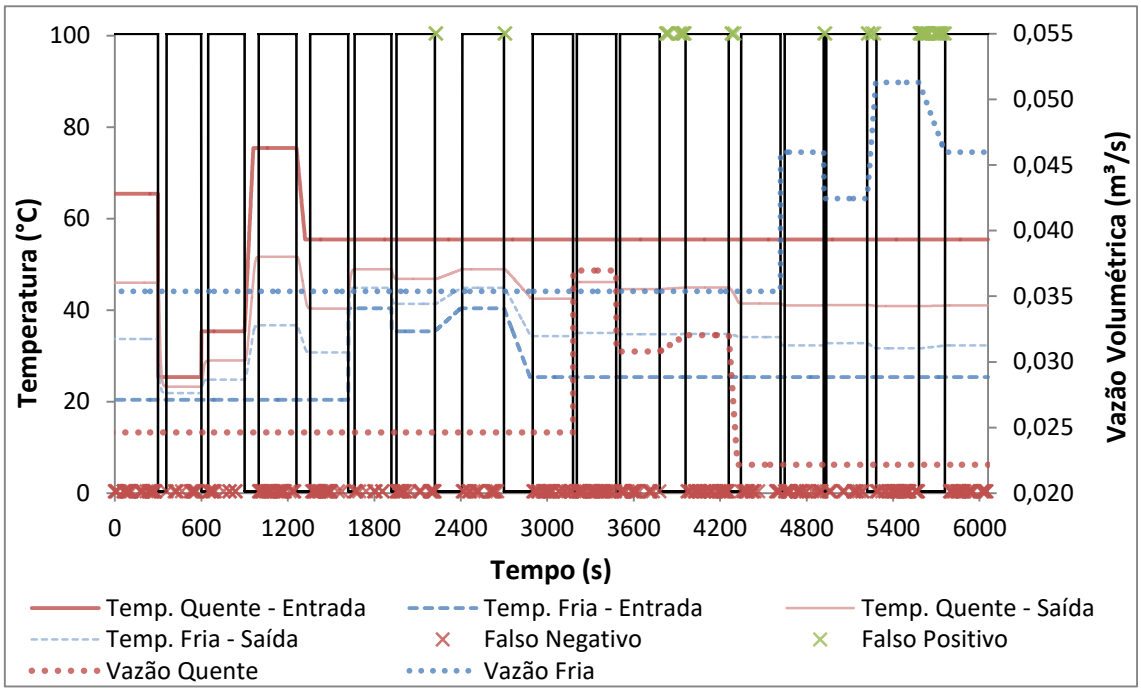

Figura 4.141 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 2).

4.5.3.6 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 3)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 3), são apresentados na Figura 4.142 e Figura 4.143. A janela móvel do caso 3 possui frequência de amostragem de 15 em 15 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.30.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.144 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 3) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

Tabela 4.30 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 3).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,370	°C
	Entrada Corrente Fria	0,050	°C
	Saída Corrente Quente	0,085	°C
	Saída Corrente Fria	0,045	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000035	m^3/s
	Corrente Fria	0,000035	m^3/s

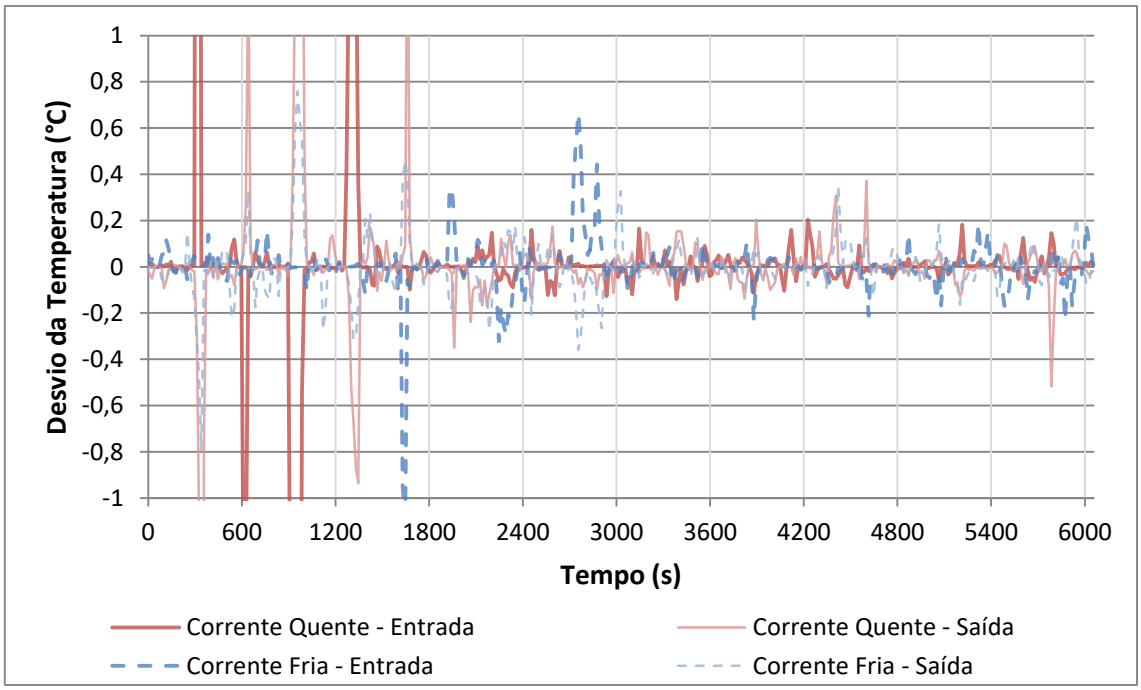

Figura 4.142 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 3).

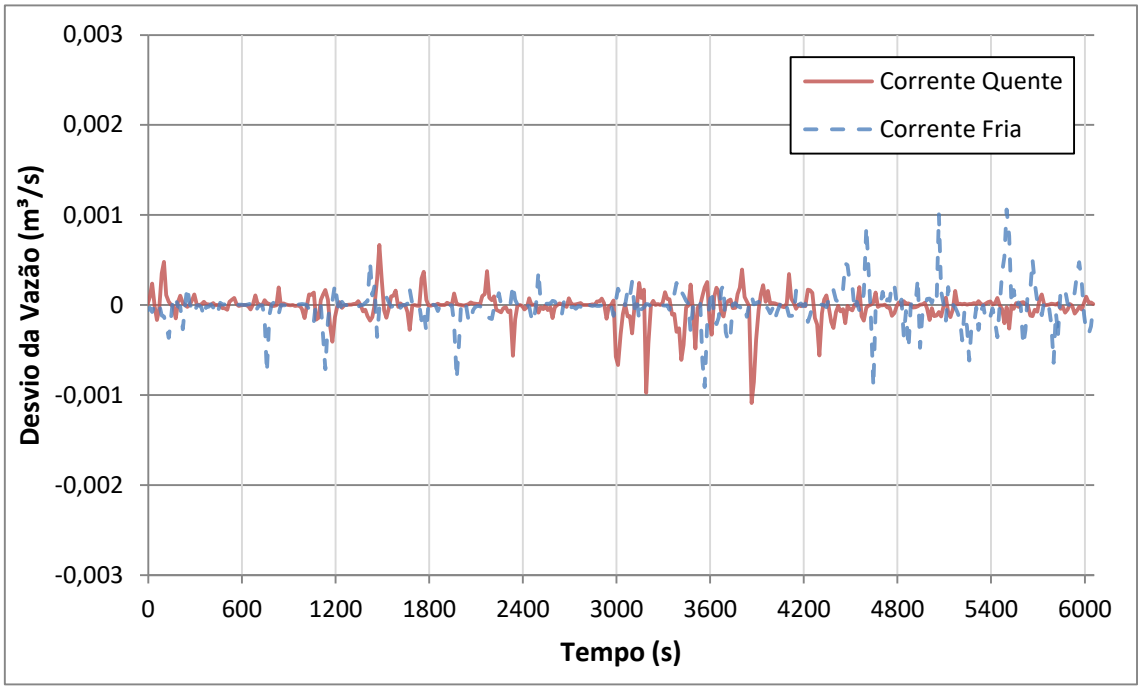

Figura 4.143 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 3).

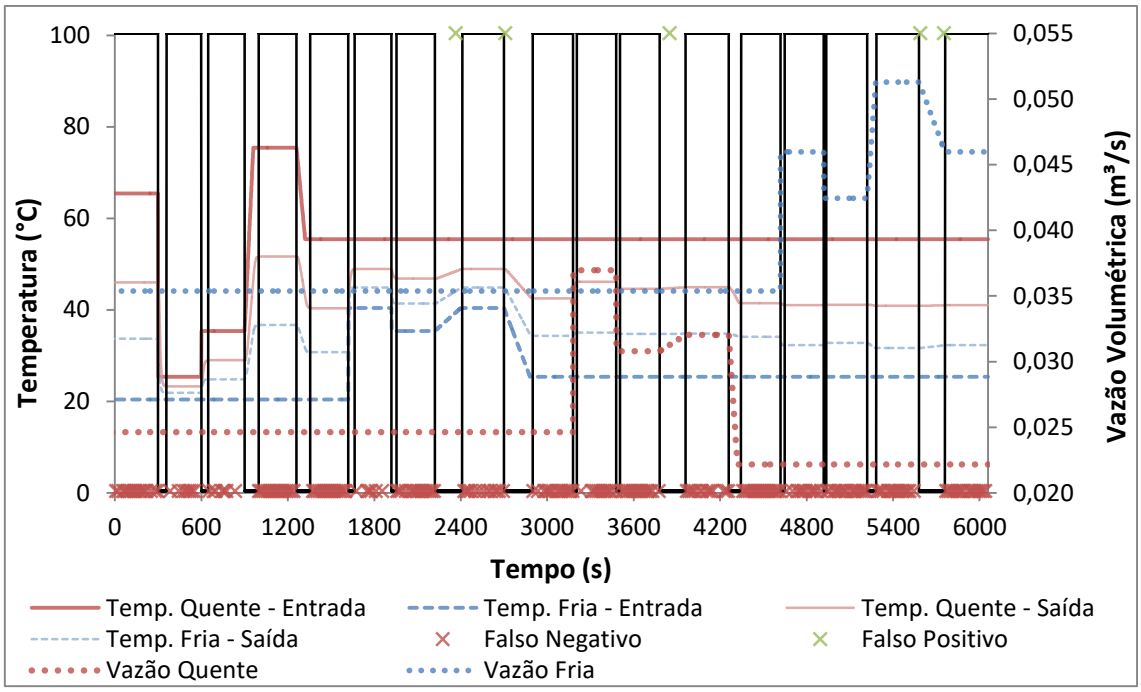

Figura 4.144 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 3).

4.5.3.7 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 4)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 4), são apresentados na Figura 4.145 e Figura 4.146. A janela móvel do caso 4 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 10 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.31.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.147 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 4) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

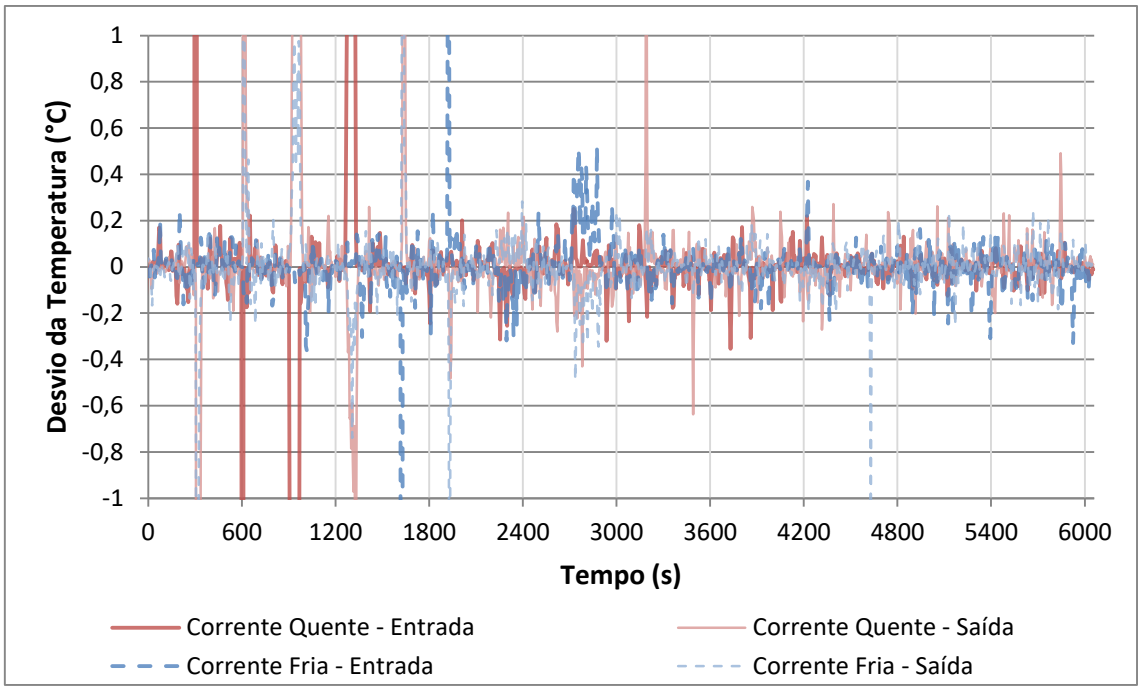

Figura 4.145 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 4).

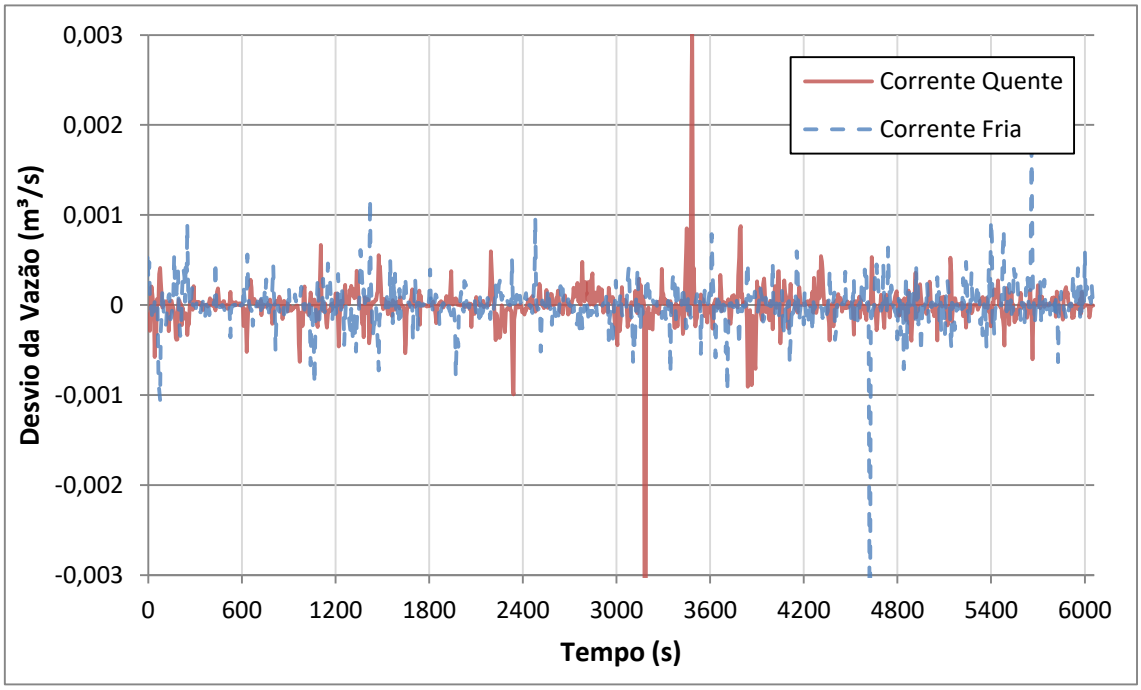

Figura 4.146 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 4).

Tabela 4.31 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 4).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,255	°C
	Entrada Corrente Fria	0,085	°C
	Saída Corrente Quente	0,085	°C
	Saída Corrente Fria	0,075	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000055	m³/s
	Corrente Fria	0,000165	m³/s

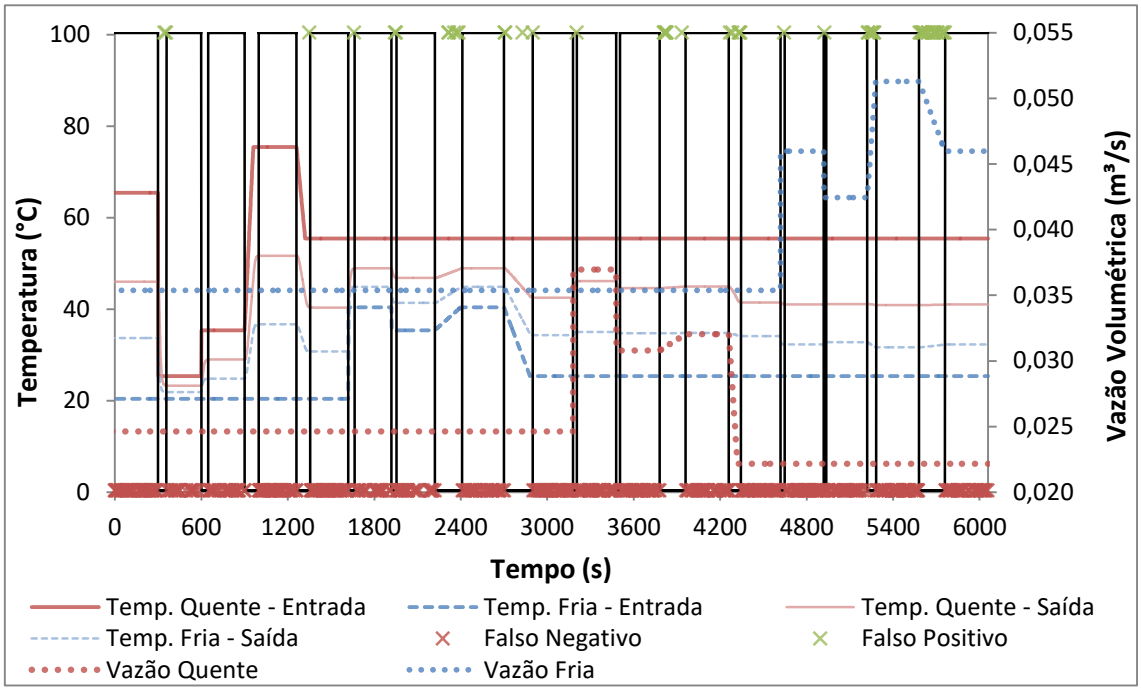

Figura 4.147 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 4).

4.5.3.8 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 5)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 5), são apresentados na Figura 4.148 e Figura 4.149. A janela móvel do caso 5 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 60 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.32.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.150 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor

máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um “X” no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um “X” no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 5) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

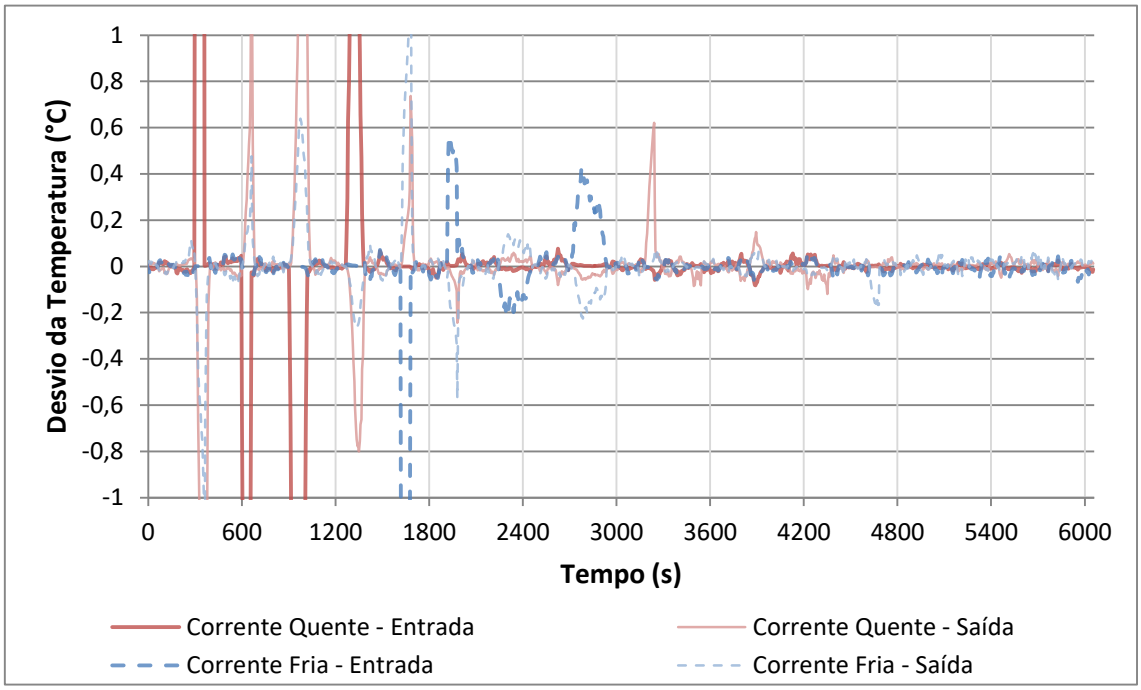

Figura 4.148 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 5).

Tabela 4.32 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 5).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,085	°C
	Entrada Corrente Fria	0,060	°C
	Saída Corrente Quente	0,020	°C
	Saída Corrente Fria	0,030	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,00009	m^3/s
	Corrente Fria	0,00004	m^3/s

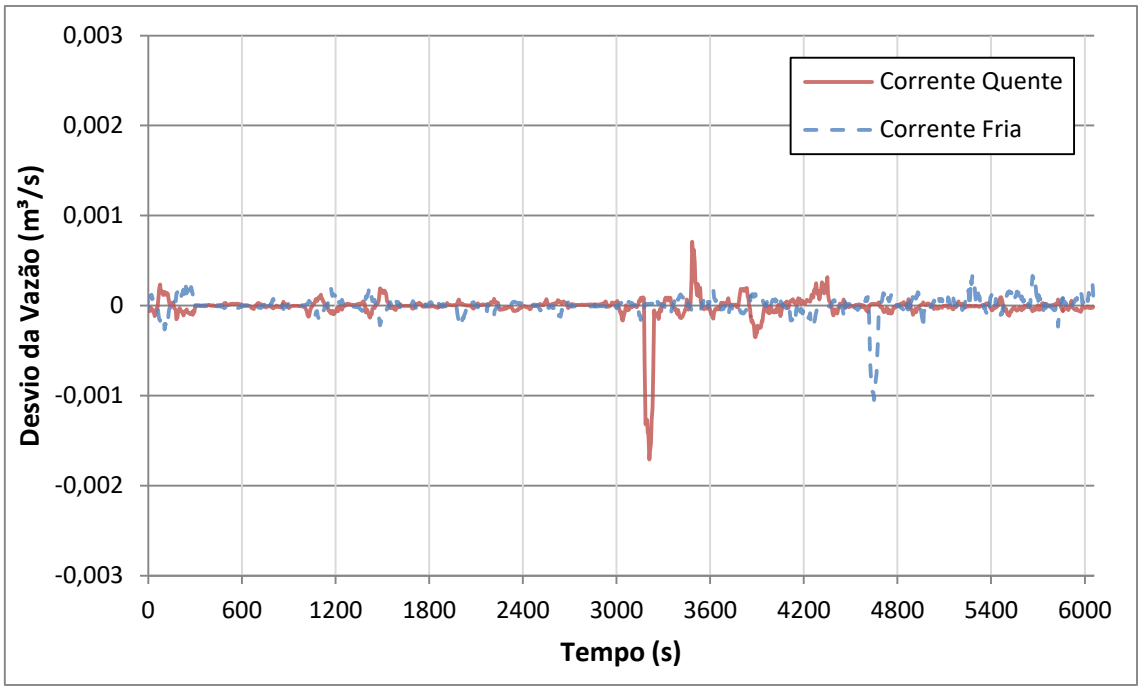

Figura 4.149 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 5).

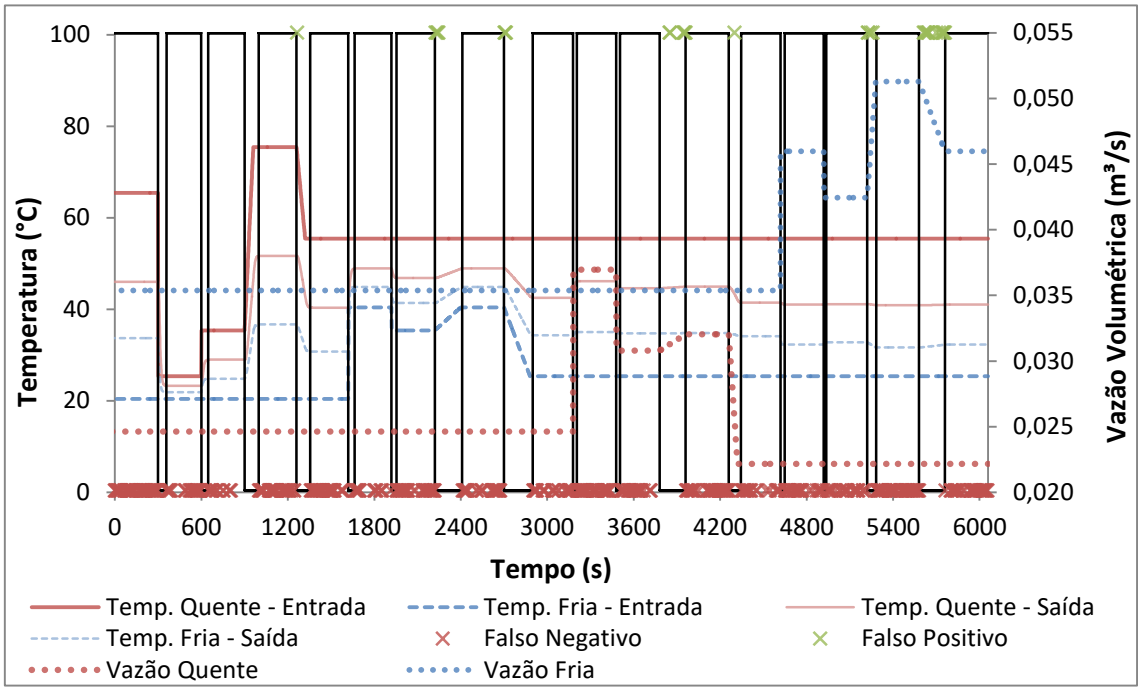

Figura 4.150 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 5).

4.5.3.9 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 6)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 6), são apresentados na Figura 4.151 e Figura 4.152. A janela móvel do caso 6 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "simétrica" e erros aleatórios "regulares". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.33.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.153 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 6) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios regulares. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

Tabela 4.33 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 6).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,500	°C
	Entrada Corrente Fria	0,060	°C
	Saída Corrente Quente	0,030	°C
	Saída Corrente Fria	0,055	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000071	m^3/s
	Corrente Fria	0,000122	m^3/s

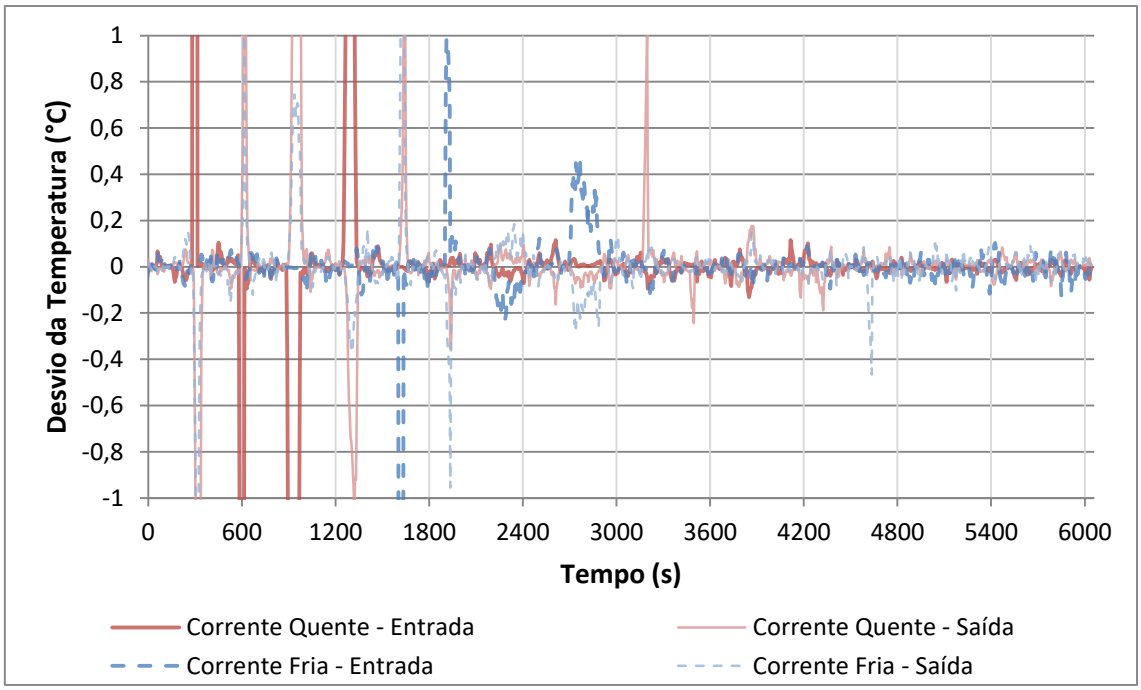

Figura 4.151 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 6).

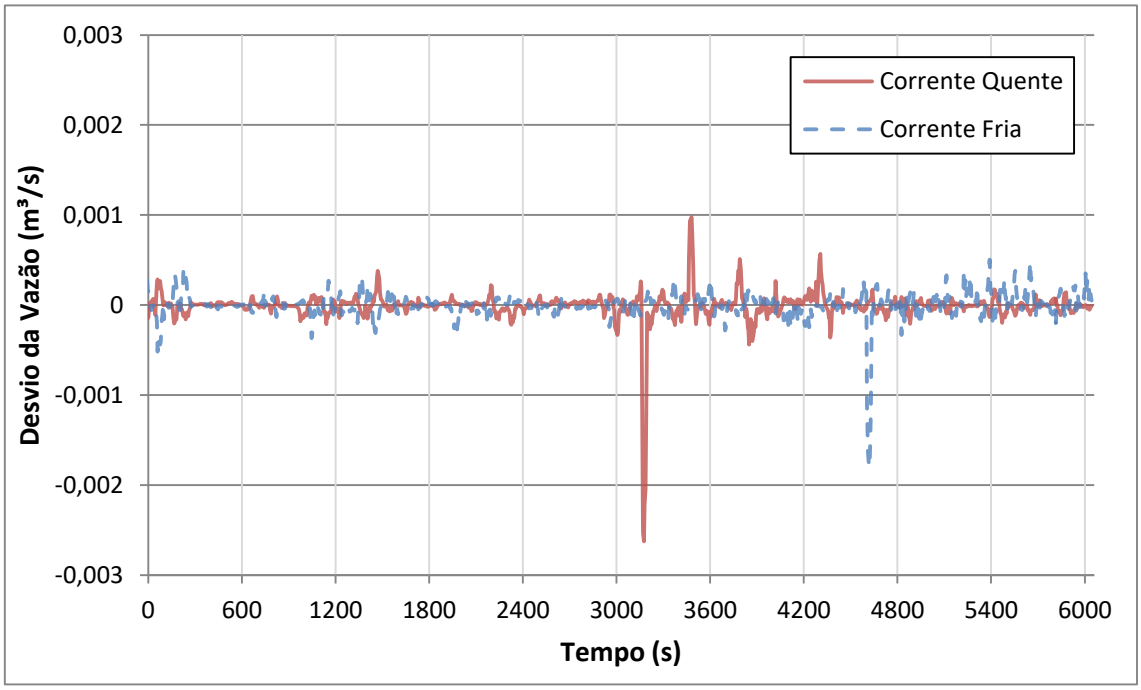

Figura 4.152 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 6).

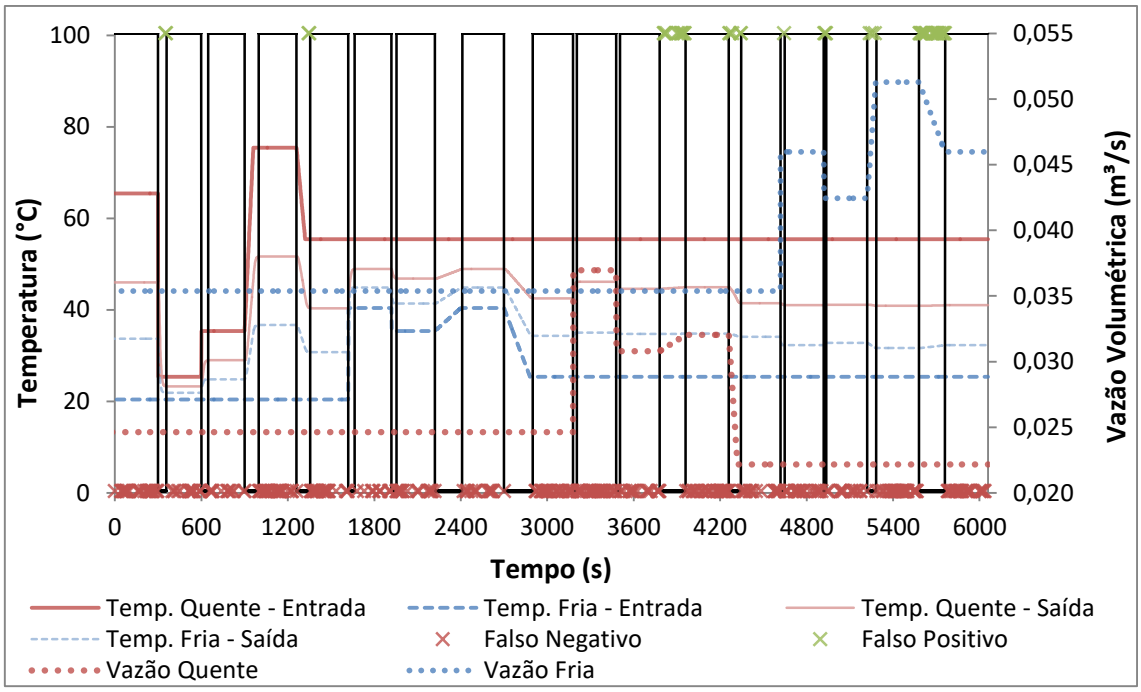

Figura 4.153 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 6).

4.5.3.10 Detecção com Método 2: Resultados Com Janela Móvel (Caso 7)

Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e reconciliadas, utilizando dados com janela móvel (caso 7), são apresentados na Figura 4.154 e Figura 4.155. A janela móvel do caso 7 possui frequência de amostragem de 5 em 5 segundos, comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "acentuados". Os valores limites dos desvios que otimizaram a detecção de estados estacionários e transientes são apresentados na Tabela 4.34.

Foram determinados os erros do tipo I (falsos positivos) e erros do tipo II (falsos negativos / não detecção) na avaliação de estados estacionários. Na Figura 4.156 é possível observar os resultados corretos das variáveis sendo avaliadas, assim como o resultado correto esperado na detecção de estados estacionários: linha contínua no valor máximo do eixo das ordenadas (estado estacionário) e no valor mínimo do eixo das ordenadas (estado transiente ou não-estacionário). Os falsos positivos são indicados por um "X" no valor máximo do eixo das ordenadas, enquanto os falsos negativos são indicados por um "X" no valor mínimo do eixo das ordenadas. Conclui-se que a detecção de estados estacionários com o método 2 apresentou resultados melhores ao utilizar os dados com janela móvel (caso 7) quando comparados com os resultados obtidos com erros aleatórios acentuados. A qualidade do método é quantitativamente avaliada na Seção 4.5.3.11.

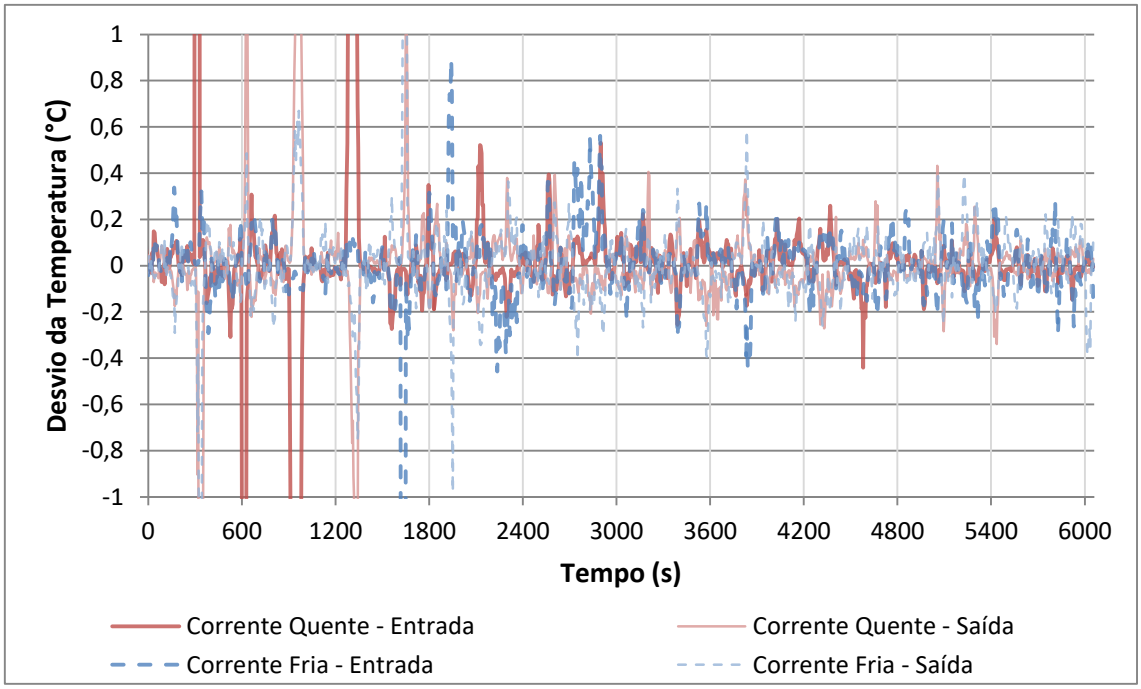

Figura 4.154 – Método 2: Desvios da temperatura para resultados com janela móvel (caso 7).

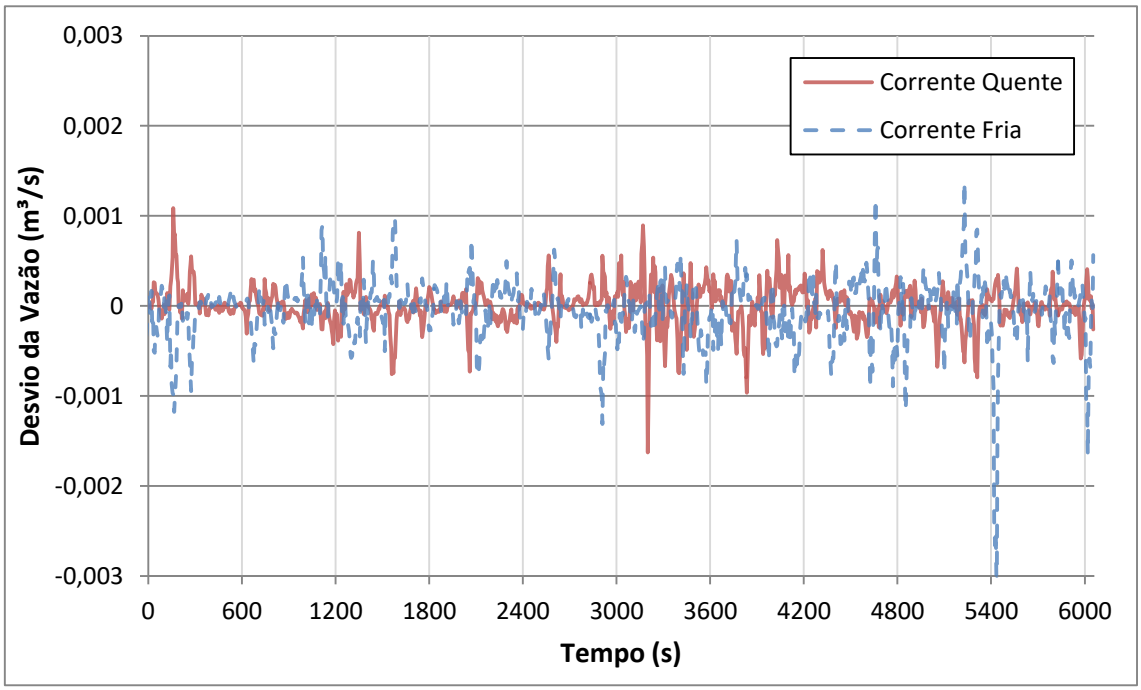

Figura 4.155 – Método 2: Desvios da vazão para resultados com janela móvel (caso 7).

Tabela 4.34 – Método 2: Valores limites dos desvios que otimizaram a detecção para resultados com janela móvel (caso 7).

Variável		Desvio Ótimo	Unidade
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,31	°C
	Entrada Corrente Fria	0,13	°C
	Saída Corrente Quente	0,06	°C
	Saída Corrente Fria	0,09	°C
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,000214	m³/s
	Corrente Fria	0,000505	m³/s

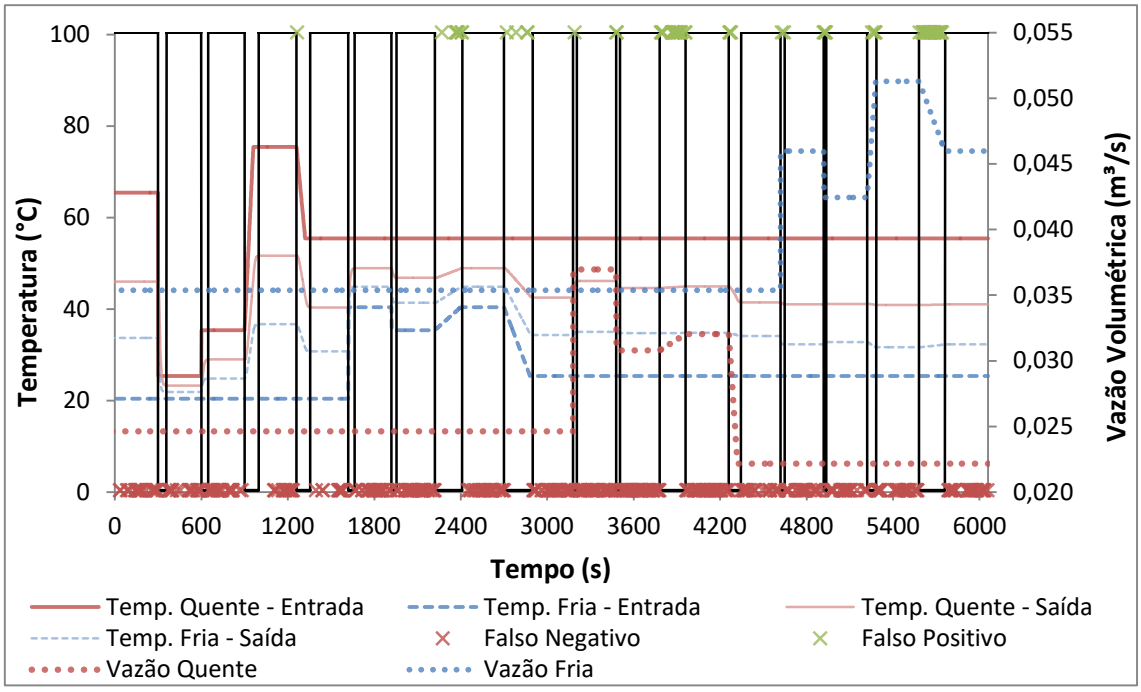

Figura 4.156 – Método 2: Erros de Detecção para resultados com janela móvel (caso 7).

4.5.3.11 Detecção com Método 2: Comparações dos Resultados

Foram comparados todos os resultados obtidos na detecção de estados estacionários com o método 2. Também foram incluídos resultados para duas metodologias hipotéticas: a primeira detecta todos os pontos como estacionários (chamada "100% estacionário") e a segunda detecta todos os pontos como transientes (chamada "100% transiente").

Pode-se concluir que a utilização do método 2 em dados sem erros de medida apresentou bons resultados, com 98,4% dos estados estacionários identificados e 98,8% dos estados transientes identificados, resultando em 98,5% dos pontos corretamente identificados (ver Tabela 4.35 e Figura 4.157). Os erros do tipo I ocorreram em 0,4%

dos pontos, enquanto os erros do tipo II ocorreram em 5,0% dos pontos (ver Tabela 4.35e Figura 4.158). A função objetivo maximizada durante a otimização dos parâmetros do modelo foi de 1,97 (ver Tabela 4.35 e Figura 4.159), valor próximo do máximo possível (2,0) como descrito na Seção 3.4.2 e Seção 3.4.3, indicando que o modelo apresentou uma boa detecção tanto dos estados estacionários quanto dos estados transientes.

Com a inclusão de erros aleatórios nos dados foi possível observar uma redução na detecção de estados estacionários e transientes (Tabela 4.35, Figura 4.157, Figura 4.158 e Figura 4.159). Para o caso de erros regulares foram identificados 56,4% dos estados estacionários, 61,0% dos estados transientes e 57,4% no geral. Para o caso de erros acentuados foram identificados 54,6% dos estados estacionários, 55,3% dos estados transientes e 54,8% no geral. Os erros do tipo I e tipo II foram de 17,6% e 69,9% respectivamente para o caso com erros regulares, enquanto que para o caso com erros acentuados os erros do tipo I foram de 20,1% e os erros do tipo II foram de 72,7%. A função objetivo maximizada durante a otimização dos parâmetros do modelo foi de 1,17 para erros regulares e 1,10 para erros acentuados. É importante notar que os resultados ao utilizar dados com erros acentuados foram piores que os resultados obtidos ao utilizar dados com erros regulares, para todos os parâmetros avaliados. Conclui-se que erros maiores nos dados resultam em piores resultados na detecção de estados estacionários e transientes.

A aplicação de uma janela móvel aos dados com erros possibilitou a melhora dos resultados obtidos pelo método 2. Os resultados para o caso 2 foram os melhores obtidos dentre as avaliações com janelas móveis, representando a situação com erros regulares, dados amostrados de 5 em 5 segundos, com comprimento da janela de 30 segundos, utilizando apenas dados passados dentro da janela. Foram identificados 57,9% dos estados estacionários, 83,4% dos estados transientes e 63,9% no geral. Os erros do tipo I e tipo II foram de 8,1% e 62,0%, respectivamente. A função objetivo maximizada durante a otimização dos parâmetros do modelo foi de 1,41. Conclui-se que a inclusão da janela móvel (caso 2) resultou em melhorias significativas para o método 2, elevando a identificação de estados estacionários e transientes, reduzindo os erros do tipo I e tipo II, bem como aumentando o valor da função objetivo da otimização dos parâmetros do modelo.

A comparação das janelas móveis, casos 1, 2 e 3, possibilita avaliar o impacto da redução da frequência de amostragem dos dados nos resultados de identificação de

estados estacionários. Foi possível concluir que os resultados melhoraram com a redução da frequência de amostragem de 1s (caso 1) para 5s (caso 2), enquanto que com o aumento de 5s para 15s (caso 3) os resultados pioraram. É importante observar que os resultados obtidos para os casos 1 e 3 são piores que aqueles obtidos sem o uso de janelas móveis, com uma tendência em detectar os dados como em estado transiente.

Comparando-se as janelas móveis, casos 4, 2 e 5, avalia-se o impacto do comprimento da janela móvel nos resultados de identificação de estados estacionários. Conclui-se que o caso 2 (comprimento de 30s) apresentou os melhores resultados, seguido pelo caso 5 (comprimento de 60s) e pelo caso 4 (comprimento de 10s).

A variação do tipo de janela móvel entre média do tipo "passado" e média do tipo "simétrica" foi realizada entre os casos 2 e 6, respectivamente. Foi observado que a variação do tipo de média não apresentou mudanças significativas nos resultados do método 2.

Foi aplicada a janela móvel nos dados com erros acentuados (caso 7), sendo que os resultados obtidos demonstraram um pequeno ganho na aplicação da janela móvel. Houve uma redução dos erros tipo I e tipo II. O valor da função objetivo do método de otimização dos parâmetros do modelo apresentou aumento de 1,10 para 1,24.

Para todos os casos avaliados do método 2, os resultados foram melhores que para as metodologias hipotéticas "100% estacionário" e "100% transiente". Isso indica que a aplicação da metodologia resultou em detecções melhores do que a não aplicação de metodologia alguma de identificação.

Tabela 4.35 – Comparação dos resultados de detecção com Método 2.

Caso	Correto Geral	Estacionários Identificados	Transientes Identificados	Erro Tipo I	Erro Tipo II	Função Objetivo
"100% Estacionário"	76,5%	100%	0,0%	23,5%	0,0%	1,00
"100% Transiente"	23,5%	0,0%	100%	0,0%	76,5%	1,00
Sem Erros de Medida	98,5%	98,4%	98,8%	0,4%	5,0%	1,97
Erros Regulares	57,4%	56,4%	61,0%	17,6%	69,9%	1,17
Erros Acentuados	54,8%	54,6%	55,3%	20,1%	72,7%	1,10
Janela Móvel (Caso 1)	49,4%	36,6%	91,2%	6,9%	69,3%	1,28
Janela Móvel (Caso 2)	63,9%	57,9%	83,4%	8,1%	62,0%	1,41
Janela Móvel (Caso 3)	40,7%	24,3%	94,5%	6,4%	72,5%	1,19
Janela Móvel (Caso 4)	49,4%	39,5%	81,2%	12,8%	70,7%	1,21
Janela Móvel (Caso 5)	54,0%	43,4%	88,4%	7,6%	67,4%	1,32
Janela Móvel (Caso 6)	62,8%	57,0%	81,6%	9,1%	63,0%	1,39
Janela Móvel (Caso 7)	55,3%	49,6%	74,0%	14,0%	68,8%	1,24

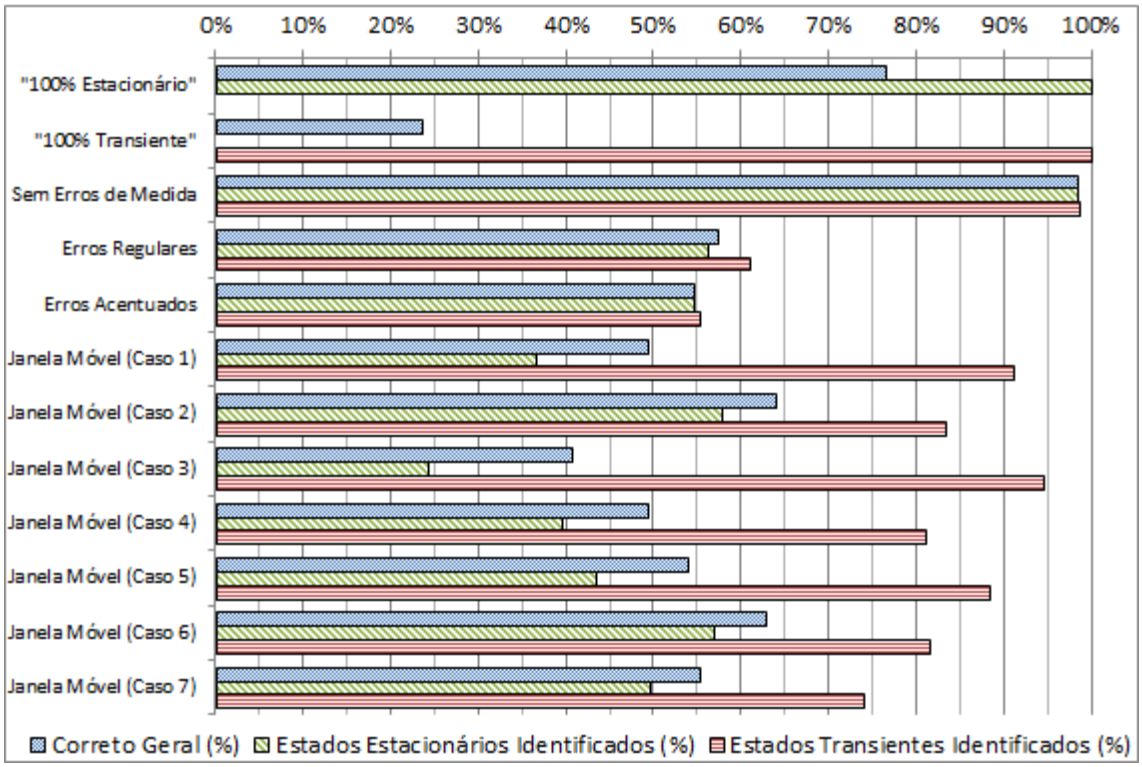

Figura 4.157 – Comparação dos percentuais de detecção com Método 2.

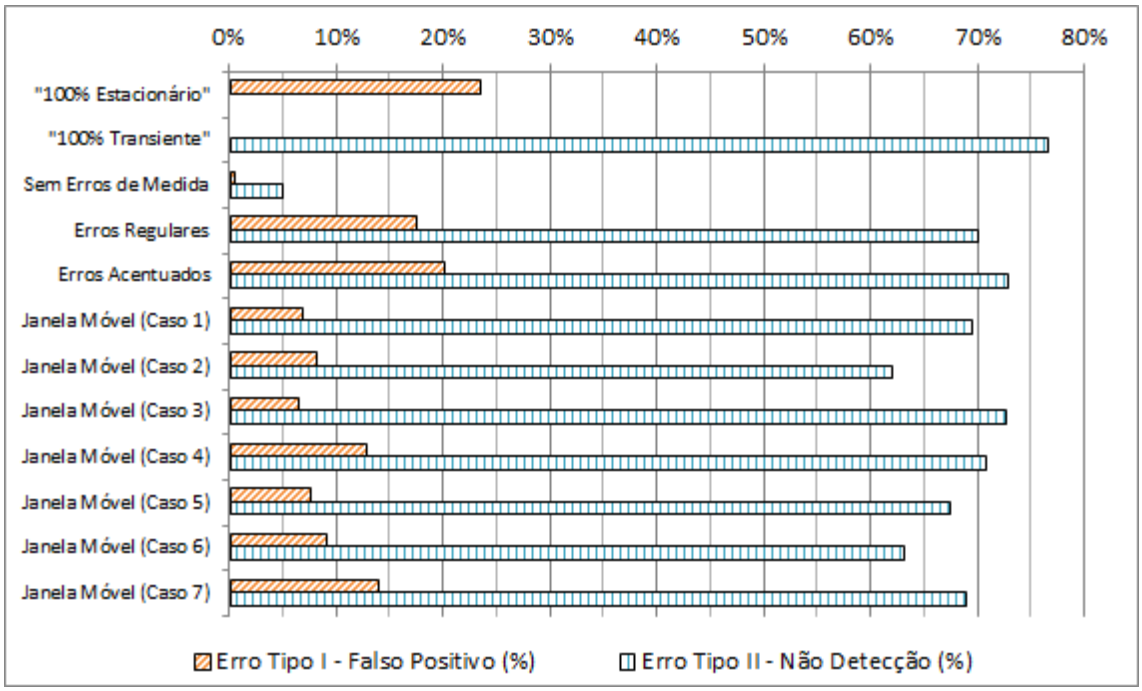

Figura 4.158 – Comparação dos erros tipo I e tipo II com Método 2.

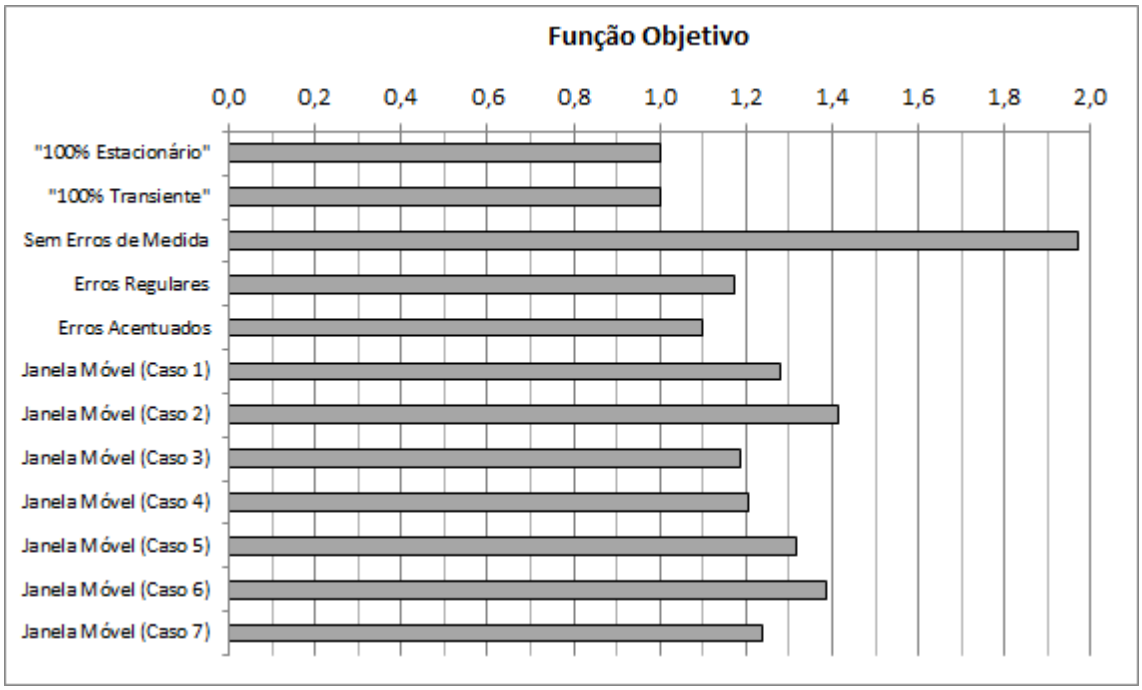

Figura 4.159 – Comparação da função objetivo com Método 2.

4.5.4 Detecção de Estados Estacionários com Metodologia Aceita na Literatura

Foi avaliada a detecção de estados estacionários utilizando uma metodologia com boa aceitação na literatura, aqui referenciada como CAO, para o conjunto de dados gerados com erros aleatórios regulares. A metodologia CAO teve seus parâmetros otimizados como disposto na Seção 3.4.4. Os parâmetros otimizados são apresentados na Tabela 4.36. Os resultados obtidos para as vazões volumétricas são apresentados na Figura 4.160 (pontos identificados como estacionários) e Figura 4.161 (pontos identificados como transientes). Já os resultados obtidos para as temperaturas de entrada e saída são apresentados na Figura 4.162 (pontos identificados como estacionários) e Figura 4.163 (pontos identificados como transientes).

Tabela 4.36 – Parâmetros otimizados para metodologia CAO.

Variável		λ_1	λ_2	λ_3	$R^{Crítico}$
Temperatura	Entrada Corrente Quente	0,23	0,97	0,105	6,05
	Entrada Corrente Fria	0,07	0,25	0,054	2,80
	Saída Corrente Quente	0,04	0,12	0,006	1,80
	Saída Corrente Fria	0,06	0,15	0,054	1,75
Vazão Volumétrica	Corrente Quente	0,40	0,00026	0,0002	1,30
	Corrente Fria	0,02	0,00002	0,0009	0,20

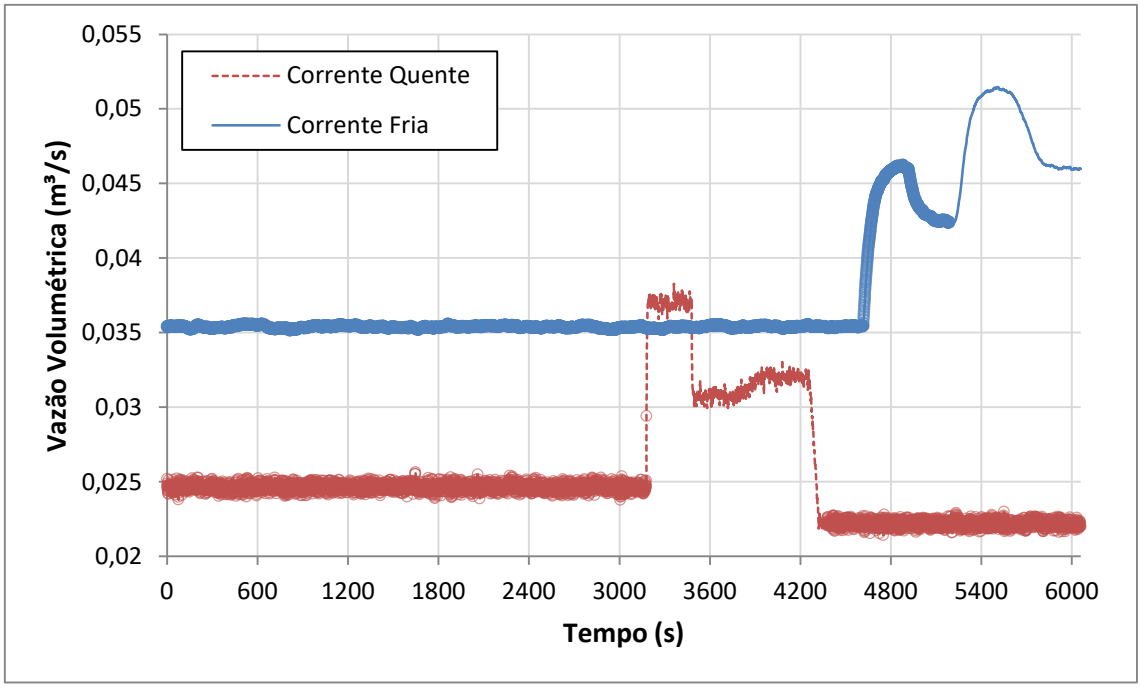

Figura 4.160 – Método CAO: Detecção de pontos estacionários na vazão.

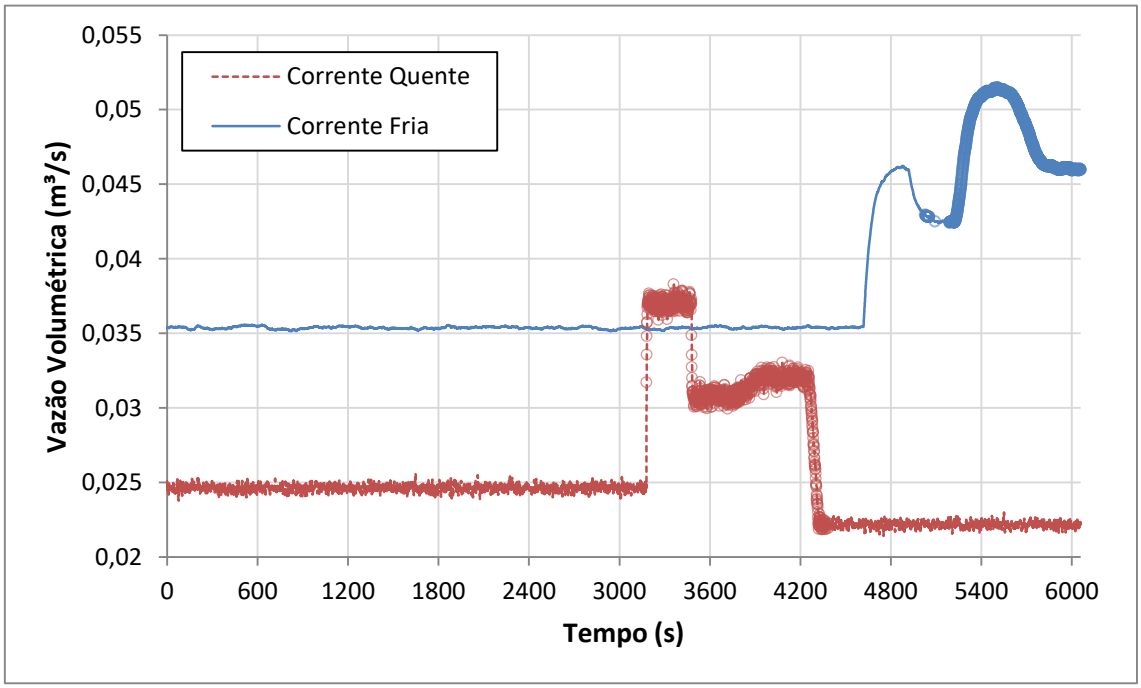

Figura 4.161 – Método CAO: Detecção de pontos transientes na vazão.

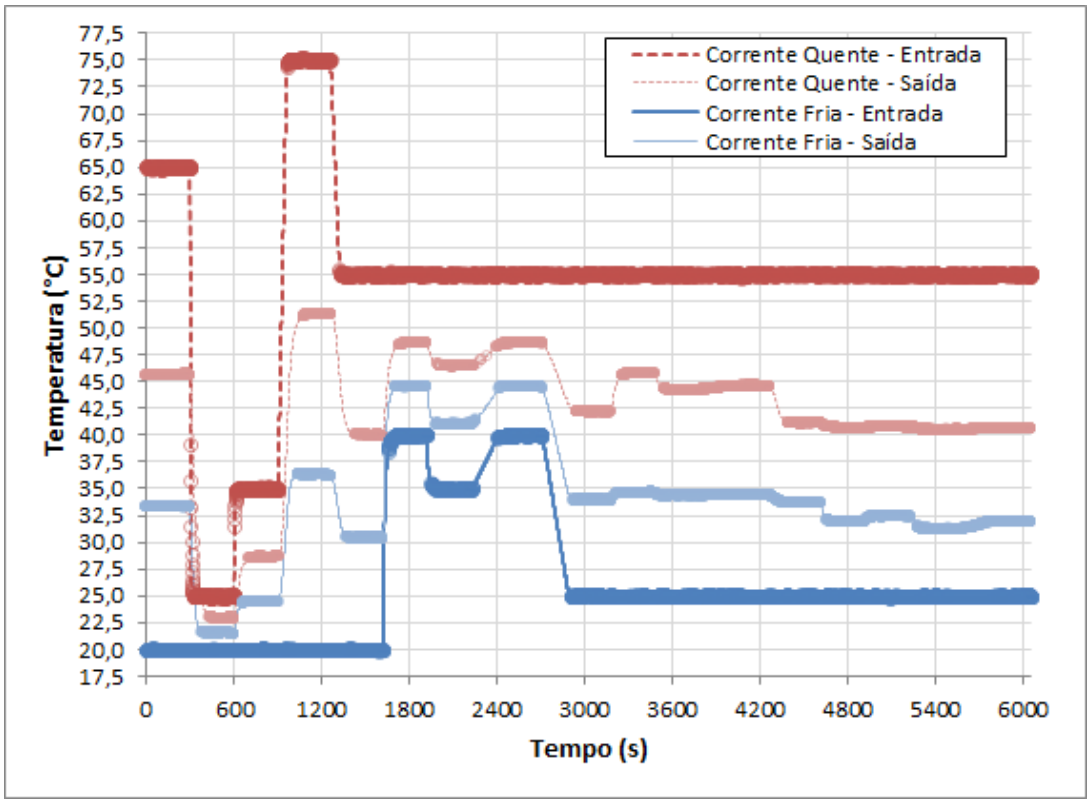

Figura 4.162 – Método CAO: Detecção de pontos estacionários na temperatura.

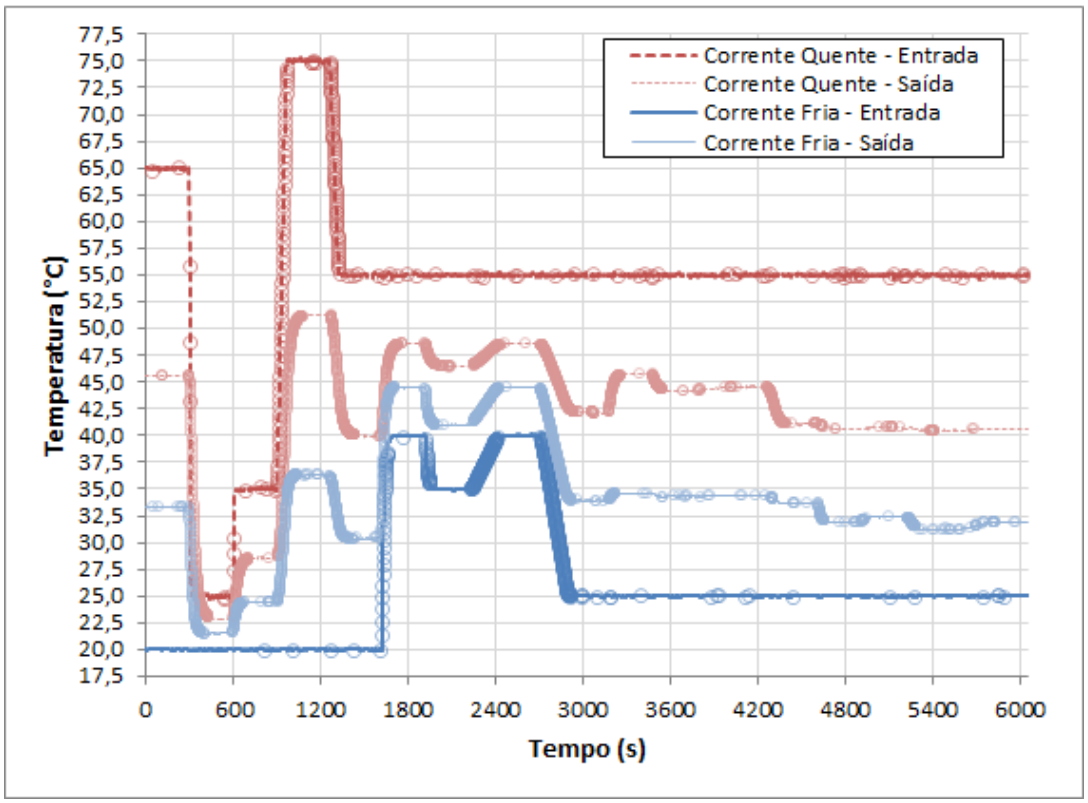

Figura 4.163 – Método CAO: Detecção de pontos transientes na temperatura.

Os pontos no tempo em que todas as seis variáveis foram simultaneamente identificadas como estacionárias definiram os pontos em que o trocador de calor encontrava-se em estado estacionário. Os falsos positivos e falsos negativos são apontados na Figura 4.164. É possível observar que foram poucos os pontos detectados como falso positivos, enquanto o número de falso negativos foi considerável, indicando que o algoritmo otimizado apresenta uma tendência a detectar os pontos como estacionários.

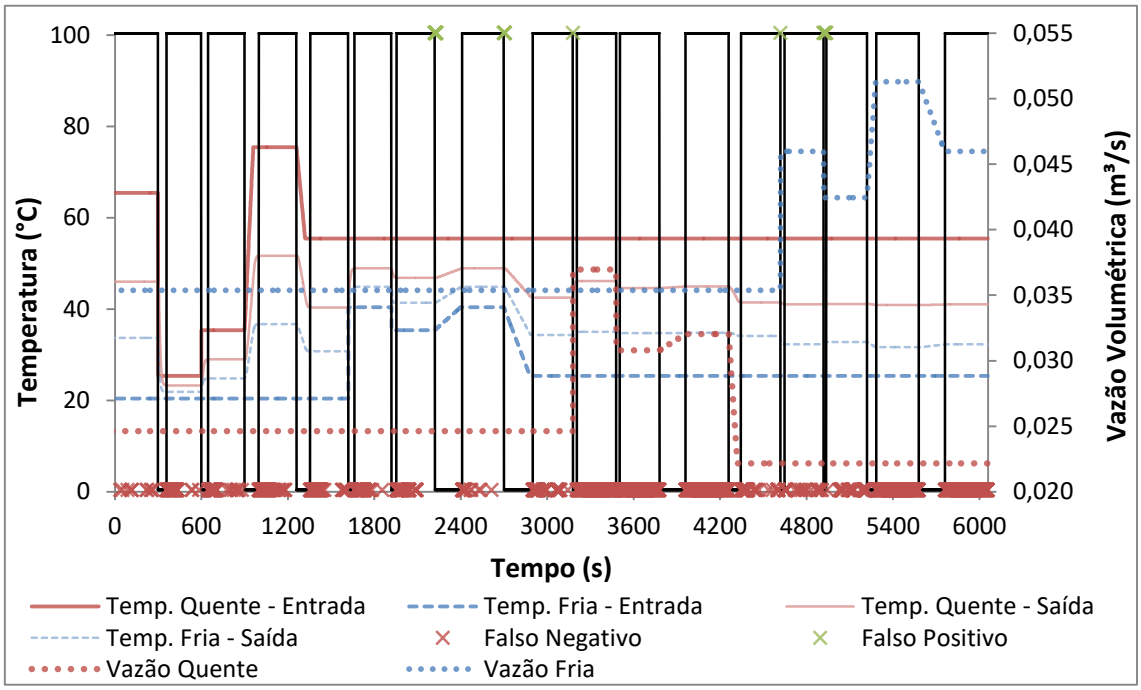

Figura 4.164 – Método CAO: Erros de detecção.

4.5.5 *Comparação dos Métodos de Detecção de Estados Estacionários*

Foram comparados os resultados obtidos pelos dois métodos propostos nesta dissertação com os resultados obtidos por um método bem aceito na literatura (CAO). Todos as metodologias comparadas consideram um frequência de amostragem de 1s entre as medidas, sendo que para as metodologias com janela móvel foi utilizado o caso 1, previamente discutido, com comprimento da janela de 30 segundos, média do tipo "passado" e erros aleatórios "regulares". Também foram incluídos resultados para duas metodologias hipotéticas: a primeira detecta todos os pontos como estacionários (chamada "100% estacionário") e a segunda detecta todos os pontos como transientes (chamada "100% transiente").

Foi observado na Figura 4.165 que os métodos propostos sem erros de medida apresentaram resultados similares entre si. Comparando os métodos aplicados sobre dados com erros de medida, conclui-se que o método 1 apresentou o maior percentual de detecção geral e de detecção de estados estacionários, seguido do método CAO, com o método 2 apresentando os piores resultados.

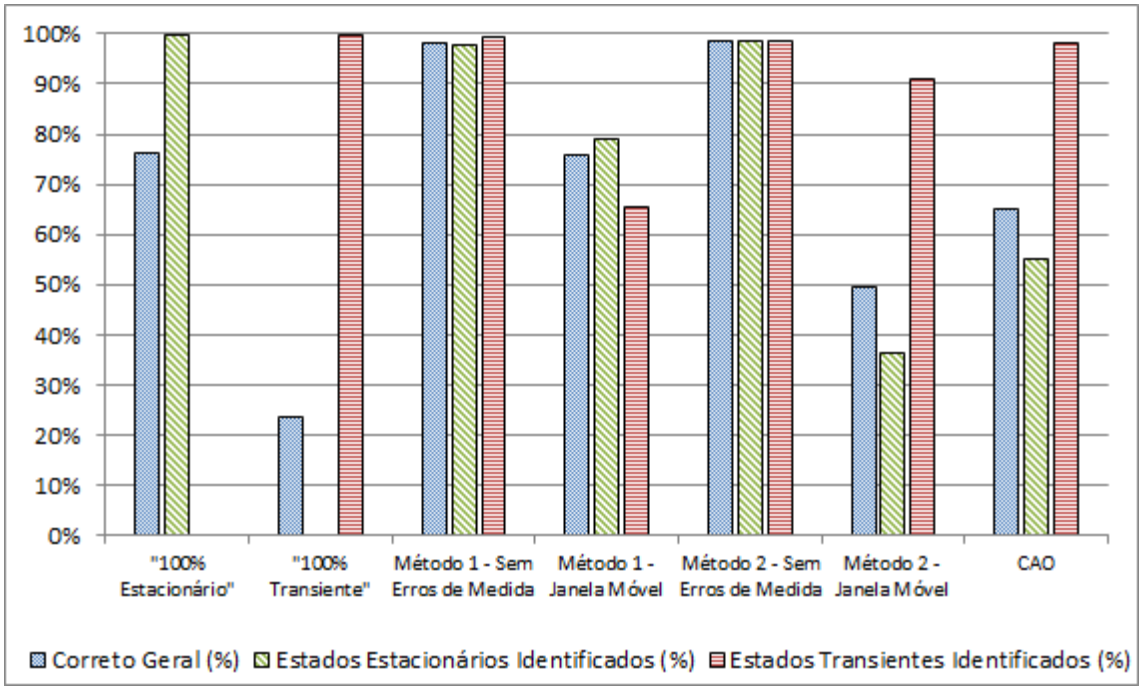

Figura 4.165 – Comparação dos percentuais de detecção com Método 1, Método 2 e Método CAO.

O percentual de erros do tipo I (falso positivo) e erros tipo II (falso negativo ou não detecção) foram apresentados na Figura 4.166. Os métodos propostos sem erros de medida apresentaram resultados similares entre si. Já para os métodos aplicados sobre dados com erros de medida, conclui-se que o método CAO apresentou o menor percentual de erros tipo I, enquanto o método 1 apresentou o menor percentual de erros tipo II.

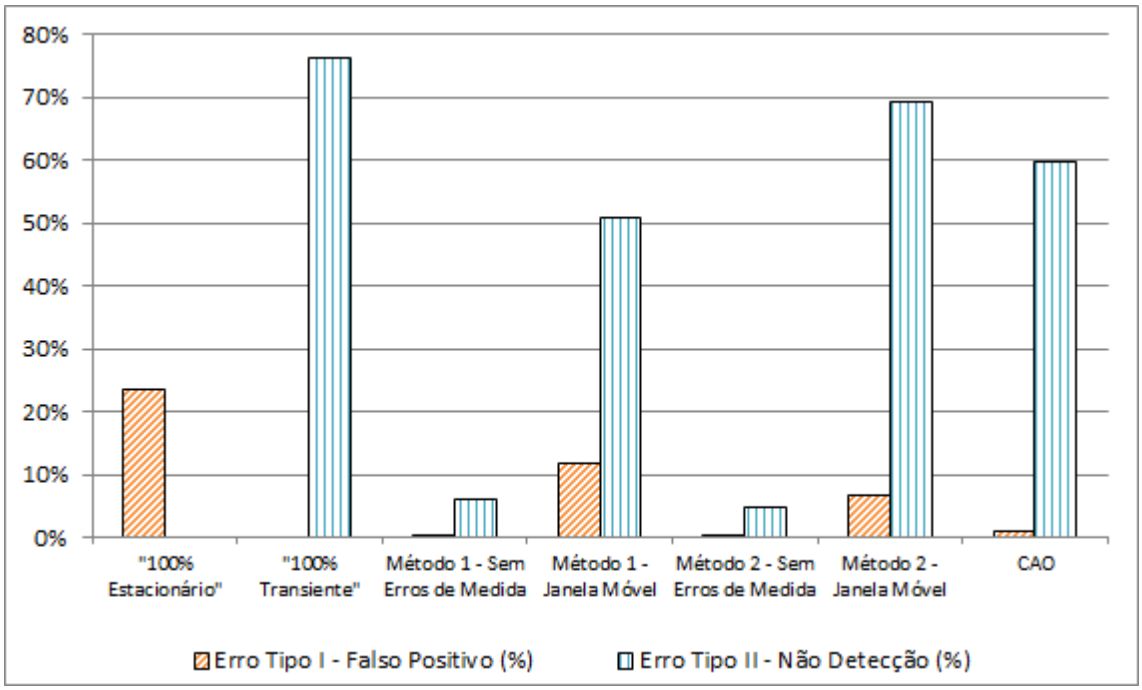

Figura 4.166 – Comparação dos erros tipo I e tipo II com Método 1, Método 2 e Método CAO.

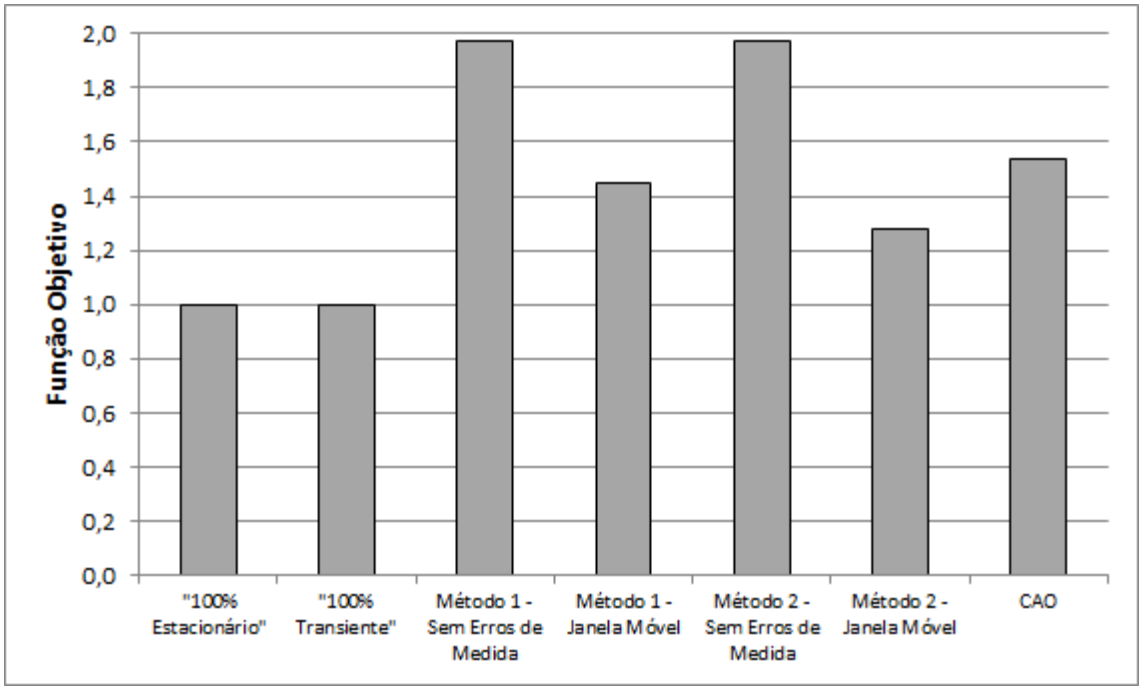

Figura 4.167 – Comparação da função objetivo com Método 1, Método 2 e Método CAO.

Na Figura 4.167 são apresentados os resultados obtidos para a função objetivo sendo maximizada durante a otimização dos parâmetros das metodologias. Os métodos propostos sem erros de medida apresentaram resultados similares entre si. Já para os

métodos aplicados sobre dados com erros de medida, conclui-se que o método CAO apresentou o melhor resultados, seguido pelo método proposto 1.

Como as metodologias de redução de ruído utilizadas nos métodos 1 e 2 não apresentam parâmetros a serem otimizados, sendo menos flexíveis que a metodologia utilizada pelo método CAO, como descrito na Seção 3.4, há a possibilidade de melhorar os resultados de ambas as metodologias propostas ao melhorar a metodologia de redução de ruídos.

4.6 Avaliação da Troca Térmica nos Estados Estacionários Detectados

Para os pontos detectados como estacionários, foi calculado o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor. O valor calculado foi comparado com o valor real, utilizado como parâmetro do modelo.

O erro percentual obtido para os métodos 1 (Figura 4.168) e 2 (Figura 4.169) quando utilizando os dados sem erros de medida ficou abaixo de 0,15%, indicando que as metodologias propostas podem obter excelentes resultados quando os erros de medida são reduzidos. Já quando as metodologias foram aplicadas sobre os dados com erros aleatórios regulares os erros percentuais obtidos foram maiores, chegando a 5%, porém se mantendo em torno de 1% para a maioria dos pontos, como pode ser observado na Figura 4.170 e Figura 4.171.

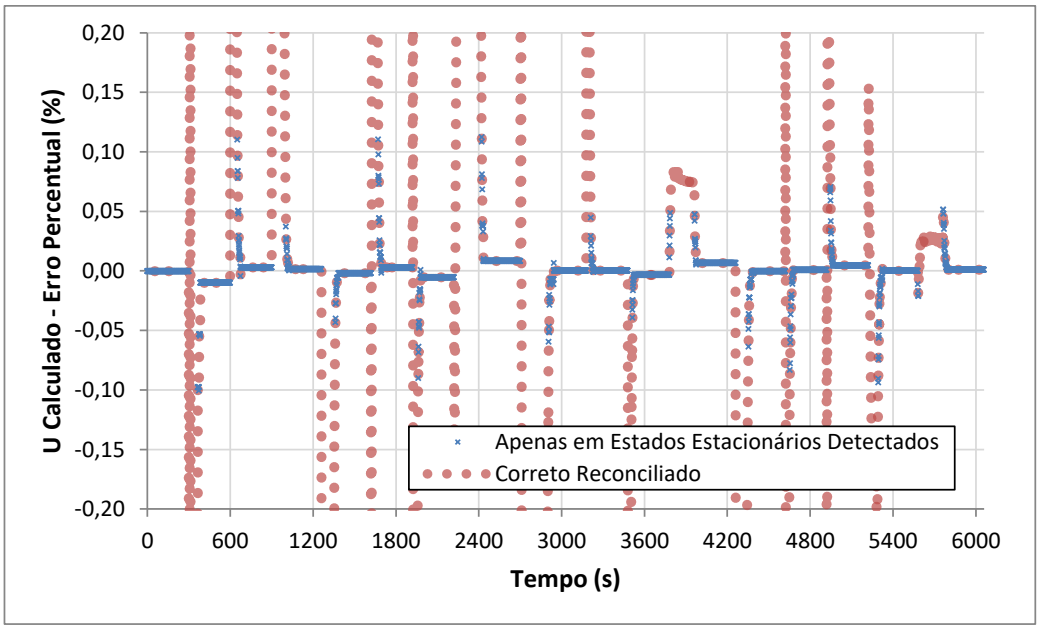

Figura 4.168 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 1 com Dados Corretos (Sem Erros Aleatórios).

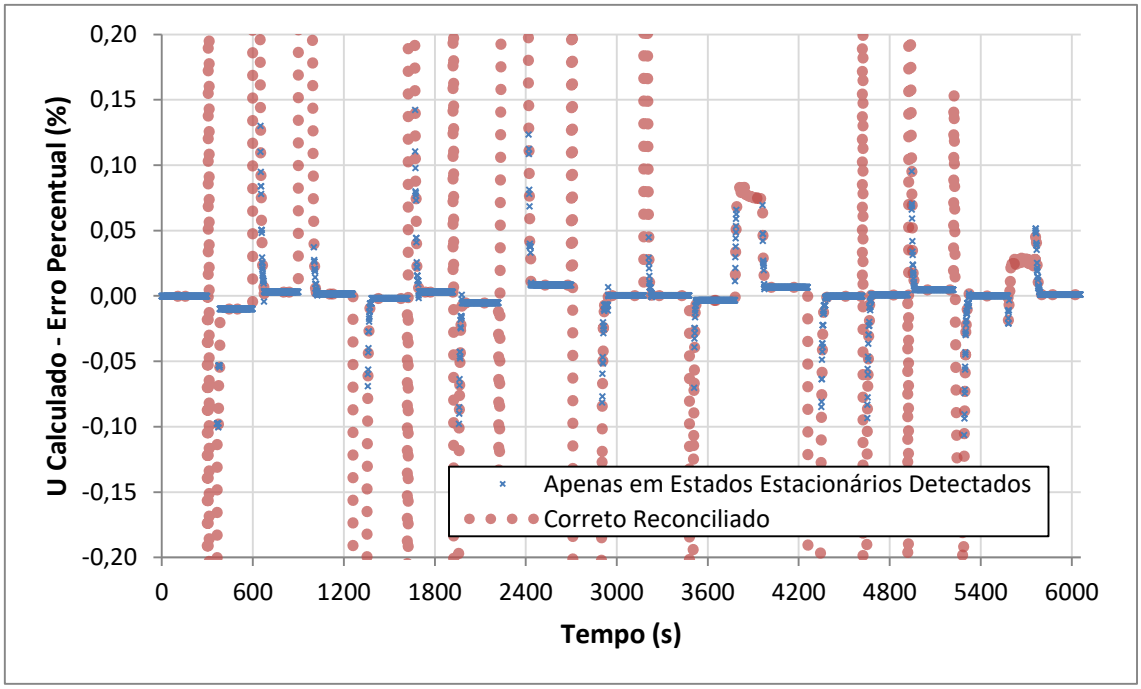

Figura 4.169 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 2 com Dados Corretos (Sem Erros Aleatórios).

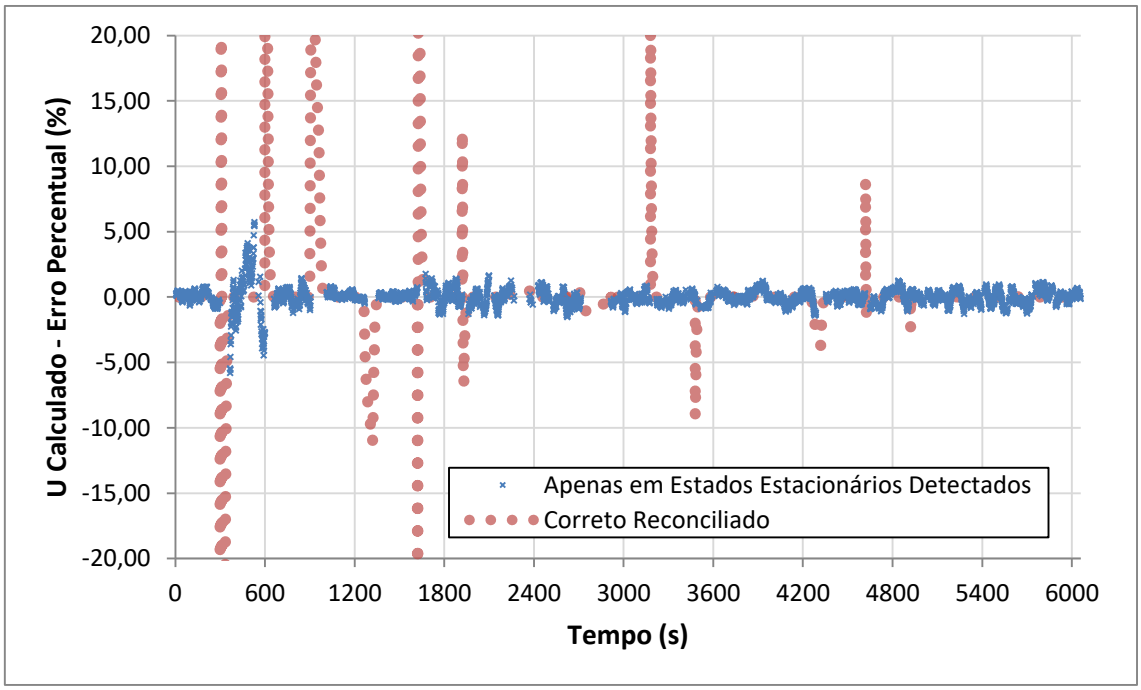

Figura 4.170 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 1 com Janela Móvel aplicada a dados com erros aleatórios.

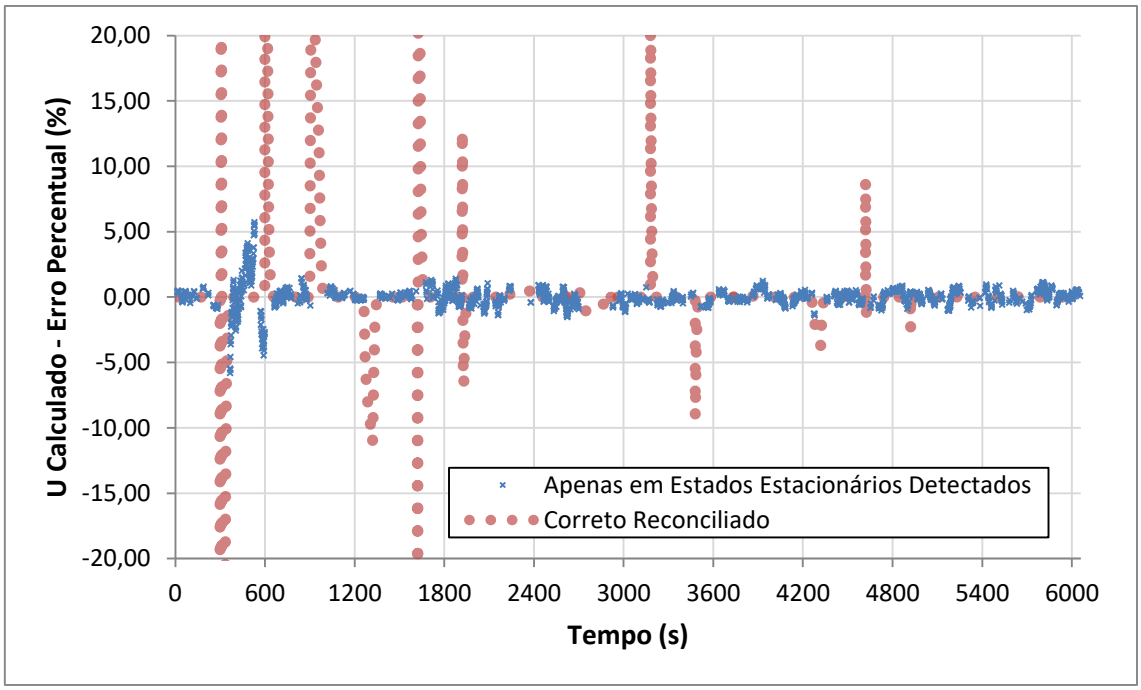

Figura 4.171 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método 2 com Janela Móvel aplicada a dados com erros aleatórios.

Para a metodologia da literatura (CAO) foram obtidos erros percentuais maiores, acima de 7%, com valores mais esparsos para todos os pontos calculados, como é mostrado na Figura 4.172.

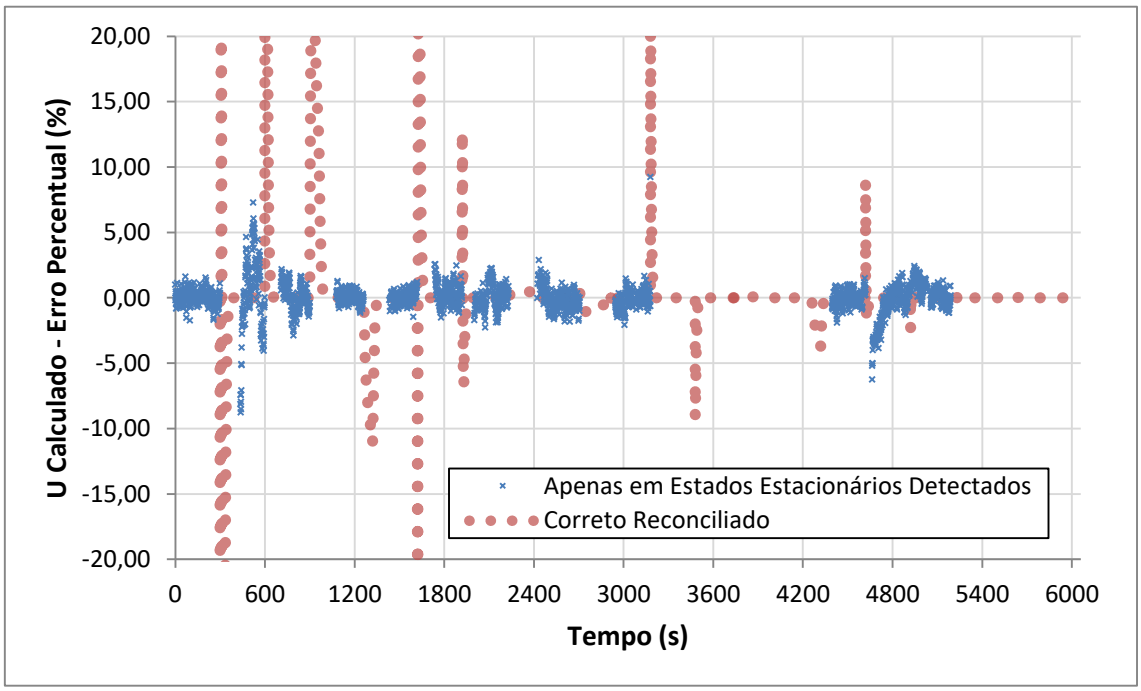

Figura 4.172 – Erro percentual do Coeficiente Global de Troca Térmica calculado pelo Método CAO aplicado a dados com erros aleatórios.

Tendo em vista que o cálculo de parâmetros de equipamentos com base em dados de campo se dá usualmente pela identificação de pontos estacionários e subsequente avaliação do parâmetro, sem a utilização de metodologias de reconciliação de dados para redução de erros, conclui-se que a aplicação das metodologias propostas de identificação de estados estacionários resultam em melhores resultados para a avaliação de parâmetros de campo. Isso pode ser explicado pela redução dos erros resultante da reconciliação de dados, como também pelo critério utilizado na determinação dos pontos estacionários que incluiu o fechamento do balanço de energia em estado estacionário do trocador de calor. Enquanto isso, a metodologia proposta pela literatura aplica-se a qualquer variável medida, sem apresentar qualquer relação com as equações de balanço e fenômenos envolvidos no processo sendo estudado.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Neste estudo foram propostas duas metodologias de detecção de estado estacionário com base na avaliação da adequação dos dados de campo aos balanços de energia em estado estacionário (para o caso considerado de trocadores de calor), por meio da técnica de reconciliação de dados. Dessa forma, foram propostas novas metodologias que garantem que o estado estacionário do ponto de vista do balanço de energia seja satisfeito, o que é primordial na avaliação do desempenho de equipamentos quando são utilizadas equações válidas apenas em estado estacionário.

Não foram encontrados estudos propondo a utilização da metodologia de reconciliação de dados na detecção de estados estacionários, o que caracteriza a contribuição do presente estudo.

Com o objetivo de avaliar o desempenho de trocadores de calor, por meio do monitoramento do coeficiente global de troca térmica em estado estacionário, foi implementado um modelo dinâmico de trocador de calor, de forma a reproduzir os resultados obtidos em plantas de processo. Duas estratégias foram consideradas para o cálculo da diferença de temperatura entre as correntes quente e fria dentro de uma mesma célula: diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ML}) e diferença de temperatura constante (ΔT_{cte}). Determinou-se como requisito que os modelos dinâmicos apresentassem resultados que satisfizessem o balanço de energia quando em estado estacionário. Compararam-se também os resultados da dinâmica entre dois estados estacionários, bem como o tempo computacional das simulações. O número de células variou de 3 a 500. No estado estacionário, a temperatura de saída para as correntes quente e fria, considerando o modelo ΔT_{ML}, não apresentou variação com o aumento do número de células do modelo. Já para o modelo ΔT_{cte} os resultados variaram com o aumento no número de células, com erros entre 1,92% e 4,97% no caso de 3 células, tendendo para os resultados obtidos com o modelo ΔT_{ML} à medida que o número de células aumentou, apresentando erros menores que 0,033% no caso de 500 células. Ambos os modelos (ΔT_{ML} e ΔT_{cte}) apresentaram resultados dinâmicos equivalentes, sendo que modelos com menos células apresentam respostas com início

mais rápido e variações de temperatura mais suaves, enquanto os modelos com mais células apresentam maior atraso para início da resposta dinâmica e variações de temperatura mais rápidas.

Foi simulada a dinâmica de um trocador de calor considerando perturbações nas variáveis de entrada, com o objetivo de gerar dados dinâmicos e estacionários para a aplicação das técnicas de detecção de estados estacionários. Inicialmente foram apresentados os resultados obtidos para as variáveis de entrada e saída, sem considerar erros aleatórios nas medições. Na sequência foram adicionados erros aleatórios em dois níveis distintos, para reproduzir os dados obtidos com instrumentos em plantas reais.

Aplicaram-se janelas móveis sobre os dados simulados com erros, com o objetivo de avaliar os algoritmos de detecção de estado estacionário propostos em diferentes situações. Foi variada a frequência de amostragem dos dados de planta, o comprimento da janela móvel de dados, o tipo de média (dados apenas do passado/presente ou dados do passado/presente/futuro) e o nível de erro (regular ou acentuado).

Realizou-se a reconciliação de dados para todos os conjuntos de dados considerados: resultados corretos (sem erros aleatórios), resultados com erros aleatórios regulares, com erros aleatórios acentuados e para sete casos de janela móvel de tempo. A reconciliação de dados foi aplicada para todos os pontos no tempo, seguindo as equações de balanço de energia em estado estacionário, independente da identificação prévia de estados estacionários. Para a reconciliação considerando dados sem erros aleatórios, concluiu-se que os resultados reconciliados divergem dos resultados corretos durante a operação transiente, como era esperado, tendendo aos resultados corretos à medida que os valores se aproximam de um novo estado estacionário. Para a reconciliação considerando dados com erros aleatórios regulares e acentuados, observou-se que os resultados se aproximaram daqueles obtidos na reconciliação de dados com os resultados corretos, com uma redução no desvio das variáveis quando comparadas com os resultados sem reconciliação. Para a reconciliação considerando janelas móveis aplicadas nos dados com erros regulares e acentuados, observou-se que os resultados reconciliados apresentam um atraso quando comparados com os resultados corretos, devido às janelas móveis, porém os valores reconciliados nos períodos estacionários exibem desvios menores que os obtidos sem a aplicação das janelas móveis.

Foram apresentados os resultados obtidos na detecção de estados estacionários para dois métodos propostos, incluindo a comparação dos mesmos com um método aceito na literatura. O resultado correto esperado foi determinado inicialmente, para que fosse possível qualificar os resultados das metodologias sendo avaliadas. Os métodos propostos aplicados a dados sem erros de medida apresentaram resultados similares entre si, com mais de 98% dos pontos corretamente identificados, menos de 0,4% de erros Tipo I e menos de 6,2% de erros Tipo II. Comparando os métodos aplicados sobre dados com erros de medida, conclui-se que o método 1 apresentou o maior percentual de detecção geral (76%), seguido do método CAO (65%), com o método 2 apresentando os piores resultados (49%). O método CAO apresentou o menor percentual de erros Tipo I/Falso Positivo (1%), seguido do método 2 (6,9%) e método 1 (11,8%), enquanto o método 1 apresentou o menor percentual de erros Tipo II/Não Detecção (50,8%), seguido do método CAO (59,7%) e método 2 (69,3%).

Por fim, para os pontos detectados como estacionários, foi calculado o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor. O valor calculado foi comparado com o valor real, utilizado como parâmetro do modelo. Compararam-se os resultados obtidos pelos dois métodos propostos e pelo método aceito na literatura. O erro percentual obtido para os métodos 1 e 2 quando utilizando os dados sem erros de medida ficou abaixo de 0,15%, indicando que as metodologias propostas podem obter excelentes resultados quando os erros de medida são reduzidos. Já quando as metodologias foram aplicadas sobre os dados com erros aleatórios regulares os erros percentuais obtidos foram maiores, chegando a 5%, porém se mantendo em torno de 1% para a maioria dos pontos. Para a metodologia da literatura (CAO) foram obtidos erros percentuais maiores, acima de 7%, com valores mais esparsos para todos os pontos calculados.

Conclui-se, portanto, que esta dissertação resultou nas seguintes contribuições ao desenvolvimento tecnológico na área de identificação de estados estacionários:

i. Desenvolvimento inovador de método de detecção de estados estacionários com base no valor da função objetivo utilizada para reconciliação de dados;
ii. Desenvolvimento inovador de método de detecção de estados estacionários com base no desvio das variáveis medidas e variáveis reconciliadas por metodologia de reconciliação de dados;

iii. Teste de dois novos métodos propostos, bem como de método aceito na literatura para detecção de estados estacionários em novo conjunto de dados gerados por simulação dinâmica de trocador de calor.

5.2 Sugestões

Em termos de melhorias para os métodos propostos, com base nos ótimos resultados obtidos de identificação de estados estacionários para dados sem erros aleatórios, sugere-se estudar possíveis melhorias no método de redução de ruído dos dados de campo. Nesse estudo foram utilizadas janelas móveis de dados com média móvel simples, enquanto outras possibilidades a serem estudadas seriam a utilização de média móvel exponencial e média móvel ponderada.

Com o objetivo de realizar uma melhor validação dos métodos propostos para aplicação prática na indústria, indica-se realizar um teste com dados industriais reais. Assim seria possível avaliar como os dois métodos propostos iriam funcionar na avaliação da troca térmica de trocadores de calor reais, onde possíveis simplificações do modelo de trocador dinâmico utilizado nesse estudo poderiam se mostrar importantes em casos práticos.

Indica-se ainda o teste dos métodos propostos utilizando dados com erros grosseiros, além dos erros aleatórios já considerados. Essa avaliação poderia, por exemplo, resultar na detecção de estados transientes na presença de erros grosseiros que fazem com que as variáveis medidas desviem da condição de estacionariedade considerada no equacionamento do método de reconciliação de dados.

Por fim, os métodos de detecção de estados estacionários propostos poderiam ser avaliados em outras operações unitárias, como bombas centrífugas, separadores, torres de destilação, etc. Além da utilização em operações unitárias isoladamente, sugere-se também a utilização dos métodos propostos em processos com duas ou mais operações unitárias.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AMAND, T.; HEYEN, G.; KALITVENTZEFF, B. Plant monitoring and fault detection - Synergy between data reconciliation and principal component analysis. Computer & Chemical Engineering, nº25, pp. 501-507, 2001.

[2] ASTORGA-ZARAGOZA, C. M.; ZAVALA-RÍO, A.; ALVARADO, V. M.; MENDEZ, R. M.; REYES-REYES, J. Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers. Measurement, nº40, pp. 392-405, 2007.

[3] ASTORGA-ZARAGOZA, C.; ALVARADO-MARTÍNEZ, V.; ZAVALA-RÍO, A.; MÉNDEZ-OCAÑA, R.; GUERRERO-RAMÍREZ, G. Observer-based monitoring of heat exchangers. ISA Transactions, nº47, pp. 15-24, 2008

[4] CAO, S.; RHINEHART, R. R. An efficient method for on-line identification of steady state. J. Proc. Cont, Vol 5, nº6, pp. 363-374, 1995.

[5] CASTELEIRO-ROCA, J. L.; QUINTIÁN, H.; CALVO-ROLLE, J. L.; CORCHADO, E.; MEIZOSO-LÓPEZ, M. C.; PIÑÓN-PAZOS, A. An intelligent fault detection system for a heat pump installation based on a geothermal heat exchanger. Journal of Applied Logic, 2015.

[6] CASTIER, M.; RAJAGOPAL, K. Thermodynamic Analysis of an Alcohol Distillery. Energy, vol. 13, n° 5, pp. 455-459, 1988.

[7] CAUMO, L. Aplicação e cálculo da derivada de sinais de processos industriais. 2006. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[8] COLETTI, F.; MACCHIETTO, S. A Dynamic, Distributed Model of Shell-and-Tube Heat Exchangers Undergoing Crude Oil Fouling. Ind. Eng. Chem. Res., n°50, pp. 4515-4533, 2011.

[9] CROWE, C. M. Data reconciliation – progress and challenges. J. Proc. Cont, Vol 6, nº2/3, pp. 89-98, 1996.

[10] DELMOTTE, F.; DAMBRINE, M.; DELROT, S.; LALOT, S. Fouling detection in a heat exchanger: a polynomial fuzzy observer approach. Control Engineering Practice, nº21, pp. 1386-1395, 2013.

[11] DIAZ-BEJARANO, E.; COLETTI, F.; MACCHIETTO, S. A new dynamic model of crude oil fouling deposits and its application to the simulation of fouling-cleaning cycles. AIChE Journal, vol.62, nº1, 2016.

[12] ENGEL, F.; MEYER, D.; KRUMDIECK, S. Experimental characterisation of the thermal performance of a finned-tube heat exchanger. 35th New Zealand Geothermal Workshop, 2013.

[13] ESCOBAR, R. F.; ASTORGA-ZARAGOZA, C. M.; TÉLLEZ-ANGUIANO, A. C.; JUÁREZ-ROMERO, D.; HERNÁNDEZ, J. A.; GUERRERO-RAMÍREZ, G. V. Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: application to a double-pipe heat exchanger. ISA Transactions, nº50, pp.480-486, 2011.

[14] FAKHERI, A. Heat Exchanger Efficiency. Transactions of the ASME, vol. 129, pp. 1268-1276, 2007.

[15] FARIAS, A. C. Avaliação de Estratégias para Reconciliação de Dados e Detecção de Erros Grosseiros. 2009. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[16] GAO, T.; SAMMAKIA, B. G.; GEER, J. F.; ORTEGA, A.; SCHMIDT, R. Dynamic Analysis of cross flow heat exchangers in data centers using transient effectiveness method. IEEE Transaction on components, packaging and manufacturing technology, vol.4, nº12, 2014.

[17] GARCIA, R. F. Improving heat exchanger supervision using neural networks and rule based techniques. Expert Systems with Applications, nº 39, pp. 3012-3021, 2012.

[18] GUDMUNDSSON, O. Detection of fouling in heat exchangers. 2008. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade da Islândia, Islândia

[19] HABBI, H.; KINNAERT, M.; ZELMAT, M. A complete procedure for leak detection and diagnosis in a complex heat exchanger using data-driven fuzzy models. ISA Transactions, nº48, pp. 354-361, 2009.

[20] HANAFI, D.; THAN, M. N. M.; EMHEMED, A. A. A.; MULYANA, T.; ZAID, A. M.; JOHARI, A. H. Heat exchanger's shell and tube modeling for intelligent control design. International Conference on Computer and Communication Devices, pp. 37-41, 2011.

[21] IJAZ, H.; ATI, U. M. K.; MAHALEC, V. Heat exchanger network simulation, data reconciliation & optimization. Applied Thermal Engineering, nº52, pp. 328-335, 2013.

[22] JERONIMO, M. A. S.; MELO, L. F.; BRAGA, A. S.; FERREIRA, P. J. B. F.; MARTINS, C. Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchangers: a simplified method. Experimental Thermal and Fluid Science, nº14, pp. 455-463, 1997.

[23] JIANG, T.; CHEN, B.; HE, X.; STUART, P. Application of steady-state detection method based on wavelet transform. Computers and Chemical Engineering, nº 27, pp. 569-578, 2003.

[24] JIANG, X.; LIU, P.; LI, Z. Data reconciliation for steam turbine on-line performance monitoring. Applied Thermal Engineering, nº70, pp. 122-130, 2014.

[25] KELLY, J. D.; HEDENGREN, J. D. A steady-state detection (SSD) algorithm to detect non-stationary drifts in processes. Journal of Process Control, nº23, pp. 326-331, 2013.

[26] KERN, D. Q. Process Heat Transfer. International Edition. McGraw-Hill Book Co, 1965.

[27] KORBEL, M.; BELLEC, S.; JIANG, T.; STUART, P. Steady state identification for on-line data reconciliation based on wavelet transform and filtering. Computers and Chemical Engineering, nº63, pp. 206-218, 2014.

[28] KORZENOWSKI, A. L. Premissas e suposições para construção de gráficos de controle: um framework para verificação. 2009. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em

Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[29] KOURTI, T.; MACGREGOR, J. F. Process analysis, monitoring and diagnosis, using multivariate projection methods. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, nº28, pp. 3-21, 1995.

[30] LE ROUX, G. A. C.; SANTORO, B. F.; SOTELO, F. F.; TEISSIER, M.; JOULIA, X. Improving Steady-State Identification. 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 18, 2008.

[31] LIPORACE, F. S.; OLIVEIRA, S. G. Real Time Fouling Diagnosis and Heat Exchanger Performance. Heat Transfer Engineering, n° 28, pp. 193-201, 2007.

[32] MACGREGOR, J. F.; KOURTI, T. Statistical process control of multivariate processes. Control Eng. Practice, vol.3, nº3, pp. 403-414, 1995.

[33] MARCELLOS, C. F. C. Controle estatístico aplicado a processos contínuos. 2013. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro .

[34] MARKOWSKI, M.; TRAFCZYNSKI, M.; URBANIEC, K. Identification of the influence of fouling on the heat recovery in a network of shell and tube heat exchangers. Applied Energy, nº102, pp. 755-764, 2013.

[35] MARKOWSKI, M.; TRAFCZYNSKI, M.; URBANIEC, K. Validation of the method for determination of the thermal resistance of fouling in shell and tube heat exchangers. Energy Conversion and Management, nº 76, pp. 307-313, 2013.

[36] MATHISEN, K. W.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Dynamic models for heat exchangers and heat exchanger networks. Computers Chem. Engng, Vol 18, Suppl., pp. S459-S463, 1994.

[37] MEJIA, R. I. G.; DUARTE, M. B.; TRIERWEILER, J. O. Avaliação do desempenho de métodos de identificação de estado estacionário. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010.

[38] MENEZES, D. R. C. Aplicação e avaliação de desempenho de um sistema de otimização em tempo real em uma unidade de produção de propeno. 2016. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

[39] MIAO, Y.; SU, H.; WANG, W.; CHU, J. Simultaneous data reconciliation and joint bias and leak estimation based on support vector regression. Computers & Chemical Engineering, nº35, pp. 2141-2151, 2011.

[40] MOHANTY, D. K.; SINGRU, P. M. Use of C-factor for monitoring of fouling in a shell and tube heat exchanger. Energy, nº36, pp. 2899-2904, 2011.

[41] MOHANTY, Dillip K.; SINGRU, Pravin M. Fouling Analysis of a shell and tube heat exchanger using local liner wavelet neural network. International Journal of Heat and Mass Transfer, nº77, pp. 946-955, 2014.

[42] NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. Data Reconciliation & Gross Error Detection. An Intelligent use of Process Data. Gulf Publishing Company, 2000.

[43] NARASIMHAN, S.; MAH, R. S. H.; TAMHANE, A. C.; WOODWARD, J. W.; HALE, J. C. A Composite Statistical Test for Detecting Changes of Steady States. AIChE Journal, vol. 32, nº9, pp. 1409-1418, 1986.

[44] OLIVEIRA JUNIOR, A. M. de. Estimação de Parâmetros em Modelos de Processo Usando Dados Industriais e Técnica de Reconciliação de Dados. 2006. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – COPPE, Univerisade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[45] OZYURT, D. B.; PIKE, R. W. Theory and practice of simultaneous data reconciliation and gross error detection for chemical processes. Computers and Chemical Engineering, nº28, pp. 381-402, 2004.

[46] PALMER, K. A.; HALE, W. T.; SUCH, K. D.; SHEA, B. R.; BOLLAS, G. M. Optimal design of tests for heat exchanger fouling identification. Applied Thermal Engineering, º 95, pp. 382-393, 2016.

[47] PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8th Edition. McGraw-Hill Education, 2007.

[48] PERSIN, S.; TOVORNIK, B. Real-time implementation of fault diagnosis to a heat exchanger. Control Engineering Practice, nº13, pp. 1061-1069, 2005.

[49] PRATA, D. M. Reconciliação robusta de dados para monitoramento em tempo real. 2009. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (COPPE), Uiversidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[50] PRATA, D. M.; SCHWAAB, M.; LIMA, E. L.; PINTO, J. C. Nonlinear dynamic data reconciliation and parameter estimation through particle swarm optimization: Application for an industrial polypropylene reactor. Chemical Engineering Science, nº64, pp. 3953-3967, 2009.

[51] PRATA, D. M.; SCHWAAB, M.;LIMA, E. L.; PINTO, J. C. Simultaneous robust data reconciliation and gross error detection through particle swarm optimization for an industrial polypropylene reactor. Chemical Engineering Science, nº65, pp. 4943-4954, 2010.

[52] ROETZEL, W.; LI, M.; LUO, X. Dynamic Behaviour of heat exchangers. Advanced Computational Methods in Heat Transfer, pp. 452-460, 2002.

[53] ROMAGNOLI, J. A.; SANCHEZ, M. C. Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations, Volume 2. 1st Edition. Academic Press, 2000.

[54] SAHIN, B.; UST, Y.; TEKE, I.; ERDEM, H. H. Performance analysis and optimization of heat exchangers: a new thermoeconomic approach. Applied Thermal Engineering, nº30, pp. 104-109, 2010.

[55] SALAU, N. P. G. Controle de Temperatura em Reatores de Polimerização em Fase Gasosa. 2004. 195f. Disseratação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[56] SAWYER, A.; RUGGLES, A. E.; UPADHYAYA, B. R.; ERYUREK, E.; KAVAKLIOGLU, K.; MILLER, J. Development of a data-based method for performance monitoring of heat exchangers. ECI Digital Archives, nº34, 2003.

[57] SCHLADT, M.; HU, B. Soft sensors based on nonlinear steady-state data reconciliation in the process industry. Chemical Engineering and Processing, nº46, pp.1107-1115, 2007.

[58] SEBZALLI, Y. M.; LI, R. F.; CHEN, F. Z.; WANG, X.Z. Knowledge discovery from process operational data for assessment and monitoring of operator's performance. Computers and Chemical Engineering, nº24, pp.409-414, 2000.

[59] SHROWTI, N. A.; VILANKAR, K. P.; RHINEHART, R. R. Type-II critical values for a steady-state identifier. Journal of Process Control, nº20, pp. 885-890, 2010.

[60] STERMOLE, F. J. The dynamic response of flow forced heat exchangers. 1963. 97f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química). Iowa State University of Science and Technology. United States of America.

[61] TAN, C. K.; WARD, J.; WILCOX, S. J.; PAYNE, R. Artificial neural network modelling of the thermal performance of a compact heat exchanger. Applied Thermal Egineering, nº29, pp. 3609-3617, 2009.

[62] TEIXEIRA, A. C. Reconciliação de dados de processos e detecção de erros grosseiros em sistemas com restrições não-lineares. 1997. 280f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - São Paulo.

[63] TUDÓN-MARTINÉZ, J. C.; MORALES-MENENDEZ, R. Actuator fault diagnosis in a heat exchanger based on classifiers - A comparative study. IFAC-Papers Online, 48-21, pp. 1210-1215, 2015.

[64] VARGA, E. I.; HANGOS, K. M.; SZIGETI, F. Controllability and observability of heat exchanger networks in the time-varying parameter case. Control Eng. Practice, Vol. 3, Nº10, pp. 1409-1419, 1995.

[65] VERBANOV, P.; KLEMES, J.; FRIEDLER, F. Cell-based dynamic heat exchanger models – direct determination of the cell number and size. In: 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20, 2010.

[66] WAKUI, T.; YOKOYAMA, R. On-line model-based performance monitoring of a shell-and-tube type heat exchanger using steam and water, nº49, pp.2669-2677, 2008.

[67] WEYER, E.; SZEDERKENYI G.; HANGOS, K. Grey box fault detection of heat exchangers. Control Engineering Practice, nº8, pp. 121-131, 2000.

[68] YAMASHITA, Y. Supervised learning for the analysis of process operational data. Computers and Chemical Engineering, nº24, pp. 471-474, 2000.