



SINTONIA DOS CONTROLADORES DOS TROCADORES DE CALOR DO PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DE GÁS EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO

Vinícius Cunha Cruz Plácido

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientadores: Maurício B. de Souza Jr.

Daniel M. Thomaz

Argimiro R. Secchi

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2017

SINTONIA DOS CONTROLADORES DOS TROCADORES DE CALOR DO
PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DE GÁS EM PLATAFORMAS DE
PETRÓLEO

Vinícius Cunha Cruz Plácido

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinado por:

Prof. Maurício B. de Souza Jr., D.Sc.

Eng. Daniel M. Thomaz, B.Sc.

Prof. Argimiro R. Secchi, D.Sc.

Prof. Rossana O. M. Folly, D.Sc.

Eng. José Manuel G. T. Perez, D.Sc.; Petrobras

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2017

Cunha Cruz Plácido, Vinícius

Sintonia dos Controladores dos Trocadores de Calor do Processo de Condicionamento de Gás em Plataformas de Petróleo/Vinícius Cunha Cruz Plácido. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2017.

XIX, 83 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Maurício B. de Souza Jr.

Daniel M. Thomaz

Argimiro R. Secchi

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 82 – 83.

1. controladores. 2. sintonia. 3. PID. I. B. de Souza Jr., Maurício *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, a minha família por sempre ter me dado o suporte necessário para seguir em frente, firme e forte. Principalmente, aos meus pais, Marco e Angélica, e aos meus irmãos, Victor e Thiago.

Devo ainda prestar agradecimentos e homenagens aos meus mestres, professores e orientadores que tão importante foram na construção da minha vida acadêmica e profissional. Enfatizando ainda mais os que fazem parte dessa banca e fizeram parte da minha orientação.

Desejo ainda mostrar minha eterna gratidão aos meus amigos que estiveram comigo durante todos esses anos de faculdade.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à POLI/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

**SINTONIA DOS CONTROLADORES DOS TROCADORES DE CALOR DO
PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DE GÁS EM PLATAFORMAS DE
PETRÓLEO**

Vinícius Cunha Cruz Plácido

Fevereiro/2017

Orientadores: Maurício B. de Souza Jr.

 Daniel M. Thomaz

 Argimiro R. Secchi

Curso: Engenharia de Controle e Automação

Nesse Projeto de Graduação, apresenta-se uma planta de processamento de gás natural na qual foram adicionados controladores PID associados aos trocadores de calor da mesma. O objetivo principal é comparar as sintonias resultantes dos métodos Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, CHR, IMC e da Integral do Erro e determinar a melhor para cada um dos controladores.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que o método Ziegler-Nichols foi o que apresentou melhores resultados para a sintonia dos controladores estudados.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Control and Automation Enginner.

**TUNING PID CONTROLLERS OF GAS HEATERS AND COOLERS OF GAS
CONDITIONING AT OIL PLATFORMS**

Vinícius Cunha Cruz Plácido

February/2017

Advisors: Maurício B. de Souza Jr.

 Daniel M. Thomaz

 Argimiro R. Secchi

Course: Control and Automation Engineering

In this work, a natural gas plant field production was presented, in which PID controllers are added, associated to its gas coolers and heaters. The aim of this work is the comparison of different tune methods (Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, CHR, IMC, IAE and ITAE) and the discussion of which one of those is the best for the controllers at this plant.

To sum up, it is concluded that Ziegler-Nichols Method was the one that had the best tuning results for the studied controllers.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xvi
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Produção de Petróleo e Gás <i>Offshore</i>	3
2.1.1 Extração	3
2.1.2 Separação Trifásica	5
2.1.3 Hidrociclones	5
2.1.4 Processamento do Gás	6
2.2 Controle de Processos	7
2.2.1 Controle PID	7
2.2.2 Sintonia do Controle PID	9
3 Identificação: Metodologia, Resultados e Discussão	15
3.1 Identificação do Trocador de Calor <i>coolerMain1</i>	17
3.2 Identificação do Trocador de Calor <i>coolerMain2</i>	18
3.3 Identificação do Trocador de Calor <i>coolerDehy</i>	19
3.4 Identificação do Trocador de Calor <i>MembraneHeater</i>	20
3.5 Identificação do Trocador de Calor <i>Cooler_Exportation_1</i>	21
3.6 Identificação do Trocador de Calor <i>Cooler1ExpTRain2</i>	22
3.7 Identificação do Trocador de Calor <i>Cooler_Exportation_T1S2</i>	23
3.8 Identificação do Trocador de Calor <i>Cooler2ExpTRain2</i>	24
3.9 Tempo Morto nas Identificações	26
3.9.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	26
3.9.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	26
3.9.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	26
3.9.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	26
3.9.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	27

4 Controle: Metodologia, Resultados e Discussões	28
4.1 Método Ziegler-Nichols da Malha Fechada	28
4.1.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	28
4.1.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	30
4.1.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	31
4.1.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	33
4.1.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	34
4.2 Método Ziegler-Nichols da Malha Aberta	36
4.2.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	36
4.2.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	37
4.2.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	38
4.2.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	39
4.2.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	40
4.3 Método Cohen-Coon	41
4.3.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	41
4.3.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	42
4.3.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	43
4.3.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	44
4.3.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	45
4.4 Método da Integral do Erro	45
4.4.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	46
4.4.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	48
4.4.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	50
4.4.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	52
4.4.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	55
4.5 Método CHR	57
4.5.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	57
4.5.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	59
4.5.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	61
4.5.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	63
4.5.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	65
4.6 Método IMC	67
4.6.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	67
4.6.2 Trocador <i>coolerDehy</i>	69
4.6.3 Trocador <i>MembraneHeater</i>	70
4.6.4 Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	72
4.6.5 Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	73
4.7 Comparação das Sintonias	75
4.7.1 Trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	75

4.7.2	Trocador <i>coolerDehy</i>	76
4.7.3	Trocador <i>MembraneHeater</i>	77
4.7.4	Trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	78
4.7.5	Trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> . .	79
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	81
	Referências Bibliográficas	82

Listas de Figuras

1.1	Processo de geração tecnológica <i>offshore</i> . FONTE: MORAIS (2013)	2
2.1	Exemplo do sistema de extração e produção <i>offshore</i> . FONTE: MORAIS (2013)	4
2.2	Início do tratamento da mistura trifásica. FONTE: THOMAS (2001)	4
2.3	Separação trifásica. FONTE: THOMAS (2001)	5
2.4	Hidrociclone. FONTE: THOMAS (2001)	6
2.5	Esquema simplificado de um processo, seu controle e a retroalimentação do sistema	7
2.6	Esquema simplificado de um controlador PID	8
2.7	Exemplo de resposta do sistema ao atingir o ganho crítico K_u	10
2.8	Exemplo da curva de reação e da aproximação pelo modelo de primeira ordem com atraso.	11
3.1	Planta de Processamento do Gás Natural	16
3.2	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>coolerMain1</i>	17
3.3	Com 85,42% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>coolerMain1</i>	17
3.4	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>coolerMain2</i>	18
3.5	Com 85,42% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>coolerMain2</i>	18
3.6	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>coolerDehy</i>	19
3.7	Com 98,75% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>coolerDehy</i>	20
3.8	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>MembraneHeater</i>	20
3.9	Com 99,22% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>MembraneHeater</i>	21
3.10	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>Cooler_Exportation_1</i>	21
3.11	Com 93,59% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>Cooler_Exportation_1</i>	22
3.12	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>Cooler1ExpTRain2</i>	22

3.13	Com 93,58% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>Cooler1ExpTRain2</i>	23
3.14	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>Cooler_Exportation_T1S2</i>	24
3.15	Com 97,71% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>Cooler_Exportation_T1S2</i>	24
3.16	Perturbação e resposta a mesma no trocador <i>Cooler2ExpTRain2</i>	25
3.17	Com 97,70% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador <i>Cooler2ExpTRain2</i>	25
4.1	Com ganho proporcional $K_u = 1800$, verifica-se a resposta do sistema para os trocadores <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i>	29
4.2	Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada	30
4.3	Com ganho proporcional $K_u = 19250$, verifica-se a resposta do sistema para o trocador <i>coolerDehy</i>	30
4.4	Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada	31
4.5	Com ganho proporcional $K_u = 20000$, verifica-se a resposta do sistema para o trocador <i>MembraneHeater</i>	32
4.6	Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada	33
4.7	Com ganho proporcional $K_u = 4400$, verifica-se a resposta do sistema para os trocadores <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i>	33
4.8	Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada	34
4.9	Com ganho proporcional $K_u = 7500$, verifica-se a resposta do sistema para os trocadores <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i>	35
4.10	Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada	36
4.11	Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta	37
4.12	Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta	38
4.13	Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta	39

4.14 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta	40
4.15 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta	41
4.16 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método Cohen-Coon	42
4.17 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método Cohen-Coon	43
4.18 Resposta dos sistemas controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método Cohen-Coon	44
4.19 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método Cohen-Coon	44
4.20 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método Cohen-Coon	45
4.21 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	46
4.22 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	46
4.23 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	47
4.24 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	47
4.25 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	48
4.26 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	49
4.27 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	49
4.28 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	50
4.29 Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	51

4.30 Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	51
4.31 Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	52
4.32 Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	52
4.33 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	53
4.34 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	53
4.35 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	54
4.36 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	54
4.37 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	55
4.38 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	56
4.39 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	56
4.40 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	57
4.41 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação	58
4.42 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação	58
4.43 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação	59

4.44 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação	60
4.45 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação	60
4.46 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação	61
4.47 Resposta dos sistemas controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação	62
4.48 Resposta dos sistemas controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação	62
4.49 Resposta dos sistemas controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação	63
4.50 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação	64
4.51 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação	64
4.52 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação	65
4.53 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação	66
4.54 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação	66
4.55 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação	67
4.56 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1	68
4.57 Resposta dos sistemas controlador- <i>coolerMain1</i> e controlador- <i>coolerMain2</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2	69
4.58 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1	70
4.59 Resposta do sistema controlador- <i>coolerDehy</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2	70

4.60 Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1	71
4.61 Resposta do sistema controlador- <i>MembraneHeater</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2	72
4.62 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1	73
4.63 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_1</i> e controlador- <i>Cooler1ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2	73
4.64 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1	74
4.65 Resposta dos sistemas controlador- <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e controlador- <i>Cooler2ExpTRain2</i> utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2	75
4.66 Respostas para os diferentes métodos utilizados nos controladores do <i>coolerMain1</i> e do <i>coolerMain2</i>	75
4.67 Respostas dos melhores métodos utilizados nos controladores do <i>coolerMain1</i> e do <i>coolerMain2</i>	76
4.68 Respostas para os diferentes métodos utilizados no controlador do <i>coolerDehy</i>	76
4.69 Respostas dos melhores métodos utilizados no controlador do <i>coolerDehy</i>	77
4.70 Respostas para os diferentes métodos utilizados no controlador do <i>MembraneHeater</i>	77
4.71 Respostas dos melhores métodos utilizados no controlador do <i>MembraneHeater</i>	78
4.72 Respostas para os diferentes métodos utilizados nos controladores do <i>Cooler_Exportation_1</i> e do <i>Cooler1ExpTRain2</i>	78
4.73 Respostas dos melhores métodos utilizados nos controladores do <i>Cooler_Exportation_1</i> e do <i>Cooler1ExpTRain2</i>	79
4.74 Respostas para os diferentes métodos utilizados nos controladores do <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e do <i>Cooler2ExpTRain2</i>	79
4.75 Respostas dos melhores métodos utilizados nos controladores do <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e do <i>Cooler2ExpTRain2</i>	80

Lista de Tabelas

2.1	Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	10
2.2	Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	11
2.3	Sintonia pelo método de Cohen-Coon	12
2.4	Sintonia pelo método IMC	12
2.5	Sintonia pelo método da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967) . . .	13
2.6	Sintonia pelo método da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969) . .	13
2.7	Sintonia pelo CHR, sem sobrelevação - caso servo	13
2.8	Sintonia pelo CHR, sem sobrelevação - caso regulatório	13
2.9	Sintonia pelo CHR, com 20% de sobrelevação - caso servo	14
3.1	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	26
3.2	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>coolerDehy</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	26
3.3	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>MembraneHeater</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	26
3.4	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta . . .	26
3.5	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta . . .	27
4.1	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	29
4.2	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	29
4.3	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>coolerDehy</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	31
4.4	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	31
4.5	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>MembraneHeater</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	32

4.6	Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	32
4.7	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	34
4.8	Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	34
4.9	Parâmetros da dinâmica do processo de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	35
4.10	Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada	35
4.11	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	36
4.12	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	37
4.13	Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	38
4.14	Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	39
4.15	Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta	40
4.16	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método de Cohen-Coon	41
4.17	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método de Cohen-Coon	42
4.18	Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método de Cohen-Coon	43
4.19	Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método de Cohen-Coon	44
4.20	Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método de Cohen-Coon	45
4.21	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	46
4.22	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	47
4.23	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	48
4.24	Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	49

4.25 Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	50
4.26 Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	51
4.27 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	53
4.28 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	54
4.29 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método da integral do erro - por LOPEZ <i>et al.</i> (1967)	55
4.30 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método da integral do erro - por ROVIRA <i>et al.</i> (1969)	56
4.31 Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método CHR	58
4.32 Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método CHR . . .	59
4.33 Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método CHR .	61
4.34 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método CHR	63
4.35 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método CHR	65
4.36 Valores de λ sugeridos para o Método IMC	67
4.37 Parâmetros da dinâmica do processo de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> - Método IMC	68
4.38 Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerMain1</i> e <i>coolerMain2</i> pelo método IMC	68
4.39 Parâmetros da dinâmica do processo de <i>coolerDehy</i> - Método IMC . . .	69
4.40 Ganhos resultantes do controlador de <i>coolerDehy</i> pelo método IMC . . .	69
4.41 Parâmetros da dinâmica do processo de <i>MembraneHeater</i> - Método IMC .	71
4.42 Ganhos resultantes do controlador de <i>MembraneHeater</i> pelo método IMC .	71
4.43 Parâmetros da dinâmica do processo de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> - Método IMC	72
4.44 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_1</i> e <i>Cooler1ExpTRain2</i> pelo método IMC	72
4.45 Parâmetros da dinâmica do processo de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> - Método IMC	74

4.46 Ganhos resultantes do controlador de <i>Cooler_Exportation_T1S2</i> e <i>Cooler2ExpTRain2</i> pelo método IMC	74
---	----

Capítulo 1

Introdução

A fim de expandir a exploração e a produção de petróleo e gás natural, a indústria petroquímica brasileira vinha investindo (até a crise econômica) fortemente em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que permitissem e/ou facilitassem a produção *offshore* dos mesmos (MORAIS, 2013).

As maiores dificuldades técnicas encontradas por tais experimentações tecnológicas se devem justamente às condições físicas do ambiente: condições climáticas no ambiente marinho e rochoso abaixo do leito oceânico; grandes distâncias entre poços e plataformas e entre plataformas e continente; observabilidade dentro do mar.

Como se pode ver no diagrama da figura 1.1, as dificuldades da produção de petróleo e gás são muitas e começam antes mesmo da extração dessas substâncias. Com isso, as empresas produtoras de petróleo se associaram a instituições científicas capazes de desenvolver as soluções requeridas para o contínuo crescimento da extração e produção *offshore* (MORAIS, 2013).

A intenção desse projeto é não só enunciar alguns desses problemas e suas soluções na extração e processamento dos produtos, mas principalmente realizar o processamento do gás natural a partir da mistura extraída.

Vale lembrar e ressaltar que, em uma planta de processamento de gás, o que se tem de mais perigoso é a pressão do mesmo e, considerando a temperatura como um agente que influencia diretamente a pressão, controlá-la de maneira correta e segura se torna essencial. No caso de não existir um controle correto da temperatura de compressão, pode-se causar um acidente ou falha do equipamento, o que poderia resultar em prejuízos humano e financeiro da planta.

Sendo assim, tendo em vista o processamento do gás, faz-se necessário haver controle sobre os processos envolvidos. De tal maneira, o objetivo desse trabalho é propor sintonias adequadas para os controladores dos trocadores de calor na planta da melhor maneira possível. Para tal, faz-se o estudo dos métodos de sintonia, a fim de identificar qual será o melhor para cada um dos trocadores da planta. Todos esses processos são semelhantes aos realizados em CARAPETO (2017), no qual foram adicionados PIDs à planta virtual

e, também, deliberou-se acerca das sintonias dos mesmos.

Pensando no objetivo descrito acima, esse trabalho foi estruturado com: uma breve Introdução (Capítulo 1), conceitos a serem aplicados descritos na Revisão Bibliográfica (Capítulo 2), o estudo acerca da Identificação dos processos estudados (Capítulo 3), o estudo do Controle em si e os métodos de sintonia aplicados (Capítulo 4) e uma etapa de Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros (Capítulo 5).

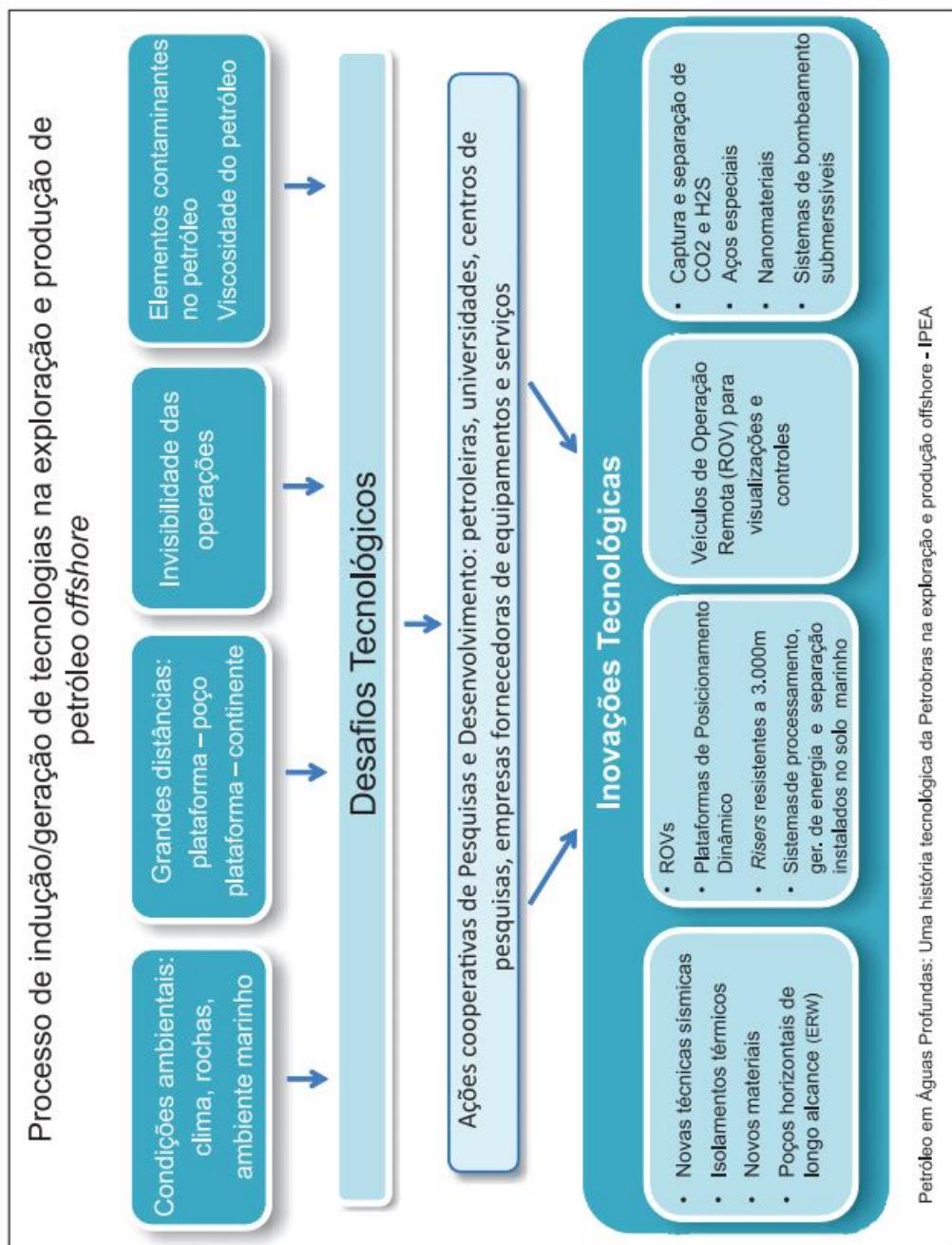


Figura 1.1: Processo de geração tecnológica *offshore*. FONTE: MORAIS (2013)

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Produção de Petróleo e Gás *Offshore*

Como MORAIS (2013) explica, nos reservatórios submersos, encontra-se o tão desejado petróleo em sua composição de hidrocarbonetos, em proporções de 11% a 14% para o hidrogênio e de 83% a 87% para o carbono, sendo o resto impurezas (enxofre e nitrogênio, entre outros). É importante lembrar que, nos reservatórios, também se pode encontrar o gás natural em sua forma livre ou associado ao próprio petróleo e que, quanto maior o percentual de moléculas pequenas o hidrocarboneto tiver, mais gasosa será a mistura.

Após a análise de qual o tipo de reservatório e do que se encontra nele, a próxima fase é a da extração da mistura água-petróleo-gás do poço e a chegada da mesma nas plataformas onde ocorrerá o processamento, que pode ser brevemente ilustrada pela figura 2.1.

2.1.1 Extração

Na extração de poços *offshore*, a principal característica adversa a ser superada é a grande profundidade dos mesmos. Para possibilitar a realização da mesma, projetam-se estruturas capazes de superar grandes pressões externas, fortes correntezas e com uma elevada resposta mecânica aos processos, além de utilizarem-se de robôs como auxílio (MORAIS, 2013).

Esta fase, como explica MORAIS (2013), inicia-se com a perfuração do poço, utilizando-se de materiais capazes de suportar as grandes pressões oriundas da profundidade evitando colapsos; continuando com a condução da mistura trifásica (água-petróleo-gás) pelos *risers* (grandes dutos isolados termicamente com o objetivo é evitar o entupimento do mesmo por causa de cristais de hidratos, incrustações ou parafinas; e capazes de suportar as grandes pressões das colunas d'água e movimentações das plataformas).

Os adventos acima associados a potentes sistemas de bombeamento, que permitem a "subida" da mistura trifásica dos poços até as plataformas, fazem com que essa etapa de extração seja cumprida. Através de equipamentos especializados e a partir desse ponto,

inicia-se a separação da mistura e o processamento de cada um dos componentes o fluxo individualmente.

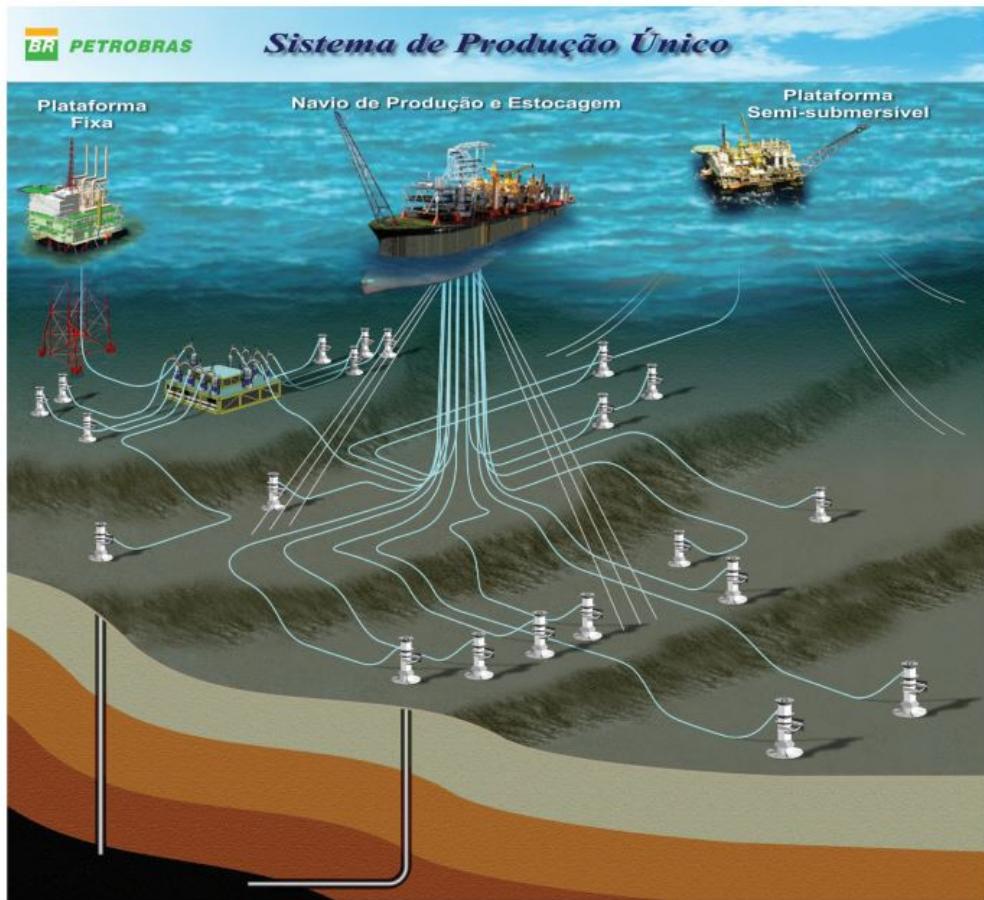


Figura 2.1: Exemplo do sistema de extração e produção *offshore*. FONTE: MORAIS (2013)

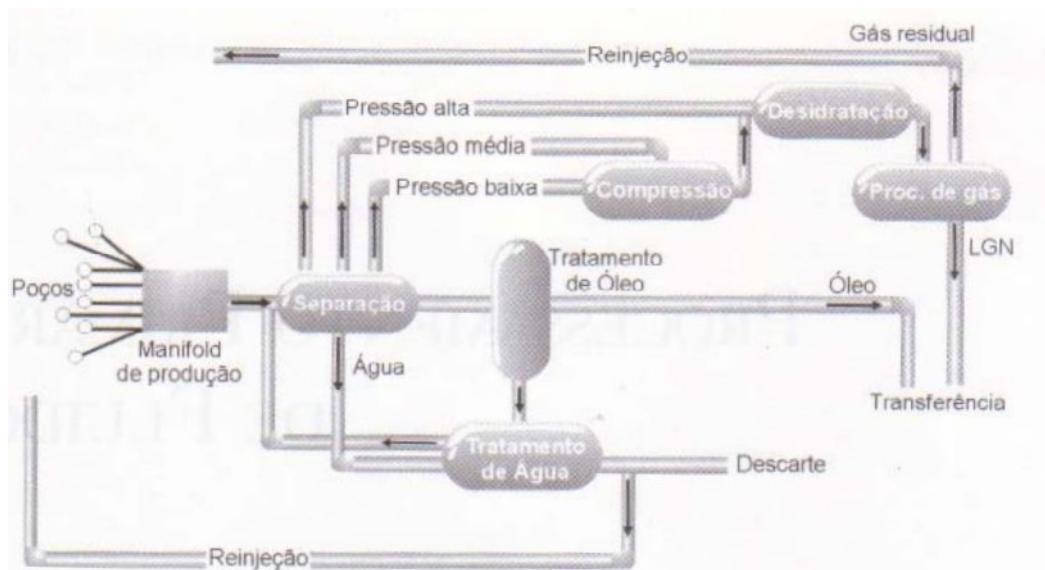


Figura 2.2: Início do tratamento da mistura trifásica. FONTE: THOMAS (2001)

2.1.2 Separação Trifásica

Nessa fase de separação, a corrente de alimentação é composta pela mistura completa dos três elementos e, ao final do processo, formam-se três correntes distintas. Nesse estágio, a maior parte do gás é separada a partir de uma câmara de expansão (ou câmara de óleo, como na figura 2.3); enquanto que a água e o óleo se separam através da ação de placas e bombas.

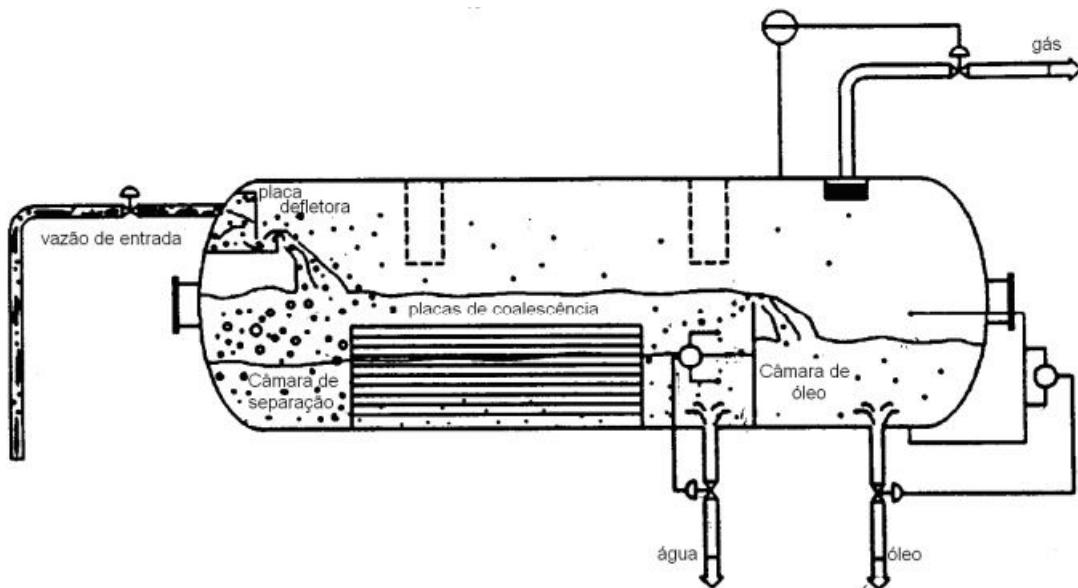


Figura 2.3: Separação trifásica. FONTE: THOMAS (2001)

Após a passagem por esse separador, a água passará por processos de tratamento da mesma para que possa ser despejada ou reinjetada; o gás passará por processos os quais nos aprofundaremos mais a frente na dissertação e o óleo passará pelo próximo tratamento: hidrociclones.

2.1.3 Hidrociclones

Esse estágio se torna necessário para que sejam retiradas as frações de gás e água residuais ainda solubilizadas no óleo. Este aparato consiste em uma estrutura helicoidal, na qual a fase oleosa entra tangencialmente à mesma, e a segregação de fases ocorre utilizando-se do princípio da separação centrífuga.

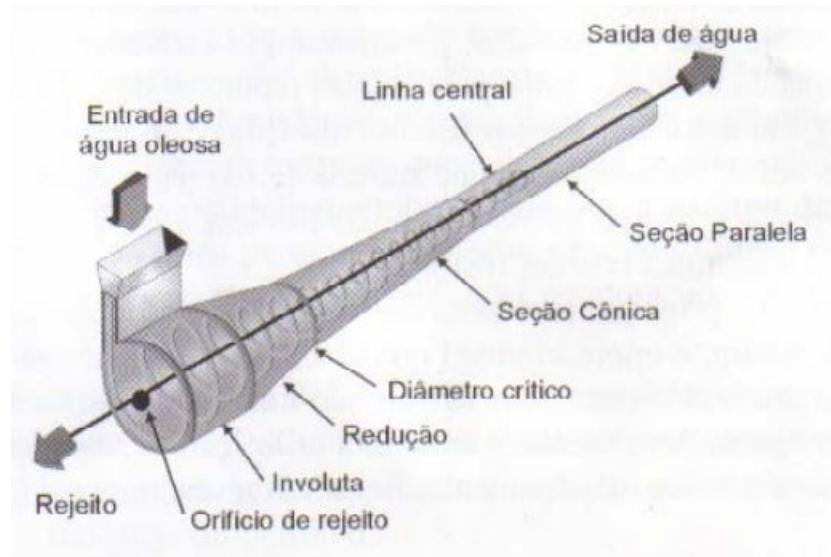


Figura 2.4: Hidrociclone. FONTE: THOMAS (2001)

Ao término desse processo, o petróleo já passou pelos tratamentos de natureza física e ainda passará por tratamentos de natureza química a frente para completar seu refinamento, como a eliminação de impurezas, por exemplo.

2.1.4 Processamento do Gás

Após as duas etapas anteriores, o gás natural ainda necessita passar por uma etapa de tratamento do mesmo. Sendo assim, a próxima etapa consiste no seu processamento. Para tal, começa-se com uma simples compressão dele a fim de aumentar a pressão da corrente e, consequentemente, permitir o aumento da eficiência da planta (CAMPOS *et al.*, 2013) e o escoamento por toda essa etapa chegando ao destino final. Vale ressaltar que se torna interessante que este aumento de pressão seja tal que, a pressão na entrada do processamento do gás não aumente muito e prejudique a exploração do poço.

Logo em seguida, existem as etapas de remoção da água residual e de outras impurezas (CO_2 e H_2S se for o caso, por exemplo) do gás, o que pode ser realizado de diferentes maneiras. Essas etapas mostram-se extremamente importantes porque a água pode formar hidratos com o gás, ocasionando em depósitos residuais nas tubulações sucessoras; enquanto que, os gases ácidos podem capacitar o aumento do processo corrosivo das tubulações, como explica MORAIS (2013).

Para ajudar a visualização do que acontece, escolheu-se o que foi apresentado em SANT'ANNA (2005) para mostrar um dos modos possíveis de desidratação do gás. No estudo, com a utilização de uma torre absorvedora, um tanque flash e uma coluna regeneradora, a ideia é que a corrente gasosa com resíduos de água sofra desidratação da seguinte maneira: ela entra por baixo da absorvedora e fica em contra-corrente com um solvente que entrou por cima, tendo como resultado o gás com menos resíduos (desidra-

tado) saindo por cima e uma mistura de água e solvente no inferior. No tanque flash, ocorre a expansão da corrente material, que serve para a remoção dos compostos voláteis da mistura, aparelho no qual ocorre a remoção desses gases ácidos; enquanto que, a coluna regeneradora terá o papel de separar a água do solvente.

Antes que o gás seja liberado das Unidades de Processamento de Gás Natural, ele sofre mais um processo de compressão para assegurar que ele saia com a pressão ainda maior, com o intuito de que não haja entupimento da cabeça.

2.2 Controle de Processos

Com o que foi visto acima, pode-se imaginar que há várias situações nas quais um bom comportamento do sistema é desejado, mesmo se submetido a variações e perturbações. E é dessa forma que o controle vai agir, acompanhando e garantindo esse bom comportamento.

O objetivo principal do controle é fazer com que tudo funcione normalmente da maneira mais eficiente possível, mantendo sempre a estabilidade da planta. Na figura 2.5, tem-se uma exemplificação de sua utilização.

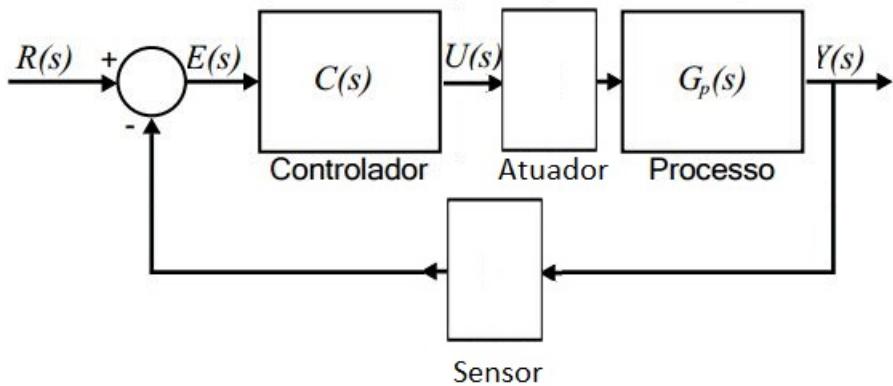


Figura 2.5: Esquema simplificado de um processo, seu controle e a retroalimentação do sistema

No caso apresentado, trabalha-se com uma planta de processamento do gás natural, o que torna ainda mais claro que não há margem para erros no controle. Ainda considerando essa planta e considerando o controle sobre os trocadores de calor da mesma, sabe-se que, por conta das naturezas químicas e relações entre temperatura e pressão, torna-se ainda mais importante a identificação e a análise da malha de controle que deve ser utilizada.

2.2.1 Controle PID

O Controle Proporcional Integral Derivativo é o tipo de controle mais clássico e disseminado de todos (SEBORG *et al.*, 2010). Por ser um controle que funciona com a malha

fechada, sua entrada consiste na diferença entre o valor que é desejado na saída, Y_{sp} , e o valor real da saída, Y . Após passar pelas três ações de controle, a saída desse controle é a entrada da planta.

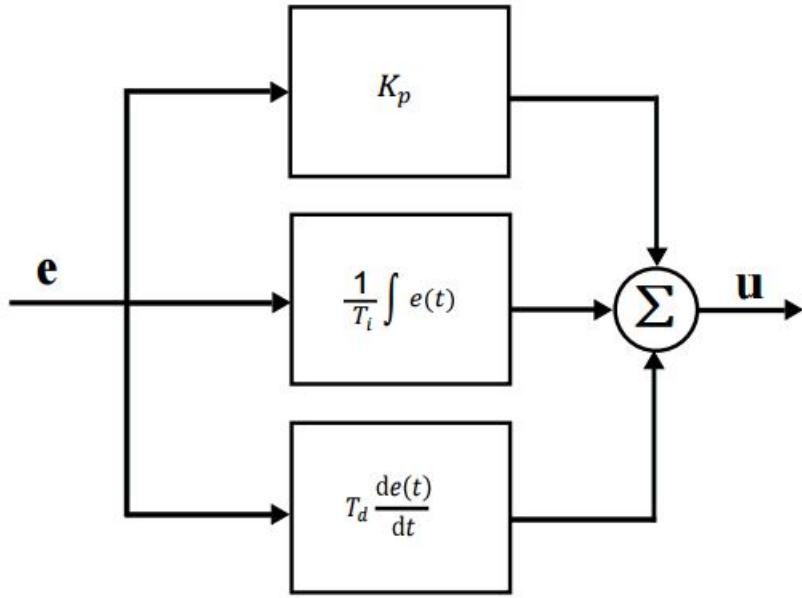


Figura 2.6: Esquema simplificado de um controlador PID

Na figura 2.6, pode-se ver os blocos separados relacionados a cada uma das ações que o próprio nome do controle enuncia. Cada um desses blocos tem diferentes objetivos em relação ao funcionamento da planta:

Ação proporcional

Age proporcionalmente ao erro (diferença descrita anteriormente), visando minimizá-lo; entretanto, não consegue anulá-lo no estado estacionário (OGATA e YANG, 1970).

Ação integral

Age baseando-se nos sinais de erro passados, visando anular o erro em estado estacionário; entretanto, aumenta o período oscilatório da saída e ameaça a estabilidade do sistema em malha fechada (OGATA e YANG, 1970).

Ação derivativa

Age baseado com a taxa de variação do sinal de erro, visando a estabilidade do sistema em malha fechada, além de aumentar a velocidade da resposta do sistema, o que consequentemente diminui as oscilações do sinal de saída, entretanto, é um controle de implementação difícil devido a problemas de ruído (OGATA e YANG, 1970).

Portanto, pode-se observar que os objetivos principais desses controles combinados, em malha fechada, serão:

1. Manter a estabilidade em malha fechada;
2. Rejeição de distúrbios;
3. Respostas rápidas e suaves para variações de *set point*;
4. Anulação do erro em estado estacionário;
5. Sistema de controle robusto, que seja insensível a pequenas variações do processo e erros de modelagem do mesmo;

Dessa maneira, pode-se partir para a próxima etapa do problema da utilização de tal controle: a sintonia dos ganhos.

2.2.2 Sintonia do Controle PID

A ideia da sintonia do controle é justamente dosar quais das ações proporcional, integral ou derivativa devem ter mais ou menos importância na atuação sobre o sistema.

Existem diversas maneiras de realizar a sintonia e, nesse projeto, foram escolhidos os métodos que serão apresentados a seguir:

Método de Ziegler-Nichols

Este foi o primeiro método de ajuste dos ganhos de um controlador PID criado. Baseado em testes práticos, J. G. Ziegler e N. B. Nichols determinaram regras empíricas para o ajuste (ZIEGLER e NICHOLS, 1942).

Eles foram responsáveis por determinar dois métodos, na realidade. Ambos se baseiam em determinar características da dinâmica do processo em um primeiro momento e, posteriormente, utilizando as informações anteriores, os parâmetros do controlador são determinados a partir de fórmulas dependente dessas variáveis relacionadas ao processo.

- Método da Resposta em Frequência

Também conhecido como método Ziegler-Nichols da malha fechada, inicia-se a retroalimentação apenas com o controlador proporcional (ganho integral e ganho derivativo são iguais a zero). Gradativamente, aumenta-se o ganho proporcional até que se chegue em resposta oscilatória da planta.

Neste ponto, serão determinados os parâmetros característicos da dinâmica do processo: o ganho crítico (K_u) e o período crítico (T_u), como na figura 2.7.

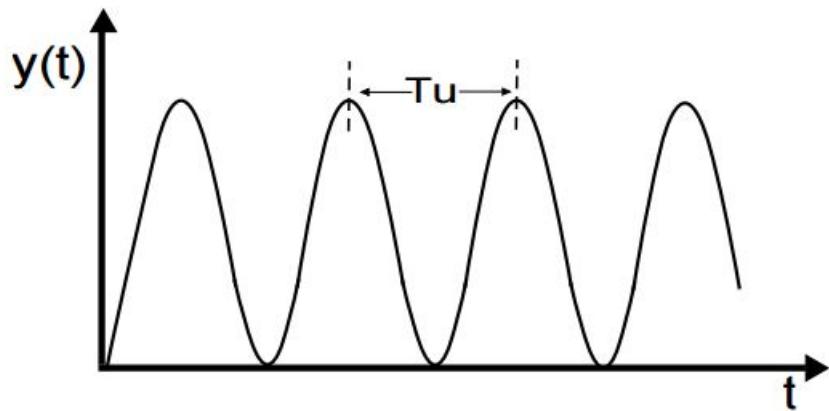


Figura 2.7: Exemplo de resposta do sistema ao atingir o ganho crítico K_u

Utilizando tais valores, ZIEGLER e NICHOLS (1942) propõe a tabela 2.1 para o cálculo dos ganhos do controlador.

Tabela 2.1: Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.45 K_u$	$T_u/1.2$	-
PID	$0.6 K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

- Método da Resposta ao Degrau

Também é conhecido como método Ziegler-Nichols da malha aberta, por realizar a análise sobre a curva de resposta ao degrau em malha aberta do processo a ser controlado.

Imaginando-se um sistema de ordem superior, tem-se a seguinte curva de resposta ao degrau unitário como exemplo e sua função de transferência (figura 2.8) ao se propor uma aproximação por um sistema de primeira ordem com tempo morto.

Ao se traçar uma tangente ao ponto de inflexão da curva, pode-se analisar a determinação dos parâmetros da dinâmica do processo. Dessa forma, ZIEGLER e NICHOLS (1942) propõe a tabela 2.2 para o cálculo dos ganhos do controlador.

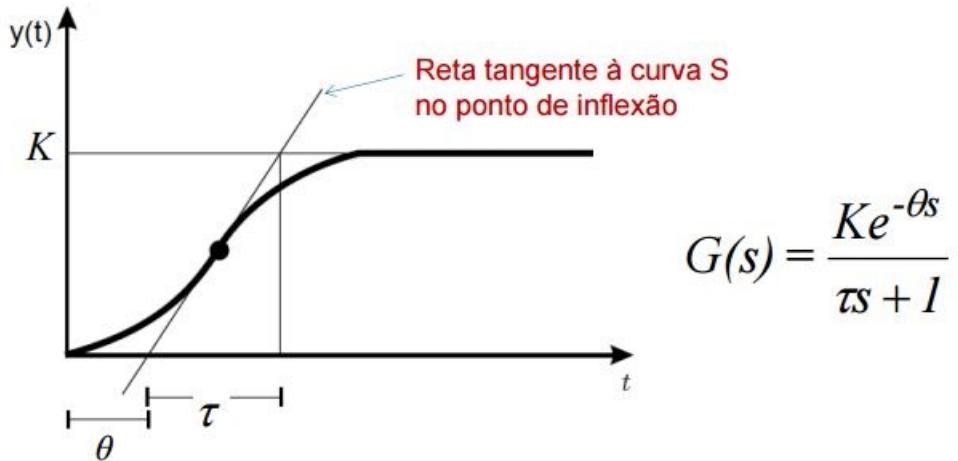


Figura 2.8: Exemplo da curva de reação e da aproximação pelo modelo de primeira ordem com atraso.

Tabela 2.2: Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\tau/K\theta$	-	-
PI	$0.9(\tau/K\theta)$	3.33θ	-
PID	$1.2(\tau/K\theta)$	2θ	0.5θ

É importante salientar que tal método é, em geral, provedor de uma boa sintonia em casos os quais o fator de controlabilidade ($\frac{\theta}{\tau}$) é menor que 0,3 (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 2004).

Método Cohen-Coon

O engenheiro G. H. Cohen e o matemático G. A. Coon realizaram estudos teóricos a fim de obter os parâmetros de sintonia adequados para processos com tempos mortos mais elevados ($\frac{\theta}{\tau}$ maior que 0,3).

Vale reiterar que, para a determinação dos parâmetros da dinâmica do processo, também se utiliza, nesse método, a análise da curva de resposta do processo a uma perturbação do tipo degrau.

Utilizando tais parâmetros do processo, COHEN e COON (1953) propõe a tabela 2.3 para o cálculo dos ganhos do controlador.

Tabela 2.3: Sintonia pelo método de Cohen-Coon

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$(1.03 + 0.35(\frac{\theta}{\tau})) \frac{\tau}{K\theta}$	-	-
PI	$(0.9 + 0.083(\frac{\theta}{\tau})) \frac{\tau}{K\theta}$	$\frac{(0.9+0.083(\frac{\theta}{\tau}))}{(1.27+0.6(\frac{\theta}{\tau}))} \theta$	-
PID	$(1.35 + 0.25(\frac{\theta}{\tau})) \frac{\tau}{K\theta}$	$\frac{(1.35+0.25(\frac{\theta}{\tau}))}{(0.54+0.6(\frac{\theta}{\tau}))} \theta$	$\frac{0.5\theta}{(1.35+0.25(\frac{\theta}{\tau}))}$

Método Internal Model Control (IMC)

Esse método possui inúmeras versões propostas por diferentes autores (BATISTA *et al.*, 2014). Considerando a proposta de RIVERA *et al.* (1986) e uma dinâmica do processo também representada pelo modelo de primeira ordem com atraso, tem-se a possibilidade de balancear robustez e performance do controlador.

Esse método também utiliza a análise da curva de resposta do processo a uma perturbação do tipo degrau para determinar os parâmetros da dinâmica do processo. Entretanto, tem-se também um novo parâmetro a ser escolhido arbitrariamente, λ , que irá influenciar no ganho proporcional e, consequentemente, na sua importância de tal ganho para o controle do processo. A relação $\frac{\lambda}{\tau}$ vai determinar o desempenho do controlador perante o processo.

Dessa maneira, RIVERA *et al.* (1986) propõe a tabela 2.4 para o cálculo dos ganhos do controlador.

Tabela 2.4: Sintonia pelo método IMC

Controlador	K_p	T_i	T_d	Sugestão de desempenho
PI	$\frac{2\tau+\theta}{2K\lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	-	$\frac{\lambda}{\theta} > 0.8$
PID	$\frac{2\tau+\theta}{K(2\lambda+\theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{2\tau+\theta}$	$\frac{\lambda}{\theta} > 1.7$

Método da Integral do Erro

Baseado nas integrais de erro absoluto IAE e ITAE, esse método foi criado para a minimização dos critérios de desempenho do sistema a ser controlado. Assim, regras ótimas para determinar os ganhos do PID foram obtidas para um modelo de primeira ordem com tempo morto.

Novamente, utilizando o método da curva de resposta do processo a uma perturbação do tipo degrau, é possível determinar os parâmetros da dinâmica do processo. Sendo que, nesse método, o fator de controlabilidade $(\frac{\theta}{\tau})$ deve estar entre 0 e 1.

É importante salientar que os principais autores desses métodos são LOPEZ *et al.* (1967) e ROVIRA *et al.* (1969). O primeiro apresenta resultados otimizados para características regulatórias e o outro para características servo, respectivamente. Sendo assim, apresentam as tabelas 2.5 e 2.6 para o cálculo dos ganhos do controlador.

Tabela 2.5: Sintonia pelo método da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI - IAE	$\frac{0.984}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.986}$	$\frac{\tau}{0.608 \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.707}}$	-
PI - ITAE	$\frac{0.859}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.977}$	$\frac{\tau}{0.674 \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.68}}$	-
PID - IAE	$\frac{1.435}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.921}$	$\frac{\tau}{0.878 \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.749}}$	$\tau(0.432 \frac{\theta}{\tau}^{1.137})$
PID - ITAE	$\frac{1.357}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.947}$	$\frac{\tau}{0.842 \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.738}}$	$\tau(0.381 \frac{\theta}{\tau}^{0.995})$

Tabela 2.6: Sintonia pelo método da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI - IAE	$\frac{0.758}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.861}$	$\frac{\tau}{(1.02 - 0.323(\theta/\tau))}$	-
PI - ITAE	$\frac{0.586}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.916}$	$\frac{\tau}{(1.03 - 0.165(\theta/\tau))}$	-
PID - IAE	$\frac{1.086}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.869}$	$\frac{\tau}{(0.740 - 0.130(\theta/\tau))}$	$\tau(0.348 \frac{\theta}{\tau}^{0.914})$
PID - ITAE	$\frac{0.965}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.850}$	$\frac{\tau}{(0.796 - 0.147(\theta/\tau))}$	$\tau(0.308 \frac{\theta}{\tau}^{0.929})$

Método de CHR

Desenvolvido por K. L. Chien, J. A. Hrones e J. B. Reswick (CHIEN, 1972), esse método foi o primeiro a analisar sistemas de ordem bem superiores, com modelo aproximado de primeira ordem com tempo morto. Além disso, foi o primeiro método a diferenciar as regras de sintonia para características regulatórias e servo.

Também é interessante que esse método estuda e analisa a diferença sobre as regras de parametrização dos ganhos em termos da existência ou não de sobrelevação no caso de um sistema servo.

Sendo assim, CHIEN (1972) propõe as seguintes tabelas 2.7, 2.8 e 2.9 para o cálculo dos ganhos do controlador.

Tabela 2.7: Sintonia pelo CHR, sem sobrelevação - caso servo

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.3\tau/K\theta$	-	-
PI	$0.35(\tau/K\theta)$	1.16τ	-
PID	$0.6(\tau/K\theta)$	τ	$\theta/2$

Tabela 2.8: Sintonia pelo CHR, sem sobrelevação - caso regulatório

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.3\tau/K\theta$	-	-
PI	$0.6(\tau/K\theta)$	4θ	-
PID	$0.95(\tau/K\theta)$	2.375θ	0.421θ

Tabela 2.9: Sintonia pelo CHR, com 20% de sobrelevação - caso servo

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.7\tau/K\theta$	-	-
PI	$0.6(\tau/K\theta)$	τ	-
PID	$0.95(\tau/K\theta)$	1.357τ	0.473θ

Capítulo 3

Identificação: Metodologia, Resultados e Discussão

A planta a ser estudada representa uma das maneiras de se realizar a etapa do processamento do gás natural. A figura 3.1 é uma representação semelhante da planta que foi utilizada nesse trabalho e, nela, estão marcados os trocadores de calor utilizados aqui. A modelagem do processo de compressão de gás, associada ao condicionamento do mesmo, foi desenvolvida no *software EMSO* e, considerou-se esta planta virtual como representativa do processo real.

A partir desse ponto, foram realizadas as variações de cada uma das variáveis de entrada, adquirindo os dados das variáveis de saída. Posteriormente, processou-se estes dados pela funcionalidade *Ident* do *MATLAB*, a fim de se obter as funções de transferência.

É importante esclarecer, nesse ponto, que os gráficos desse capítulo são da perturbação ao processo, variação percentual da quantidade de calor [K/K] X tempo [s] em azul, e da resposta do sistema, variação percentual da temperatura [K/K] X tempo [s] em vermelho.

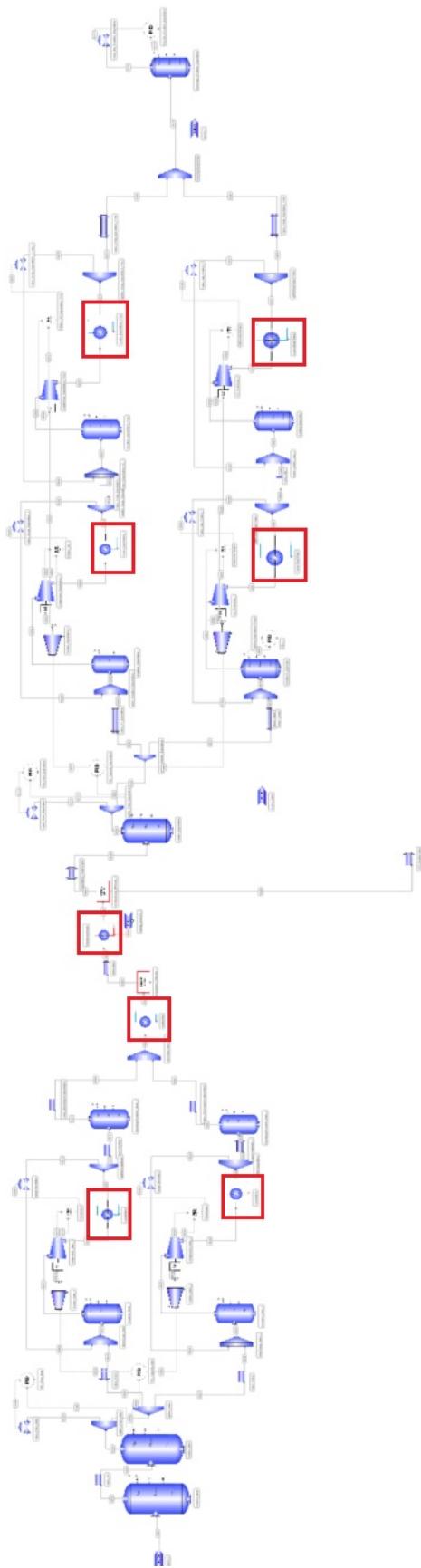


Figura 3.1: Planta de Processamento do Gás Natural

3.1 Identificação do Trocador de Calor *coolerMain1*

Variando a quantidade de calor aplicada no *coolerMain1*, em 50% positivamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção negativamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.2 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

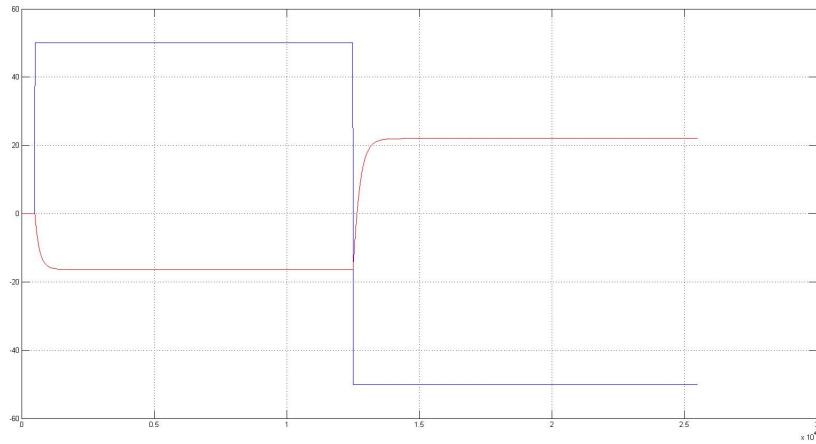


Figura 3.2: Perturbação e resposta a mesma no trocador *coolerMain1*

$$G_1(s) = \frac{-0.001849}{s + 0.004791} = \frac{-0.3859}{208.7247s + 1} \quad (3.1)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.1, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

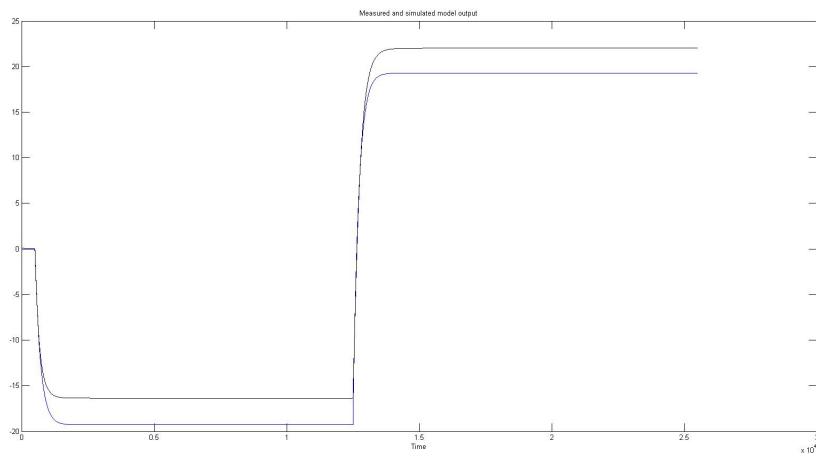


Figura 3.3: Com 85,42% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *coolerMain1*

3.2 Identificação do Trocador de Calor *coolerMain2*

Variando a quantidade de calor aplicada no *coolerMain2*, em 50% positivamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção negativamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.4 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

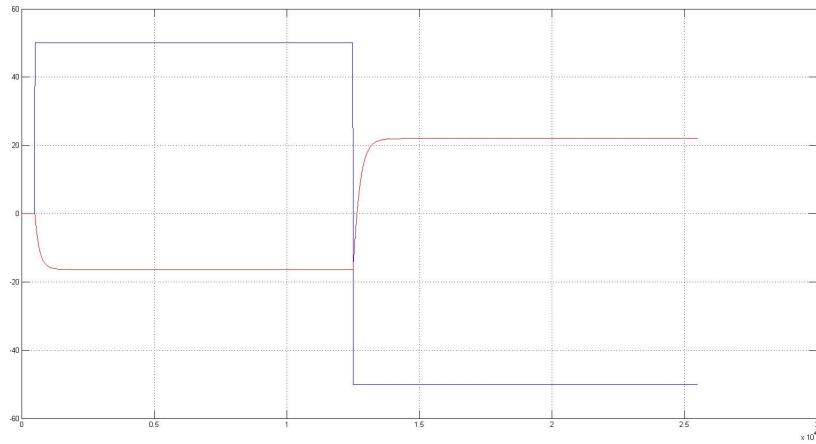


Figura 3.4: Perturbação e resposta a mesma no trocador *coolerMain2*

$$G_2(s) = \frac{-0.001849}{s + 0.004791} = \frac{-0.3859}{208.7247s + 1} \quad (3.2)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.2, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

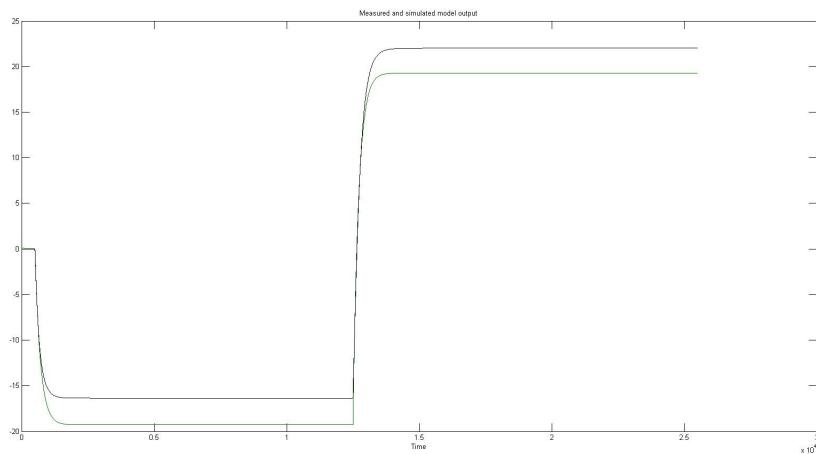


Figura 3.5: Com 85,42% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *coolerMain2*

Aqui, pode-se observar que os resfriadores *coolerMain1* e *coolerMain2* são equivalentes. Isso é explicado pelo papel que ambas têm na planta, onde também se pode observar tal equivalência. Por tal motivo é que se pode admitir que os estudos em termos de suas funções de transferência e, consequentemente, seus controles serão equivalentes, tratando-se das variáveis estudadas.

3.3 Identificação do Trocador de Calor *coolerDehy*

Variando a quantidade de calor aplicada no *coolerDehy*, em 50% negativamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção positivamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.6 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

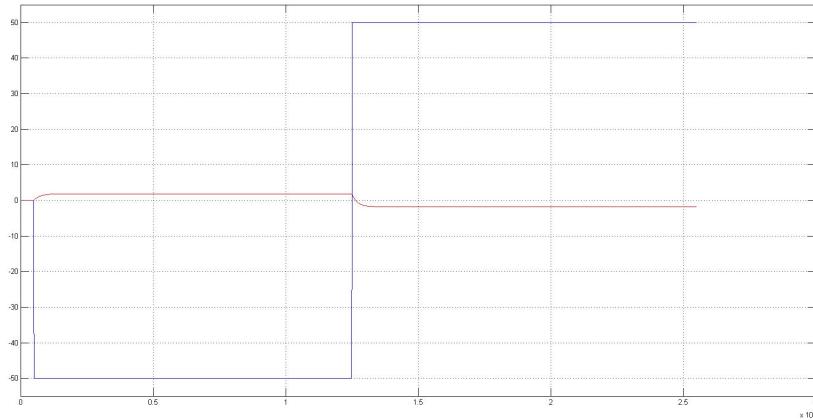


Figura 3.6: Perturbação e resposta a mesma no trocador *coolerDehy*

$$G_3(s) = \frac{-0.0001719}{s + 0.004782} = \frac{-0.0359}{209.1175s + 1} \quad (3.3)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.3, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

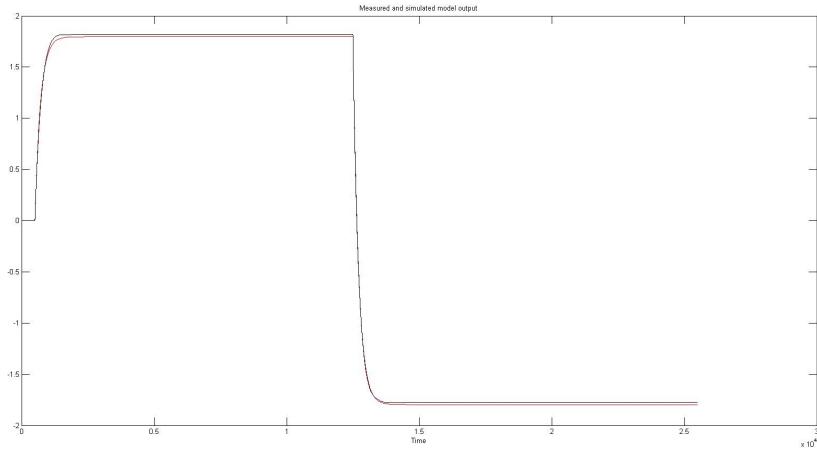


Figura 3.7: Com 98,75% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *coolerDehy*

3.4 Identificação do Trocador de Calor *MembraneHeater*

Variando a quantidade de calor aplicada no *MembraneHeater*, em 50% negativamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção positivamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.8 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

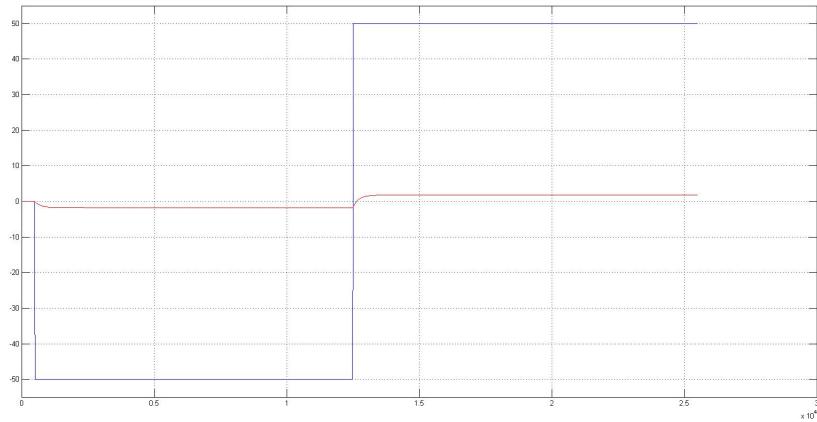


Figura 3.8: Perturbação e resposta a mesma no trocador *MembraneHeater*

$$G_4(s) = \frac{0.0001681}{s + 0.004833} = \frac{0.0348}{206.9108s + 1} \quad (3.4)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.4, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

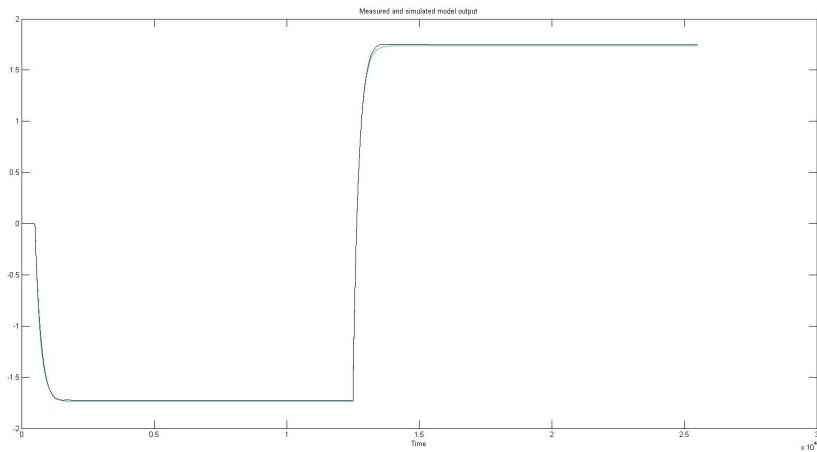


Figura 3.9: Com 99,22% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *MembraneHeater*

3.5 Identificação do Trocador de Calor *Cooler_Exportation_1*

Variando a quantidade de calor aplicada no *Cooler_Exportation_1*, em 50% negativamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção positivamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.10 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

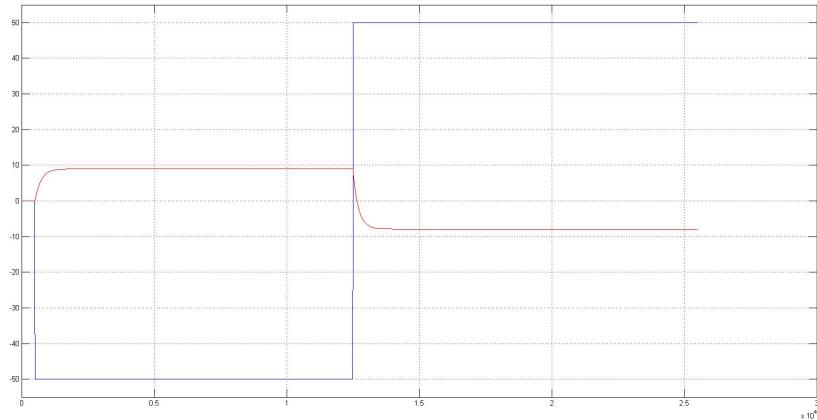


Figura 3.10: Perturbação e resposta a mesma no trocador *Cooler_Exportation_1*

$$G_5(s) = \frac{-0.0007575}{s + 0.004498} = \frac{-0.1684}{222.3210s + 1} \quad (3.5)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.5,

cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

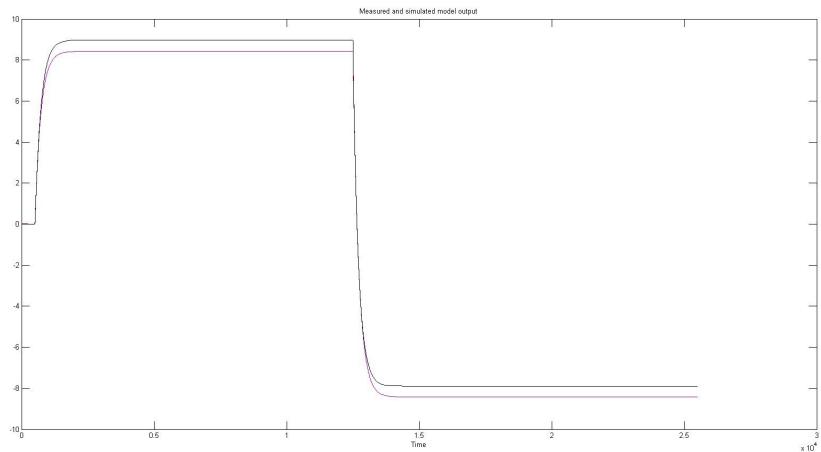


Figura 3.11: Com 93,59% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *Cooler_Exportation_1*

3.6 Identificação do Trocador de Calor *Cooler1ExpTRain2*

Variando a quantidade de calor aplicada no *Cooler1ExpTRain2*, em 50% positivamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção negativamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.12 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

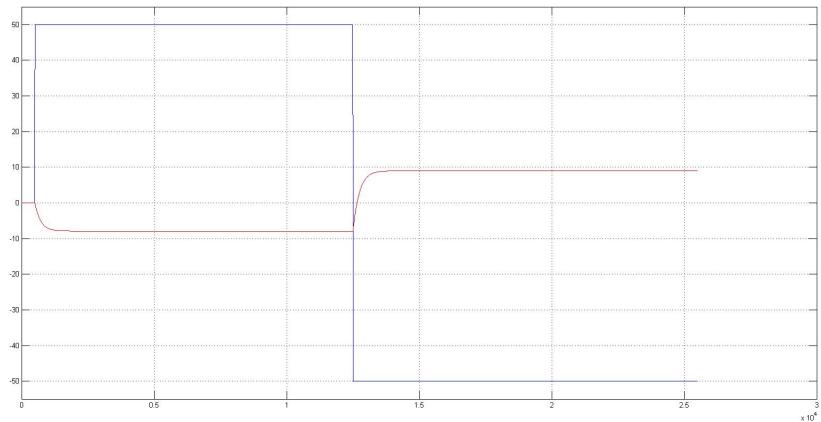


Figura 3.12: Perturbação e resposta a mesma no trocador *Cooler1ExpTRain2*

$$G_6(s) = \frac{-0.0007575}{s + 0.004498} = \frac{-0.1684}{222.3210s + 1} \quad (3.6)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.6, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

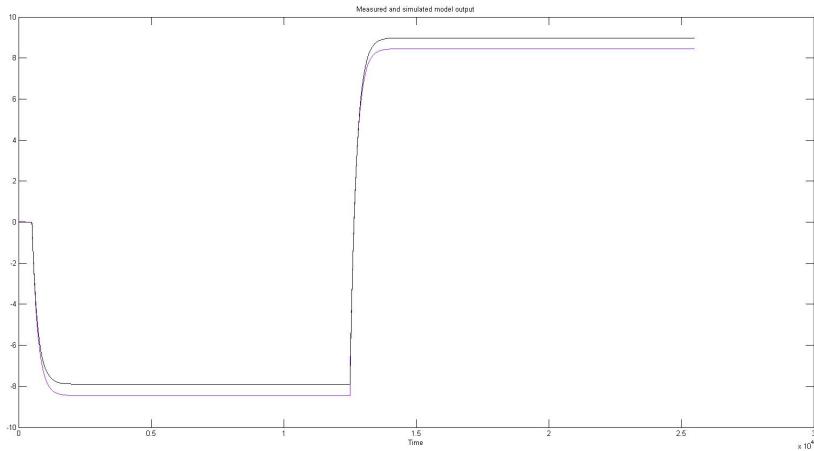


Figura 3.13: Com 93,58% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *Cooler1ExpTRain2*

Assim como os dois primeiros resfriados estudados, pode-se observar que os resfriadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* também são equivalentes entre eles. Novamente, admite-se que o estudos em termos de suas funções de transferência e, consequentemente, seus controles serão equivalentes, tratando-se das variáveis estudadas.

3.7 Identificação do Trocador de Calor *Cooler_Exportation_T1S2*

Variando a quantidade de calor aplicada no *Cooler_Exportation_T1S2*, em 50% negativamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção positivamente, no tempo de 12500 segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.14 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

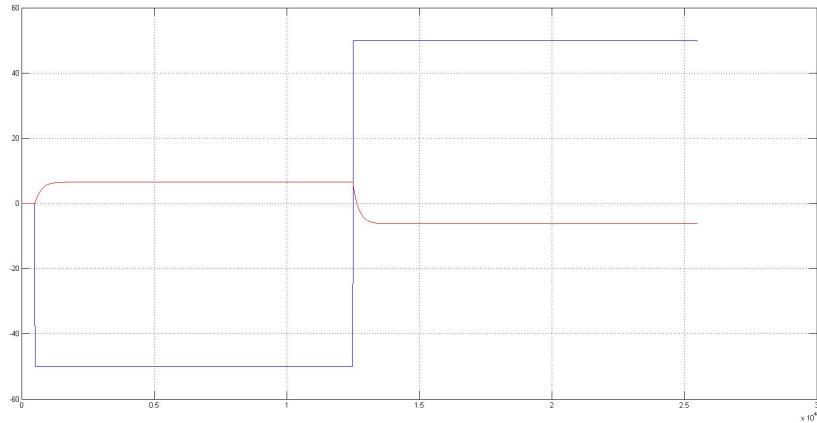


Figura 3.14: Perturbação e resposta a mesma no trocador *Cooler_Exportation_T1S2*

$$G_7(s) = \frac{-0.0005673}{s + 0.004457} = \frac{-0.1273}{224.3662s + 1} \quad (3.7)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.7, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

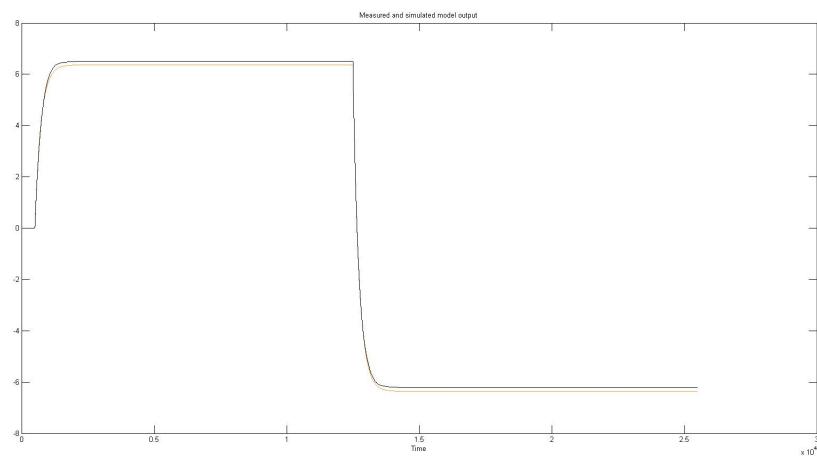


Figura 3.15: Com 97,71% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *Cooler_Exportation_T1S2*

3.8 Identificação do Trocador de Calor *Cooler2ExpTRain2*

Variando a quantidade de calor aplicada no *Cooler2ExpTRain2*, em 50% positivamente, no tempo de 500 segundos, e igual proporção negativamente, no tempo de 12500

segundos, obteve-se a variação percentual da temperatura de saída deste equipamento. O gráfico 3.16 mostra a entrada e a resposta do processo a esta perturbação.

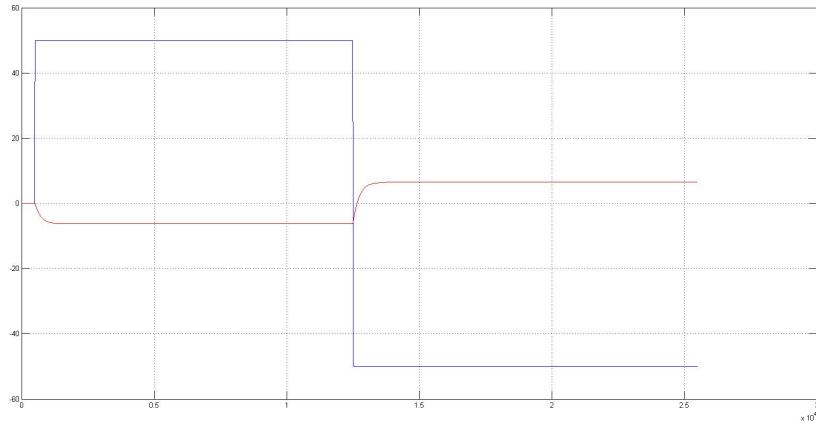


Figura 3.16: Perturbação e resposta a mesma no trocador *Cooler2ExpTRain2*

$$G_8(s) = \frac{-0.0005673}{s + 0.004457} = \frac{-0.1273}{224.3662s + 1} \quad (3.8)$$

Dessa maneira, a função de transferência encontrada pelo *Ident* foi a equação 3.8, cuja comparação entre resposta da simulação e resposta dessa função de transferência determinada é:

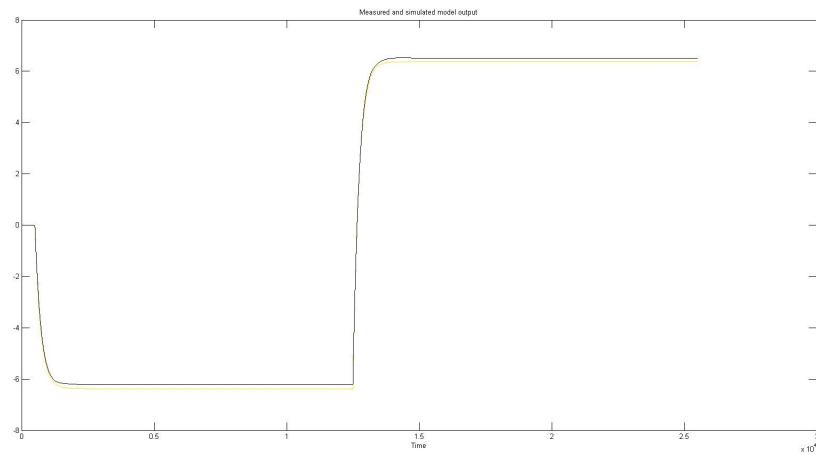


Figura 3.17: Com 97,70% de exatidão, essa é a resposta do modelo identificado para o trocador *Cooler2ExpTRain2*

Como já vimos anteriormente, pode-se observar que os resfriadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* também são equivalentes entre eles. Então, admite-se que o estudos em termos de suas funções de transferência e, consequentemente, seus controles serão equivalentes, tratando-se das variáveis estudadas.

3.9 Tempo Morto nas Identificações

Como se constatou nas identificações, não há nos dados simulados tempos mortos. De modo a simular o efeito de atrasos devido aos elementos de medida, tempos mortos pequenos (comparativamente às constantes de tempo) foram assumidos e adicionados ao sistema.

Pode-se, então, ver os ganhos determinados para cada trocador.

3.9.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

Tabela 3.1: Parâmetros da dinâmica do processo de *coolerMain1* e *coolerMain2* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K	τ	θ
0.3859	208.7247	2.2753

3.9.2 Trocador *coolerDehy*

Tabela 3.2: Parâmetros da dinâmica do processo de *coolerDehy* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K	τ	θ
0.0359	209.1175	2.8825

3.9.3 Trocador *MembraneHeater*

Tabela 3.3: Parâmetros da dinâmica do processo de *MembraneHeater* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K	τ	θ
0.0348	206.9108	3.0892

3.9.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Tabela 3.4: Parâmetros da dinâmica do processo de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K	τ	θ
0.1684	222.3210	2.6790

3.9.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Tabela 3.5: Parâmetros da dinâmica do processo de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K	τ	θ
0.1273	224.3662	2.6338

Capítulo 4

Controle: Metodologia, Resultados e Discussões

Após a realização das identificações de cada um dos trocadores, deve-se iniciar a etapa de sintonia de cada um dos seus controles PID.

É importante lembrar das equivalências de alguns trocadores como vistos anteriormente. Diante dessas equivalências, faz-se necessário realizar a análise dos seguintes trocadores: *coolerMain1*, *coolerDehy*, *MembraneHeater*, *Cooler_Exportation_1* e *Cooler_Exportation_T1S2*. Os demais controladores serão sintonizados como seus equivalentes.

É interessante esclarecer, nesse ponto, que os gráficos desse capítulo são da resposta a variação de SetPoint do controlador do sistema, variação percentual da temperatura [K/K] X tempo [s].

4.1 Método Ziegler-Nichols da Malha Fechada

A fim de determinar as variáveis que são utilizadas no cálculo dos ganhos, utilizou-se inicialmente apenas o controle proporcional e alterou-se tal ganho até que a resposta do sistema fosse periódica. Assim, conseguiu-se determinar tais variáveis utilizando os cálculos da tabela 2.1.

Dessa maneira, pode-se ver os ganhos determinados para cada trocador.

4.1.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

Aumentando o ganho proporcional do controlador, obtém-se o seguinte gráfico (com detalhamento):

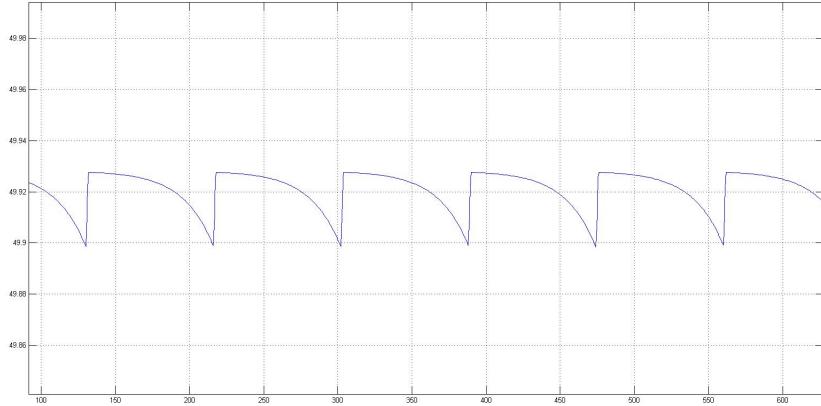


Figura 4.1: Com ganho proporcional $K_u = 1800$, verifica-se a resposta do sistema para os trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

Então:

Tabela 4.1: Parâmetros da dinâmica do processo de *coolerMain1* e *coolerMain2* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_u	T_u
1800	85

Com os valores da tabela 4.1, associados às relações na tabela 2.1, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.2: Ganhos resultantes do controlador de *coolerMain1* e *coolerMain2* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_p	T_i	T_d
1080	42.5	10.625

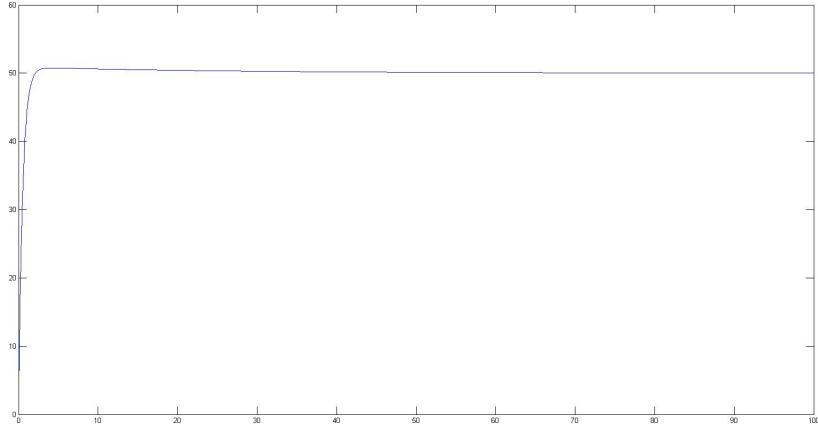


Figura 4.2: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada

Pela resposta obtida na figura 4.2, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Entretanto, vale ressaltar que o controlador é um tanto quanto agressivo para que se tenha um bom resultado tão rapidamente. Isso se deve ao fato do ganho proporcional ser consideravelmente maior, em ordem de grandeza, que os outros.

4.1.2 Trocador *coolerDehy*

Aumentando o ganho proporcional do controlador, obtém-se o seguinte gráfico (com detalhamento):

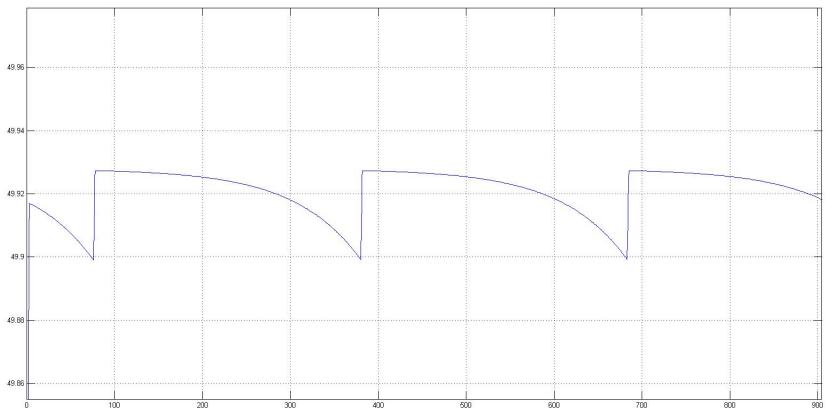


Figura 4.3: Com ganho proporcional $K_u = 19250$, verifica-se a resposta do sistema para o trocador *coolerDehy*

Então:

Tabela 4.3: Parâmetros da dinâmica do processo de *coolerDehy* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_u	T_u
19250	300

Com os valores da tabela 4.3, associados às relações na tabela 2.1, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.4: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_p	T_i	T_d
11550	150	37.5

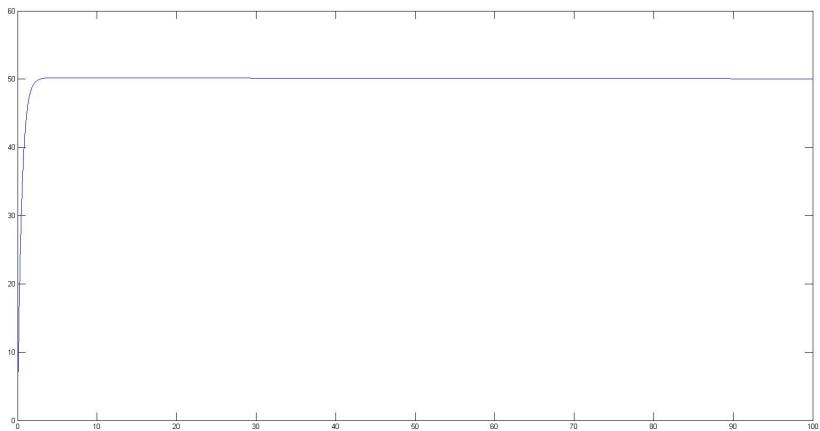


Figura 4.4: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada

Pela resposta obtida na figura 4.4, pode-se observar, novamente, que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Entretanto, vale ressaltar que o controlador é um tanto quanto agressivo para que se tenha um bom resultado tão rapidamente. Isso se deve ao fato do ganho proporcional ser bem maior, em ordem de grandeza, que os outros.

4.1.3 Trocador *MembraneHeater*

Aumentando o ganho proporcional do controlador, obtêm-se o seguinte gráfico (com detalhamento):

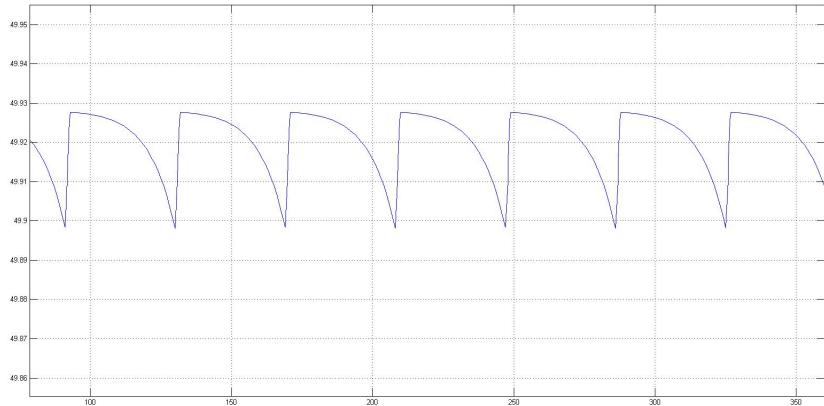


Figura 4.5: Com ganho proporcional $K_u = 20000$, verifica-se a resposta do sistema para o trocador *MembraneHeater*

Então:

Tabela 4.5: Parâmetros da dinâmica do processo de *MembraneHeater* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_u	T_u
20000	40

Com os valores da tabela 4.5, associados às relações na tabela 2.1, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.6: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_p	T_i	T_d
12000	20	5

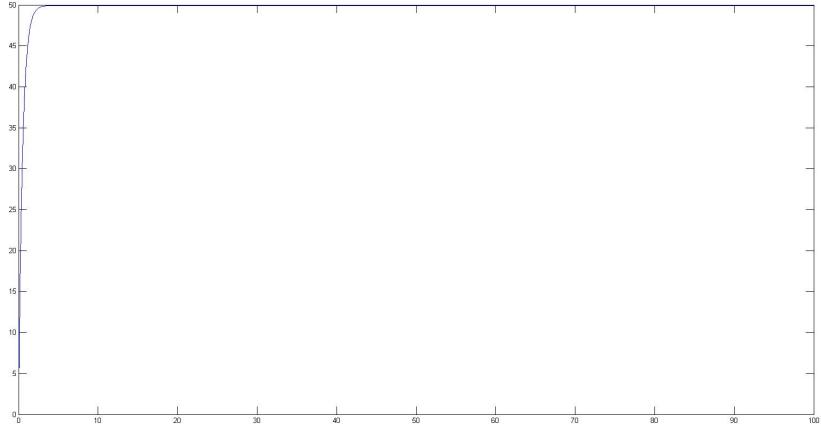


Figura 4.6: Resposta do sistema controlador-*MambraneHeater* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada

Pela resposta obtida na figura 4.6, pode-se observar, mais uma vez, que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Entretanto, vale ressaltar que o controlador é um tanto quanto agressivo para que se tenha um bom resultado tão rapidamente. Isso se deve ao fato do ganho proporcional ser muito maior, em ordem de grandeza, que os outros.

4.1.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Aumentando o ganho proporcional do controlador, obtém-se o seguinte gráfico (com detalhamento):

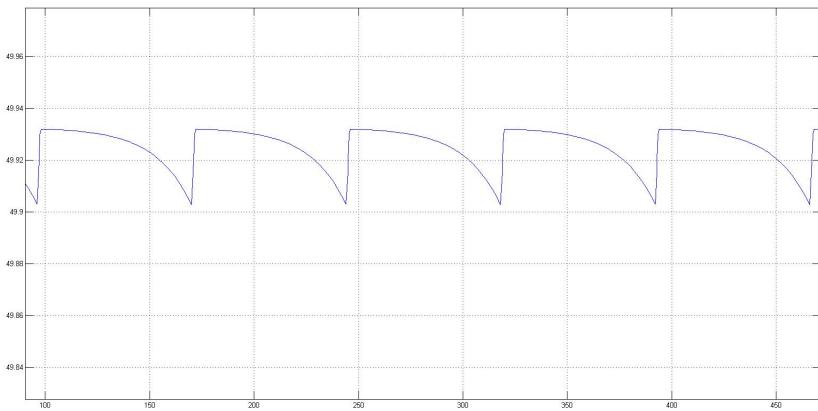


Figura 4.7: Com ganho proporcional $K_u = 4400$, verifica-se a resposta do sistema para os trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Então:

Tabela 4.7: Parâmetros da dinâmica do processo de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_u	T_u
4400	75

Com os valores da tabela 4.7, associados às relações na tabela 2.1, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.8: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_p	T_i	T_d
2624	37.5	9.375

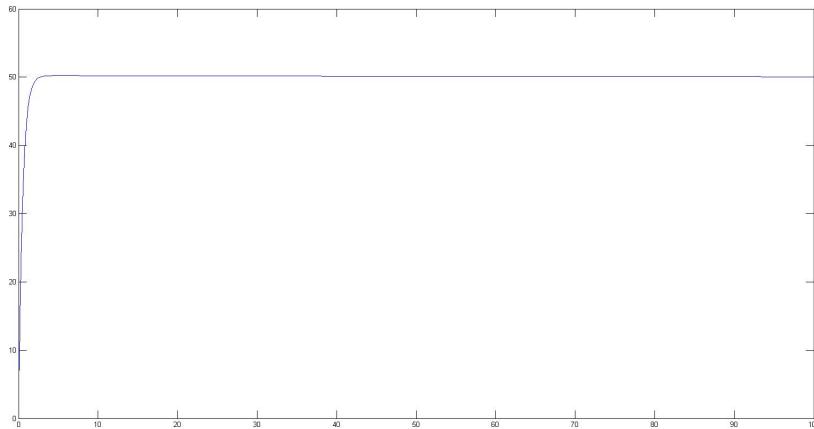


Figura 4.8: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada

Pela resposta obtida na figura 4.8, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Entretanto, vale ressaltar que o controlador é um tanto quanto agressivo para que se tenha um bom resultado tão rapidamente. Isso se deve ao fato do ganho proporcional ser consideravelmente maior, em ordem de grandeza, que os outros.

4.1.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Aumentando o ganho proporcional do controlador, obtêm-se o seguinte gráfico (com detalhamento):

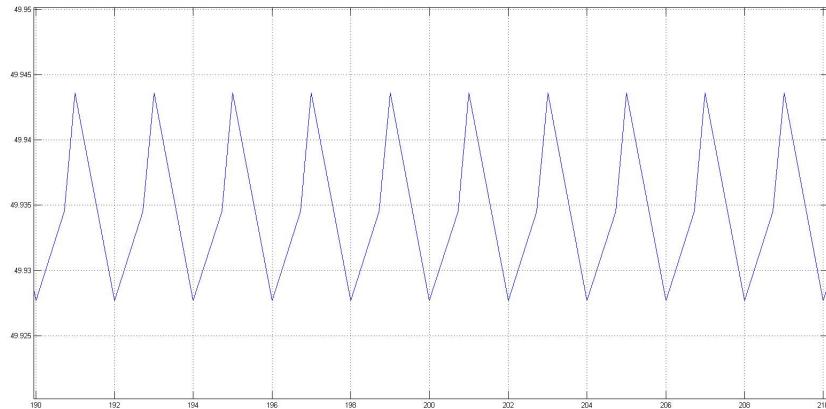


Figura 4.9: Com ganho proporcional $K_u = 7500$, verifica-se a resposta do sistema para os trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Então:

Tabela 4.9: Parâmetros da dinâmica do processo de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* - Método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_u	T_u
7500	2

Com os valores da tabela 4.9, associados às relações na tabela 2.1, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.10: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Fechada

K_p	T_i	T_d
4500	1	0.25

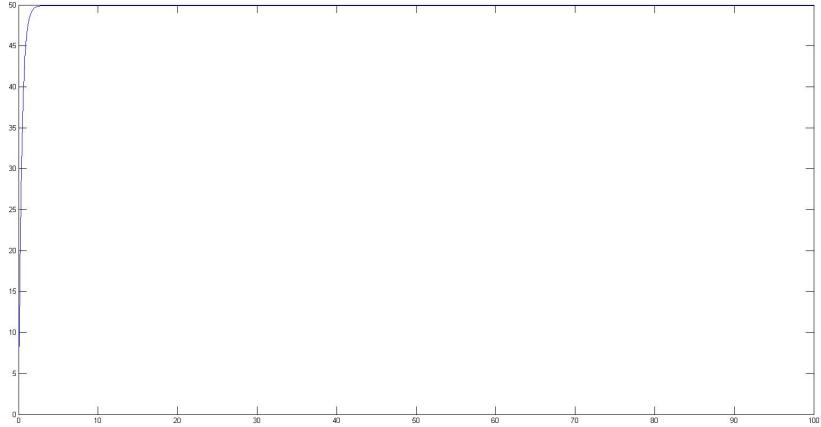


Figura 4.10: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Fechada

Pela resposta obtida na figura 4.10, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Entretanto, vale ressaltar que o controlador é um tanto quanto agressivo para que se tenha um bom resultado tão rapidamente. Isso se deve ao fato do ganho proporcional ser muito maior, em ordem de grandeza, que os outros.

4.2 Método Ziegler-Nichols da Malha Aberta

A fim de determinar os ganhos, utilizou-se as funções de transferência de cada um dos trocadores e suas respectivas respostas ao degrau.

4.2.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

Com os valores da tabela 3.1, associados às relações na tabela 2.2, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.11: Ganhos resultantes do controlador de *coolerMain1* e *coolerMain2* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K_p	T_i	T_d
285.2359	4.5506	1.1377

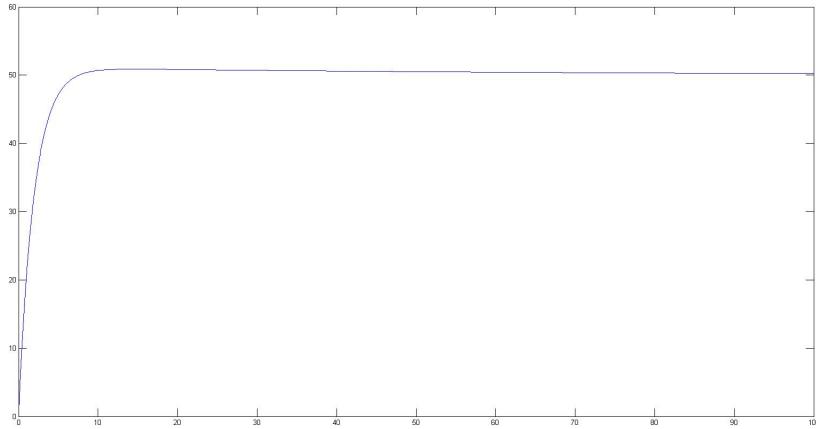


Figura 4.11: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta

Pela resposta obtida na figura 4.11, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Pode-se observar uma certa agressividade no controlador por conta da diferença, em ordem de grandeza, dos ganhos. Entretanto, este método já é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

4.2.2 Trocador *coolerDehy*

Com os valores da tabela 3.2, associados às relações na tabela 2.2, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.12: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K_p	T_i	T_d
2421.8078	5.765	1.4412

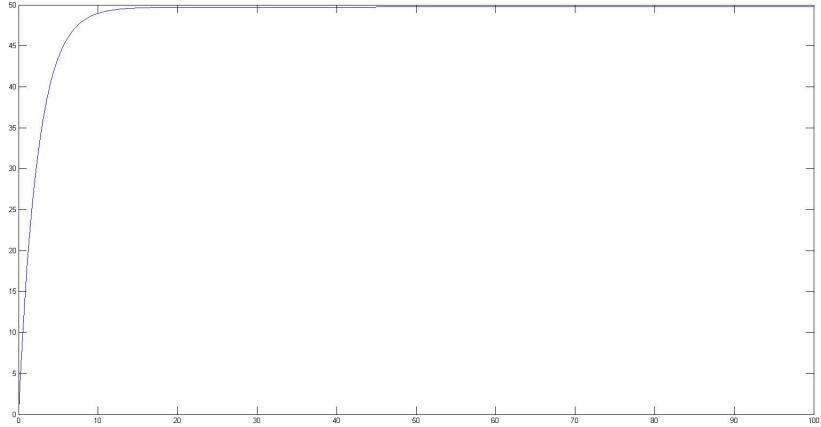


Figura 4.12: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta

Pela resposta obtida na figura 4.12, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Novamente, pode-se observar uma certa agressividade no controlador por conta da diferença, em ordem de grandeza, dos ganhos. Entretanto, este método já é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

4.2.3 Trocador *MembraneHeater*

Com os valores da tabela 3.3, associados às relações na tabela 2.2, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.13: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K_p	T_i	T_d
2310.8434	6.1784	1.5446

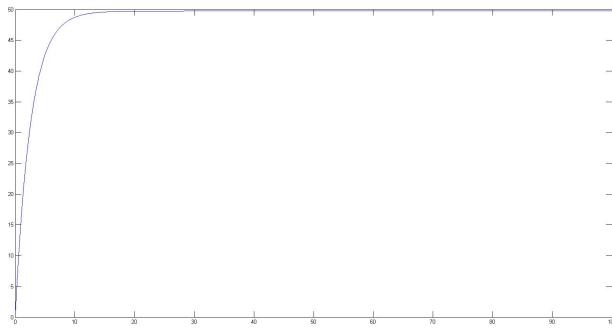


Figura 4.13: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta

Pela resposta obtida na figura 4.13, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Mais uma vez, pode-se observar uma certa agressividade no controlador por conta da diferença, em ordem de grandeza, dos ganhos. Entretanto, este método já é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

4.2.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Com os valores da tabela 3.4, associados às relações na tabela 2.2, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.14: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K_p	T_i	T_d
591.3315	5.3579	1.3395

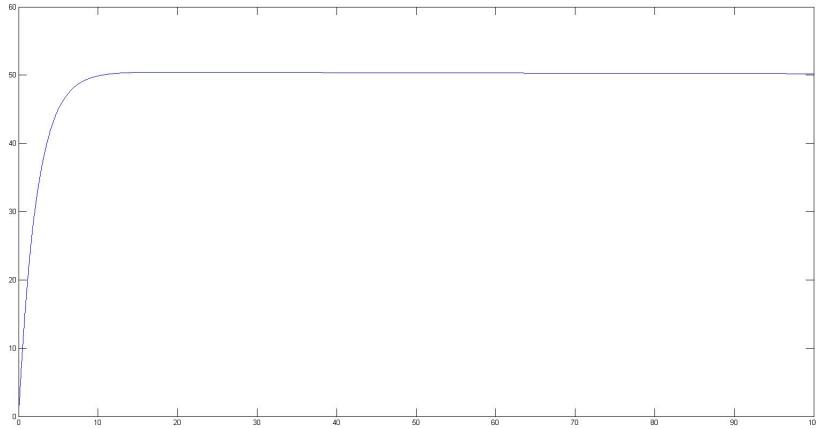


Figura 4.14: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta

Pela resposta obtida na figura 4.14, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para este sistema, pode-se observar que este método é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

4.2.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Com os valores da tabela 3.5, associados às relações na tabela 2.2, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.15: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método de Ziegler-Nichols da Malha Aberta

K_p	T_i	T_d
803.1192	5.2677	1.3169

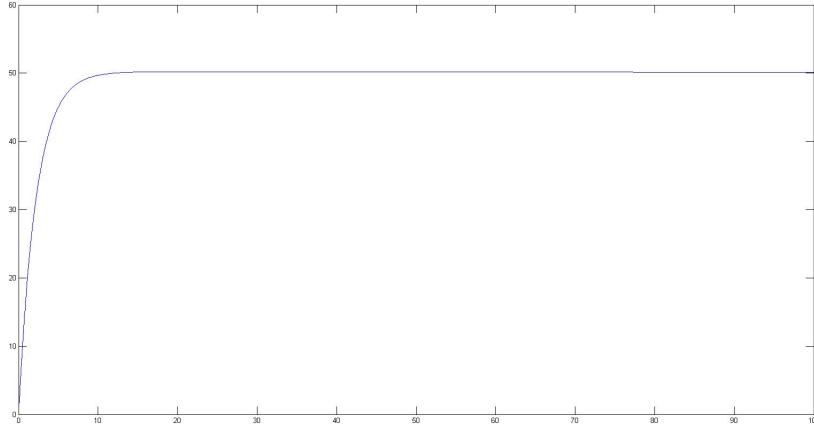


Figura 4.15: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método Ziegler-Nichols da Malha Aberta

Pela resposta obtida na figura 4.15, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para este sistema, pode-se observar, novamente, que este método é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

4.3 Método Cohen-Coon

Utilizando as mesmas funções de transferência identificadas, pode-se ver os ganhos determinados para cada trocador.

4.3.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

É importante salientar que os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.1. Com tais valores associados às relações na tabela 2.3, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.16: Ganhos resultantes do controlador de *coolerMain1* e *coolerMain2* pelo método de Cohen-Coon

K_p	T_i	T_d
317.5765	5.5748	0.8257

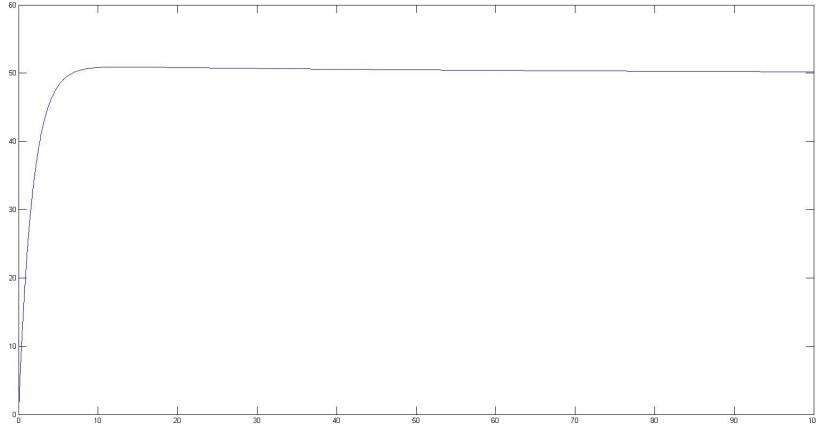


Figura 4.16: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método Cohen-Coon

Pela resposta obtida na figura 4.16, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para esta sintonia, notase que o controle é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada e possui uma sobrelevação um pouco maior que o método Ziegler-Nichols da Malha Aberta.

4.3.2 Trocador *coolerDehy*

É importante salientar que os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.2. Com tais valores associados às relações na tabela 2.3, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.17: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método de Cohen-Coon

K_p	T_i	T_d
2697.8521	7.0538	1.0456

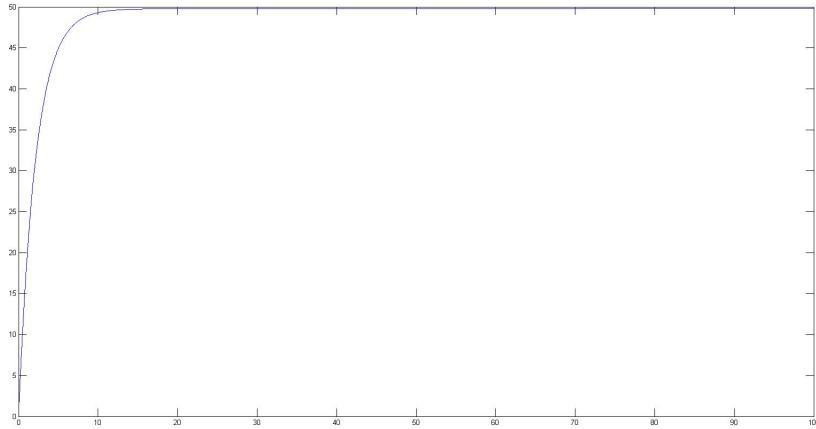


Figura 4.17: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método Cohen-Coon

Pela resposta obtida na figura 4.17, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para esta sintonia, nota-se que o controle é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

4.3.3 Trocador *MembraneHeater*

É importante salientar que os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.3. Com tais valores associados às relações na tabela 2.3, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.18: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método de Cohen-Coon

K_p	T_i	T_d
2574.7915	7.5560	1.1203

Pela resposta obtida na figura 4.18, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para esta sintonia, nota-se, novamente, que o controle é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada.

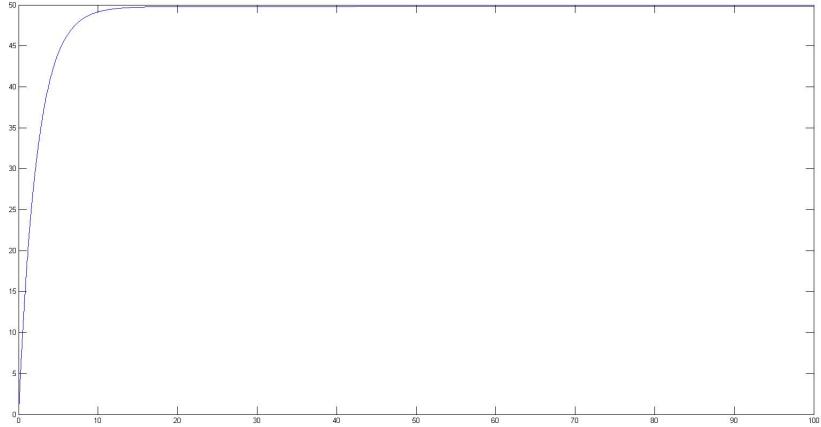


Figura 4.18: Resposta dos sistemas controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método Cohen-Coon

4.3.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

É importante salientar que os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.4. Com tais valores associados às relações na tabela 2.3, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.19: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método de Cohen-Coon

K_p	T_i	T_d
658.5195	6.5606	0.9720

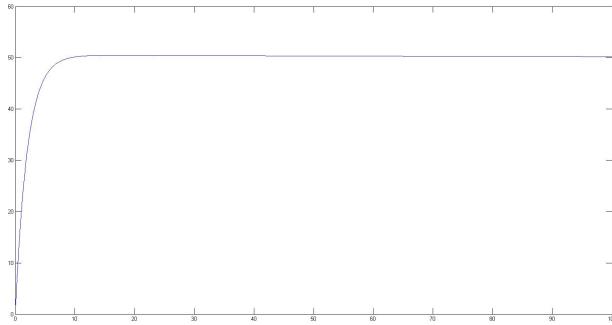


Figura 4.19: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método Cohen-Coon

Pela resposta obtida na figura 4.19, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para esta sintonia, nota-se, mais

uma vez, que o controle é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada e possui uma sobrelevação um pouco maior que o método Ziegler-Nichols da Malha Aberta.

4.3.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

É importante salientar que os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.5. Com tais valores associados às relações na tabela 2.3, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.20: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método de Cohen-Coon

K_p	T_i	T_d
894.3188	6.4510	0.9557

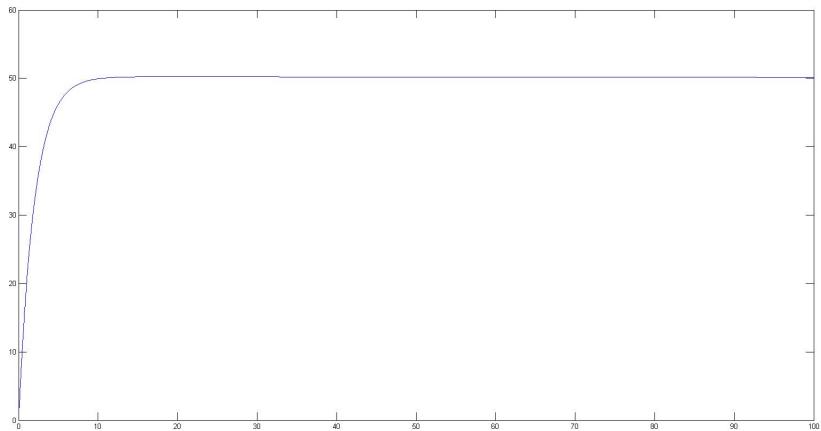


Figura 4.20: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método Cohen-Coon

Pela resposta obtida na figura 4.20, pode-se observar que a sintonia resulta em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Para esta sintonia, nota-se que o controle é mais suave que o Ziegler-Nichols da Malha Fechada

4.4 Método da Integral do Erro

Novamente, utilizando as mesmas funções de transferência identificadas, pode-se ver os ganhos determinados para cada trocador.

4.4.1 Trocadores $coolerMain1$ e $coolerMain2$

Novamente, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.1. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.5 e 2.6, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.21: Ganhos resultantes do controlador de $coolerMain1$ e $coolerMain2$ pelo método da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	238.6902	8.0564	0.5905
PID - ITAE	253.8566	8.8290	0.8867

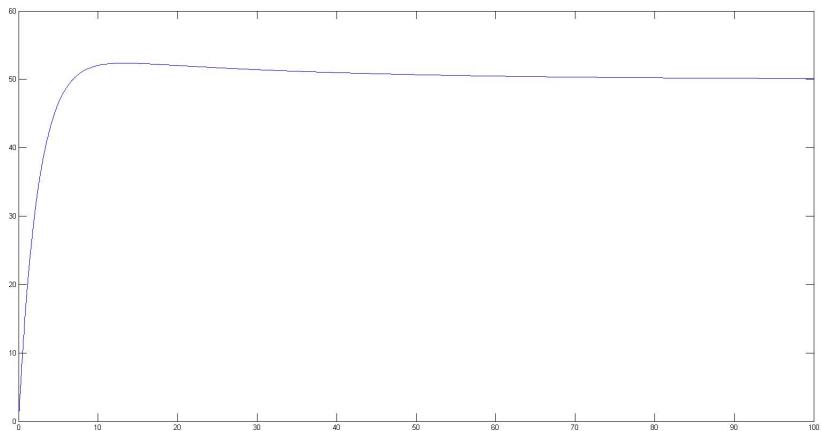


Figura 4.21: Resposta dos sistemas controlador- $coolerMain1$ e controlador- $coolerMain2$ utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

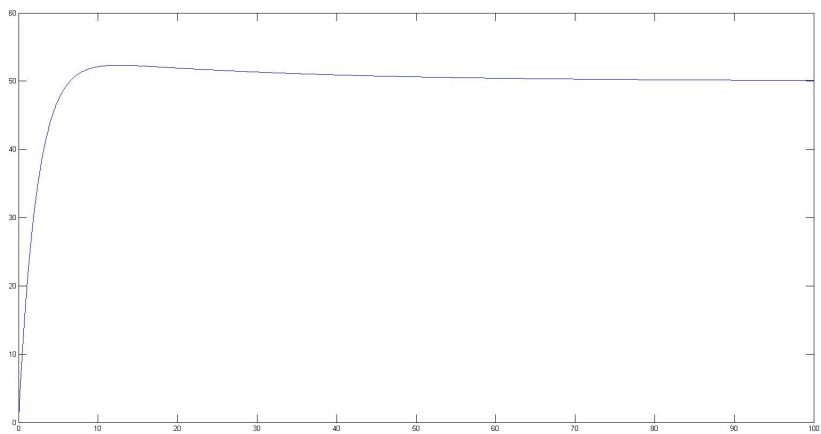


Figura 4.22: Resposta dos sistemas controlador- $coolerMain1$ e controlador- $coolerMain2$ utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Tabela 4.22: Ganhos resultantes do controlador de *coolerMain1* e *coolerMain2* pelo método da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	142.8107	282.6016	1.1679
PID - ITAE	116.4582	262.7459	0.9659

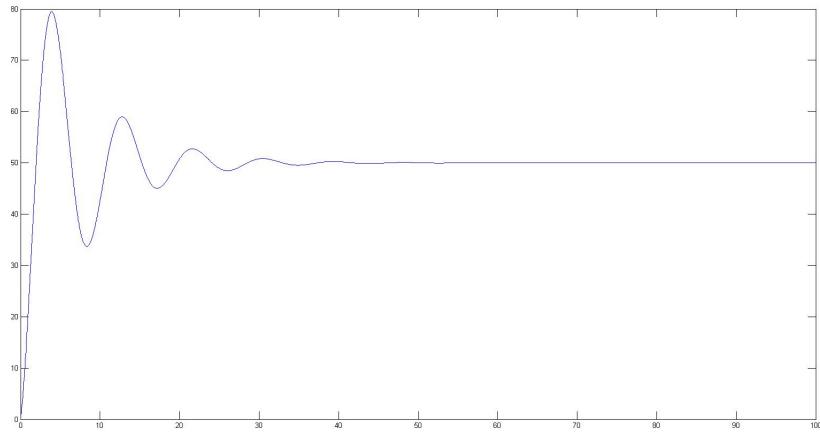


Figura 4.23: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

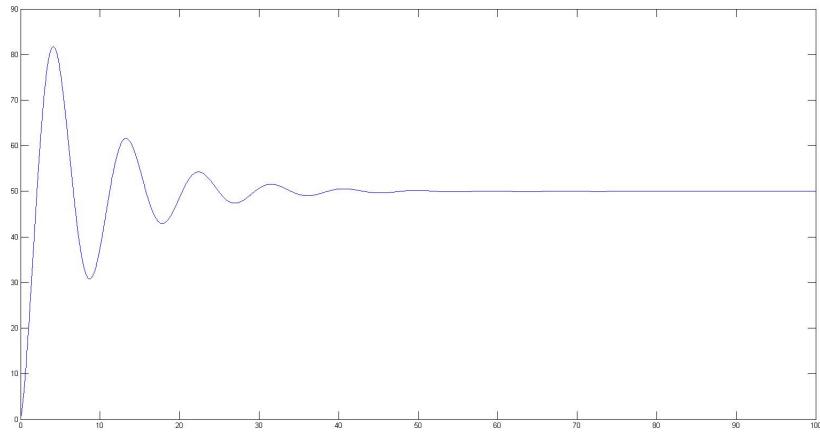


Figura 4.24: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Pelas respostas das sintonias propostas por LOPEZ *et al.* (1967), pode-se observar que elas resultam em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor, apesar de existirem sobrelevações maiores que as dos métodos propostos nas seções anteriores.

Já as sintonias propostas por ROVIRA *et al.* (1969), mostram-se com altas sobrelevações e muitas oscilações, então, não resultam em um bom funcionamento do sistema. Tal característica oscilatória existe por conta do valor comparativamente alto da parcela integral do controlador.

4.4.2 Trocador *coolerDehy*

Novamente, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.2. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.5 e 2.6, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.23: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	2064.529	9.6225	0.7725
PID - ITAE	2182.3538	10.5181	1.1220

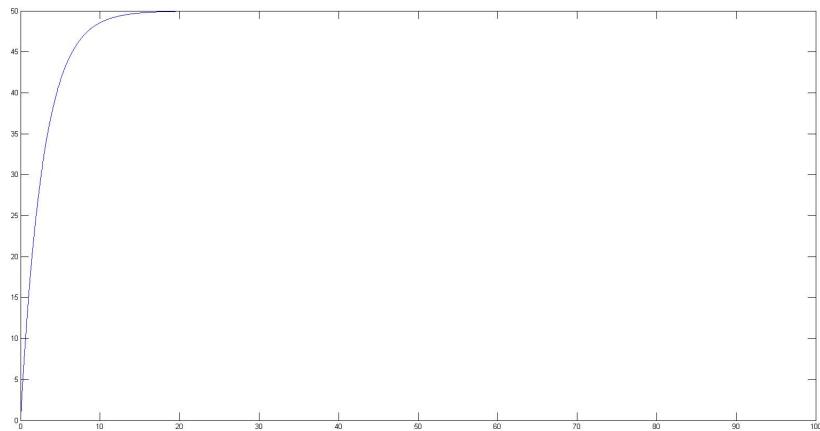


Figura 4.25: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

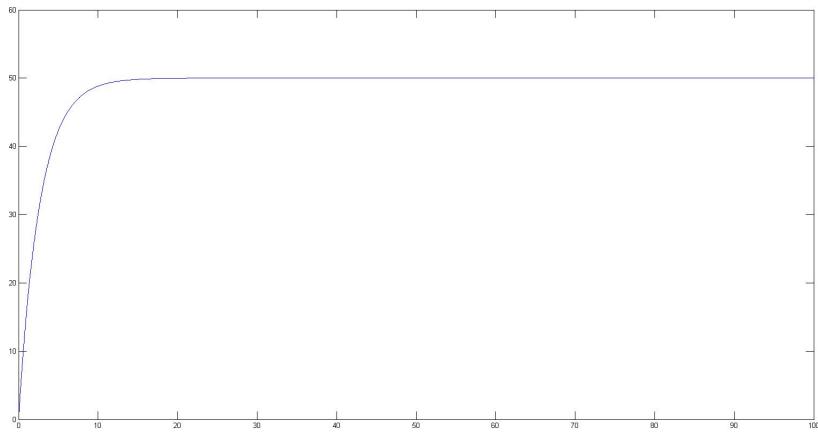


Figura 4.26: Resposta dos sistemas controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Tabela 4.24: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	1250.3927	283.2772	1.45
PID - ITAE	1024.2171	263.3809	1.2034

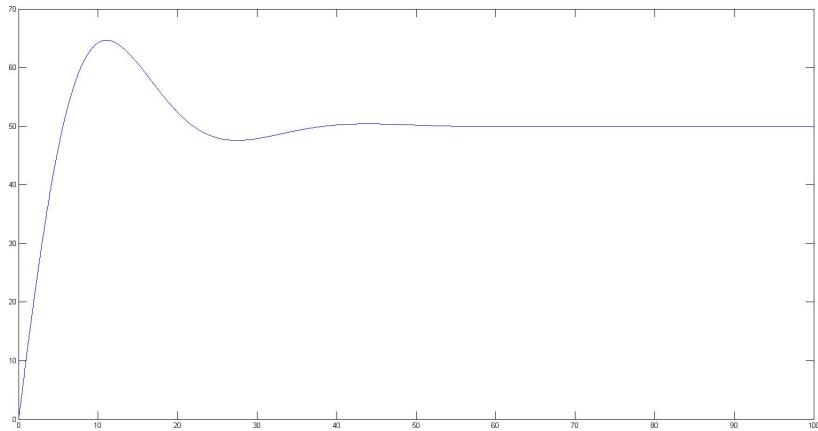


Figura 4.27: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

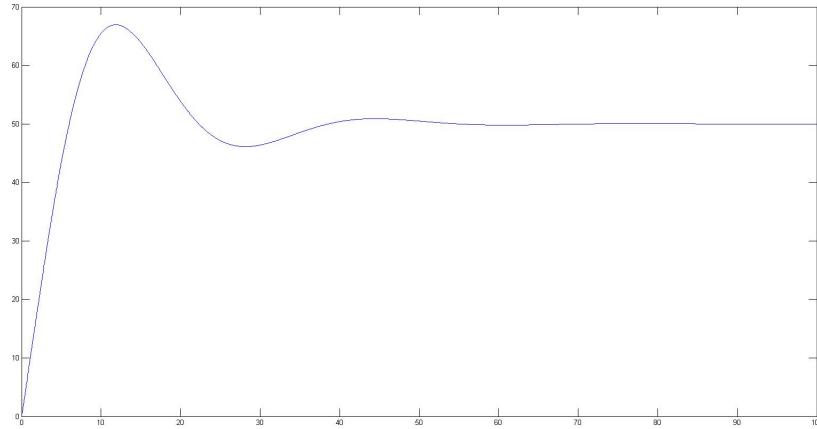


Figura 4.28: Resposta dos sistemas controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Pelas respostas das sintonias propostas por LOPEZ *et al.* (1967), pode-se observar que elas resultam em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Já o resultado das sintonias propostas por ROVIRA *et al.* (1969), mostram-se com altas sobrelevações, portanto, não resultam em um bom funcionamento do sistema.

4.4.3 Trocador *MembraneHeater*

Novamente, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.3. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.5 e 2.6, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.25: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	1982.4028	10.1079	0.8370
PID - ITAE	2091.1938	11.0389	1.2020

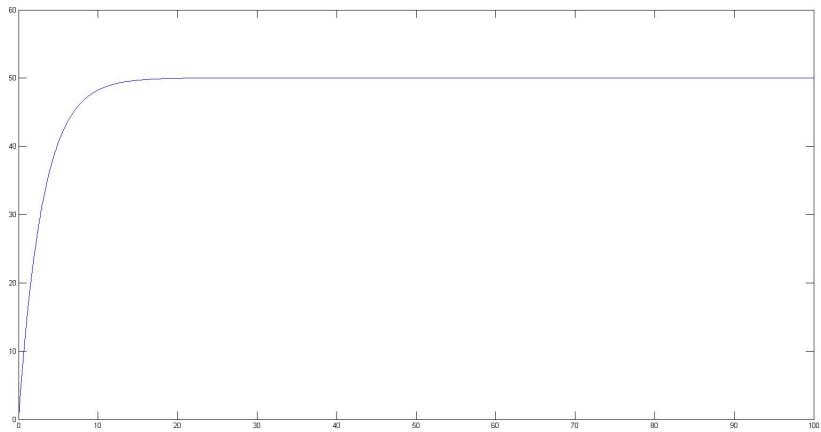


Figura 4.29: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

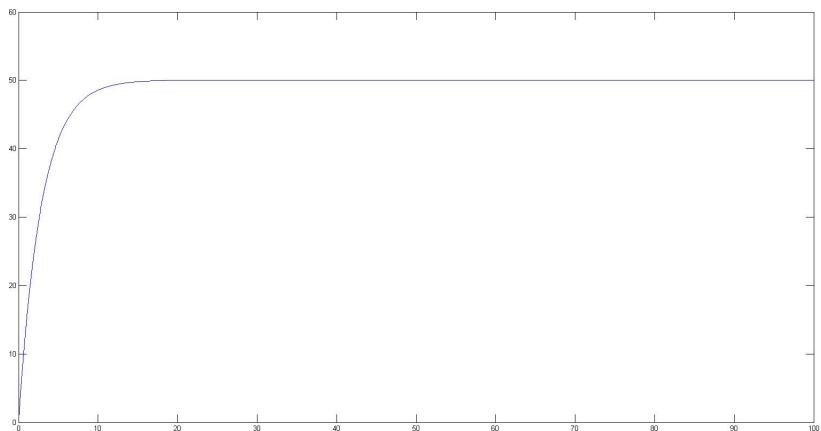


Figura 4.30: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Tabela 4.26: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	1205.6491	280.3445	1.5433
PID - ITAE	989.0667	260.6569	1.2824

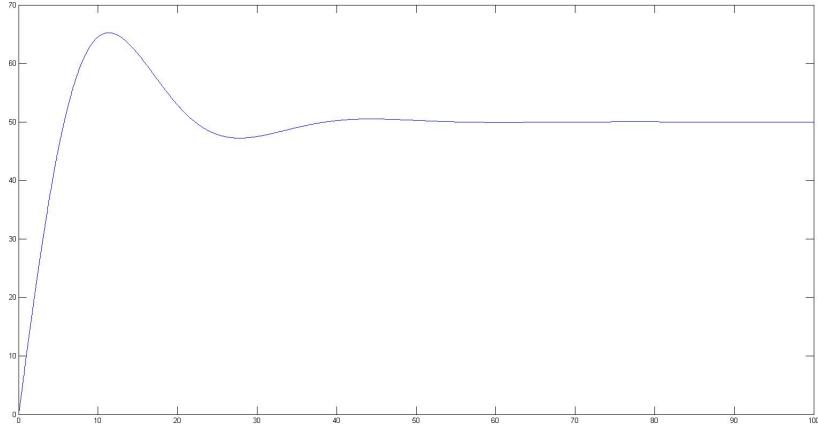


Figura 4.31: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

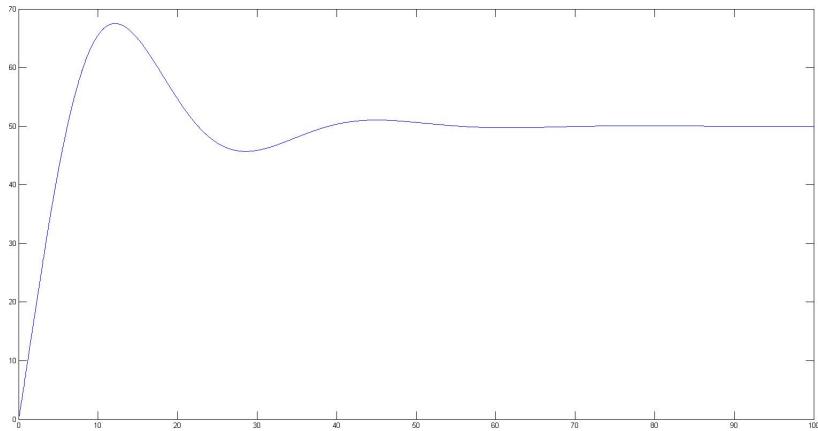


Figura 4.32: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Pelas respostas das sintonias propostas por LOPEZ *et al.* (1967), pode-se observar, novamente, que elas resultam em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Já o resultado das sintonias propostas por ROVIRA *et al.* (1969), mostram-se, mais uma vez, com altas sobrelevações, portanto, não resultam em um bom funcionamento do sistema.

4.4.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Novamente, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.4. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.5 e 2.6, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.27: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	498.7692	9.2501	0.7049
PID - ITAE	529.0807	10.1260	1.0435

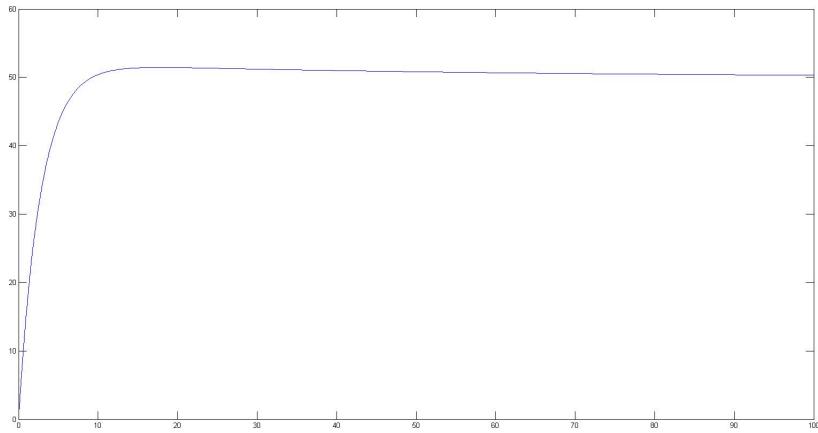


Figura 4.33: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

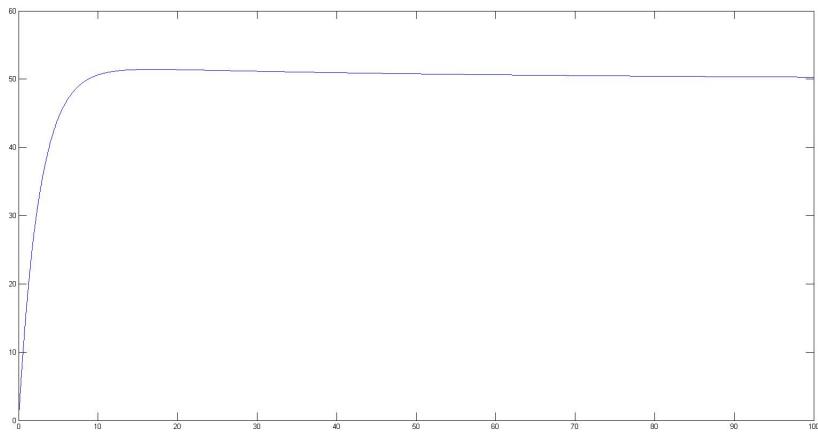


Figura 4.34: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Tabela 4.28: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	299.9776	301.0712	1.3633
PID - ITAE	245.0897	279.9207	1.1292

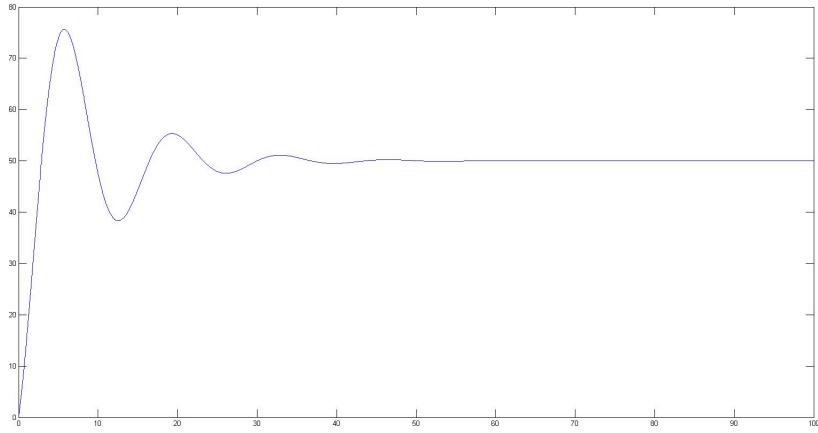


Figura 4.35: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

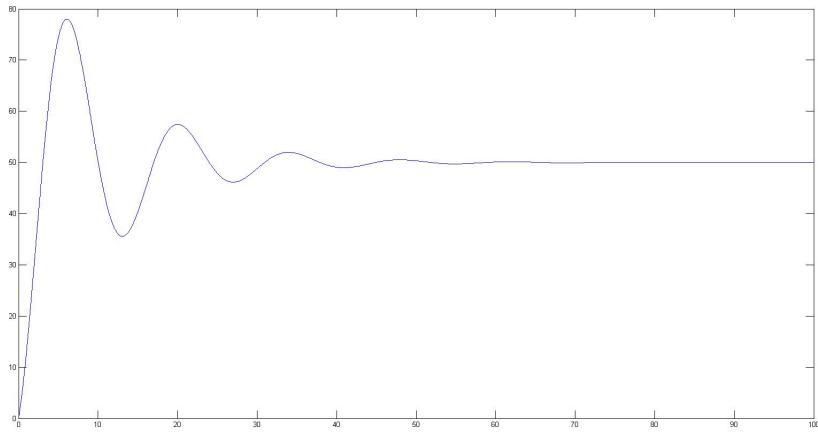


Figura 4.36: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Pelas respostas das sintonias propostas por LOPEZ *et al.* (1967), pode-se observar que

elas resultam em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor, apesar de existirem sobrelevações maiores que as dos métodos propostos nas seções anteriores.

Já as sintonias propostas por ROVIRA *et al.* (1969), mostram-se com altas sobrelevações e muitas oscilações, então, não resultam em um bom funcionamento do sistema. Tal característica oscilatória existe por conta do valor comparativamente alto da parcela integral do controlador.

4.4.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Novamente, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.5. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.5 e 2.6, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.29: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	676.0075	9.1541	0.6905
PID - ITAE	717.5779	10.0260	1.0238

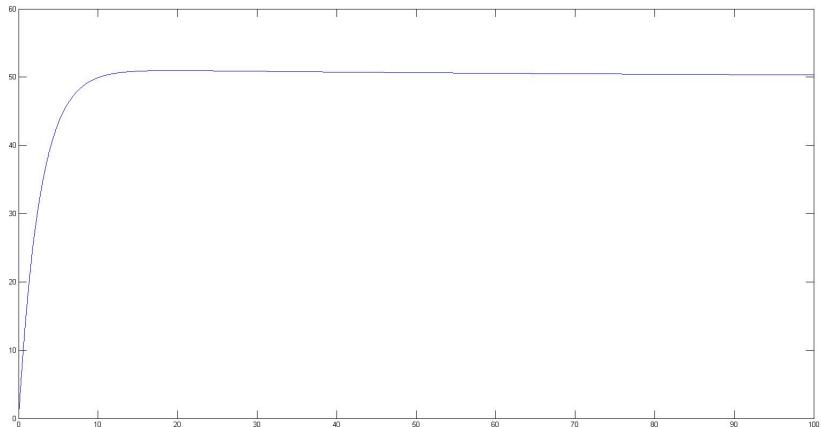


Figura 4.37: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

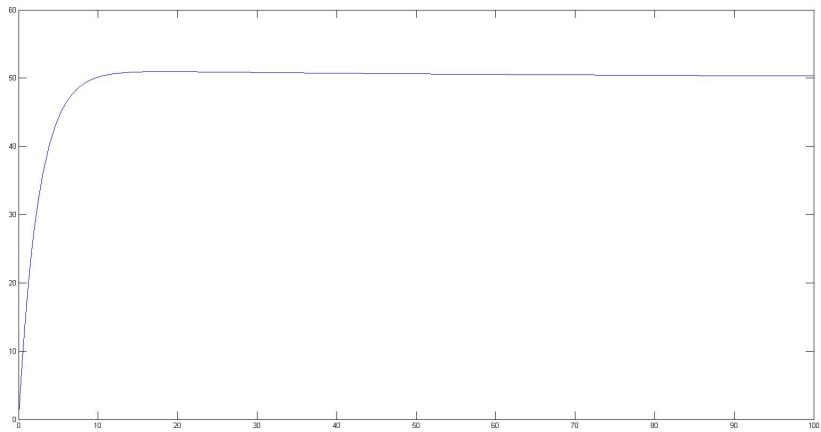


Figura 4.38: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por LOPEZ *et al.* (1967)

Tabela 4.30: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID - IAE	406.0226	303.8241	1.3433
PID - ITAE	331.5666	282.4794	1.1122

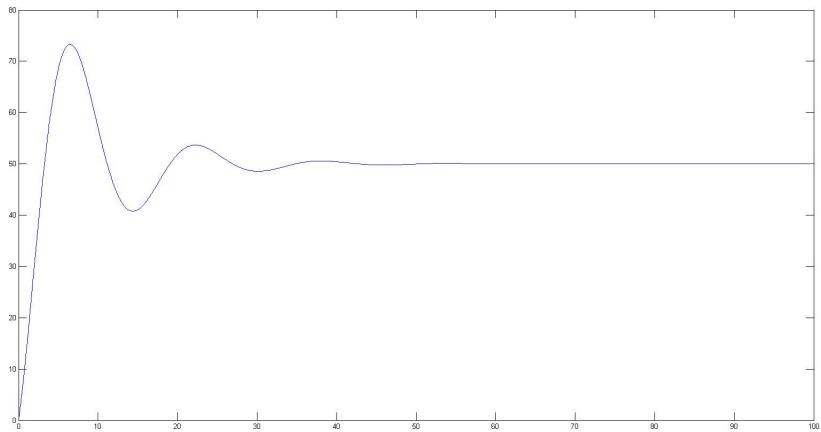


Figura 4.39: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

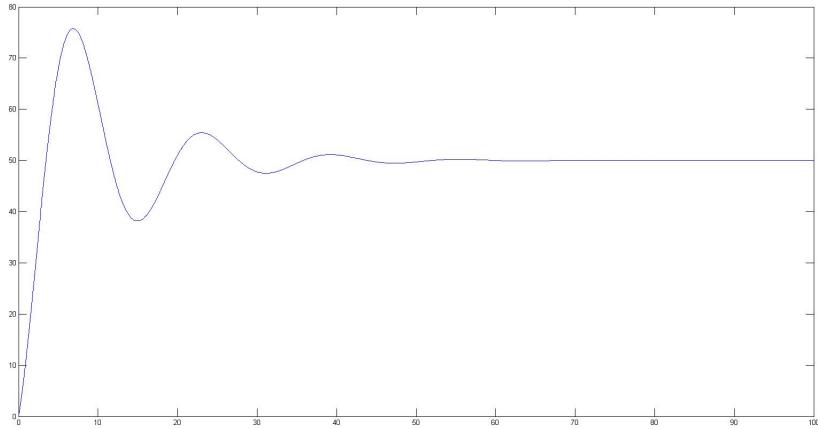


Figura 4.40: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método ITAE da integral do erro - por ROVIRA *et al.* (1969)

Pelas respostas das sintonias propostas por LOPEZ *et al.* (1967), pode-se observar que elas resultam em um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor, apesar de existirem sobrelevações maiores que as dos métodos propostos nas seções anteriores.

Já as sintonias propostas por ROVIRA *et al.* (1969), mostram-se com altas sobrelevações e muitas oscilações, então, não resultam em um bom funcionamento do sistema. Tal característica oscilatória existe por conta do valor comparativamente alto da parcela integral do controlador.

4.5 Método CHR

Mais uma vez, utilizando as mesmas funções de transferência identificadas, pode-se ver os ganhos determinados para cada trocador.

4.5.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

Mais uma vez, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.1. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.31: Ganhos resultantes do controlador de *coolerMain1* e *coolerMain2* pelo método CHR

Caso	K_p	T_i	T_d
Servo sem sobrelevação	142.6179	208.7247	1.1377
Regulatório sem sobrelevação	225.8117	5.4039	0.9579
Servo com 20% de sobrelevação	225.8117	283.2394	1.0762

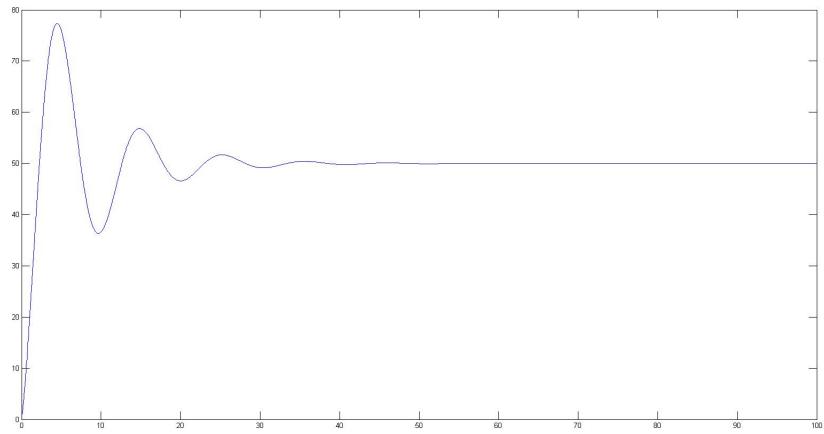


Figura 4.41: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação

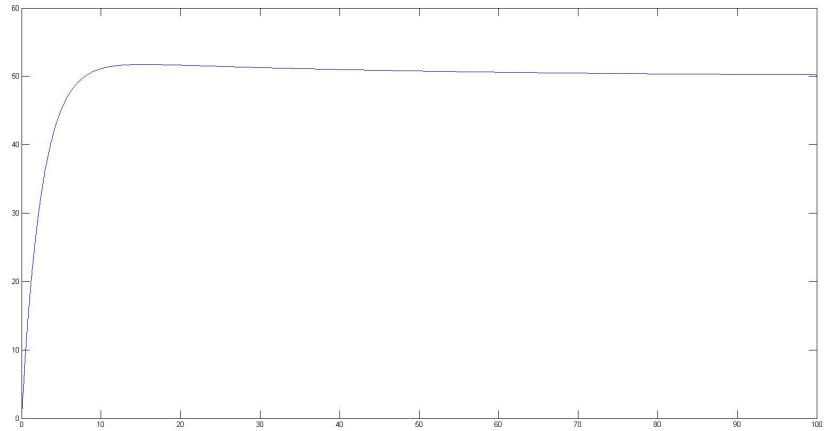


Figura 4.42: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação

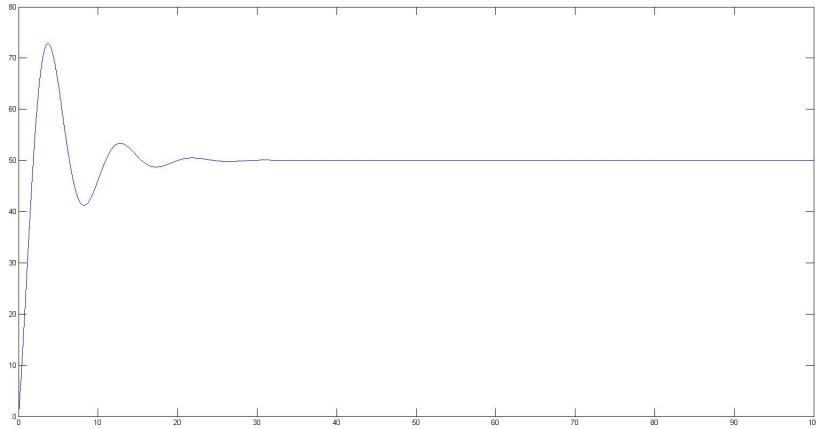


Figura 4.43: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação

Pelas respostas das sintonias propostas nesse método, pode-se observar que não satisfazem a necessidade da planta nos casos servo. Isso ocorre por conta da parcela integral ser mais considerada nesses casos, gerando maior sobrelevação e oscilação. Já para o caso regulatório, o resultado é um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor.

4.5.2 Trocador *coolerDehy*

Mais uma vez, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.2. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.32: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método CHR

Caso	K_p	T_i	T_d
Servo sem sobrelevação	1210.9039	209.1175	1.4412
Regulatório sem sobrelevação	1917.2645	6.8459	1.2135
Servo com 20% de sobrelevação	1917.2645	283.7725	1.3634

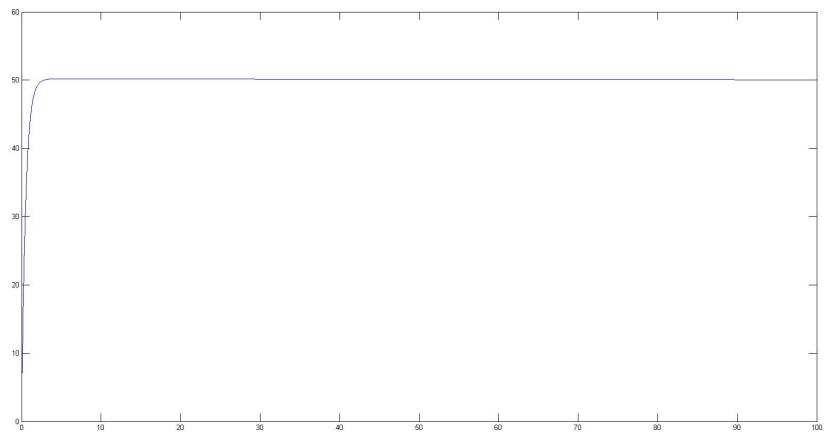


Figura 4.44: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação

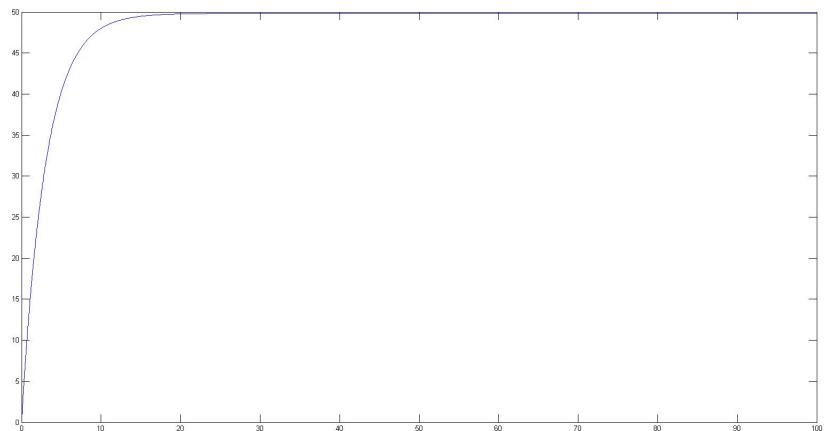


Figura 4.45: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação

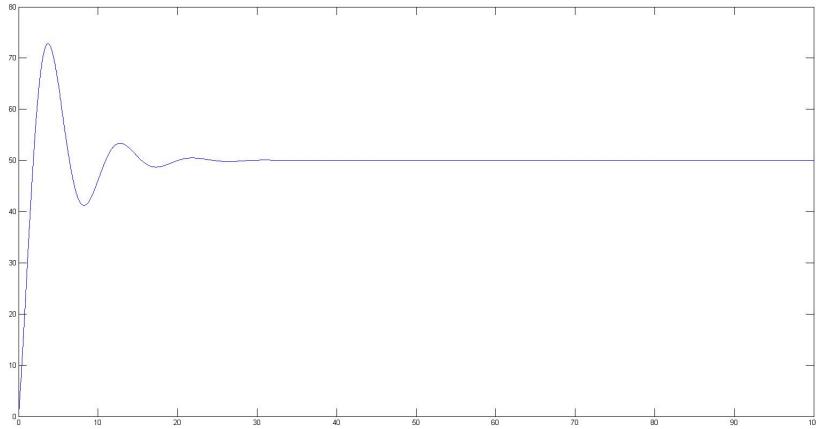


Figura 4.46: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação

Pelas respostas das sintonias propostas nesse método, pode-se observar que funcionam bem no caso servo com 20% de sobrelevação. Entretanto, não satisfazem a necessidade da planta por apresentarem grande sobrelevação.

Para o caso regulatório, o resultado é um bom e suave funcionamento do sistema controlador-trocador de calor. Enquanto que, para o caso servo sem sobrelevação, o funcionamento também é bom mas é mais agressivo.

4.5.3 Trocador *MembraneHeater*

Mais uma vez, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.3. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.33: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método CHR

Caso	K_p	T_i	T_d
Servo sem sobrelevação	1155.4217	206.9108	1.5446
Regulatório sem sobrelevação	1829.4177	7.3368	1.3005
Servo com 20% de sobrelevação	1829.4177	280.7780	1.4612

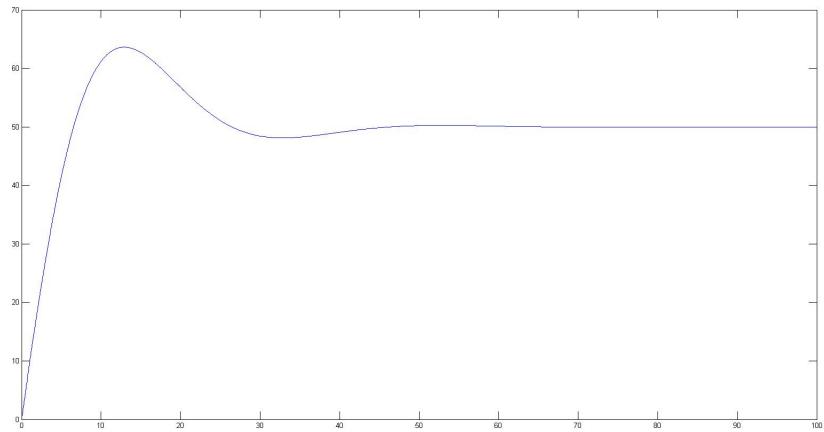


Figura 4.47: Resposta dos sistemas controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação

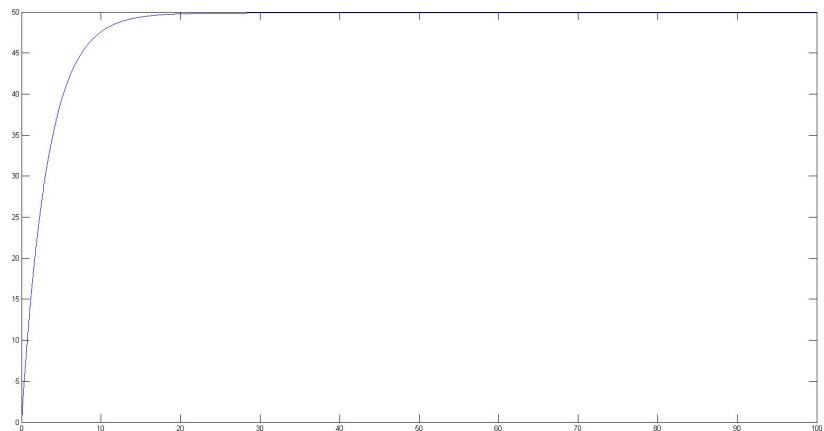


Figura 4.48: Resposta dos sistemas controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação

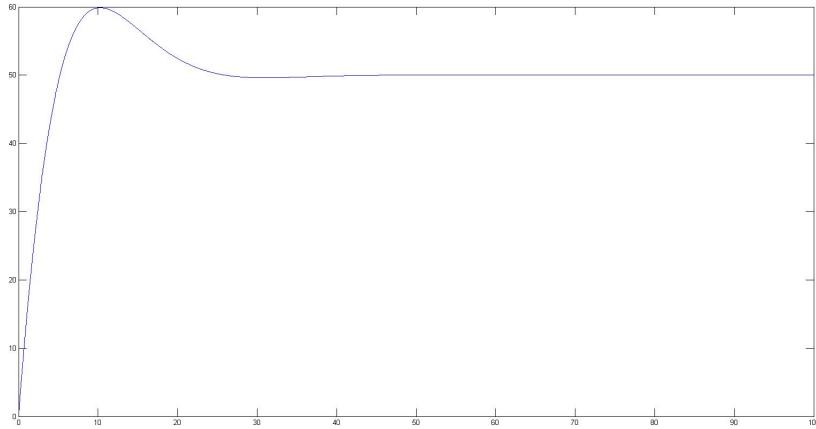


Figura 4.49: Resposta dos sistemas controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação

Pelas respostas das sintonias propostas nesse método, pode-se observar que não satisfazem a necessidade da planta nos casos servo. Isso ocorre por conta da parcela integral ser mais considerada nesses casos, resultando em maior sobrelevação. Já para o caso regulatório, o resultado é um bom e suave funcionamento do sistema controlador-trocador de calor.

4.5.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Mais uma vez, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.4. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.34: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método CHR

Caso	K_p	T_i	T_d
Servo sem sobrelevação	295.6657	222.3210	1.3395
Regulatório sem sobrelevação	468.1374	6.3626	1.1278
Servo com 20% de sobrelevação	468.1374	301.6896	1.2672

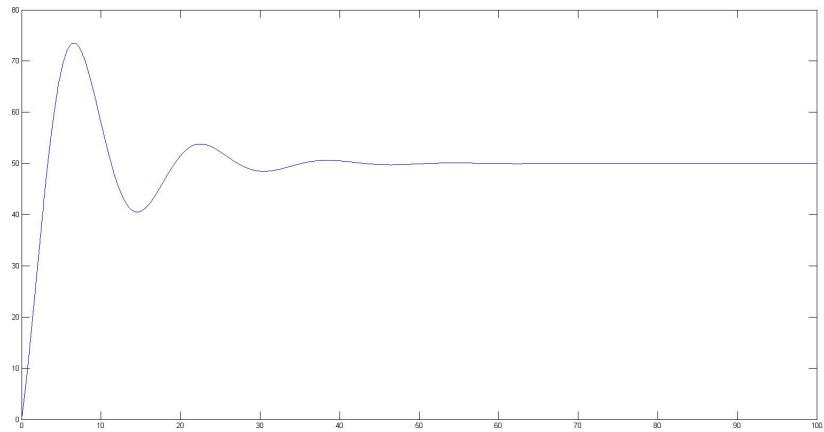


Figura 4.50: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação

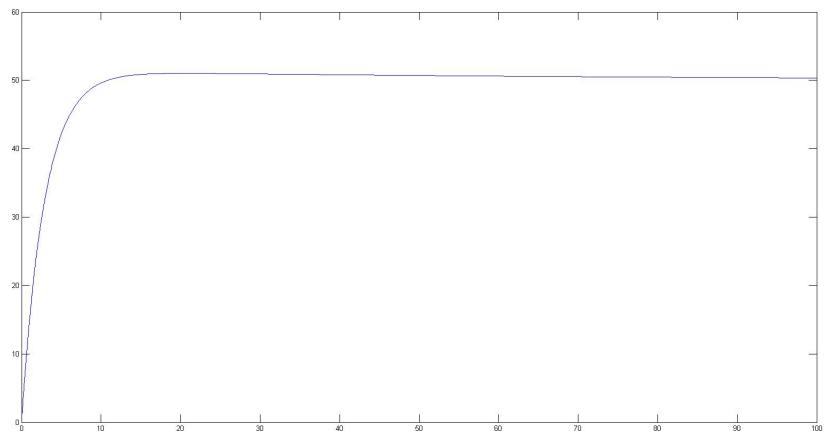


Figura 4.51: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação

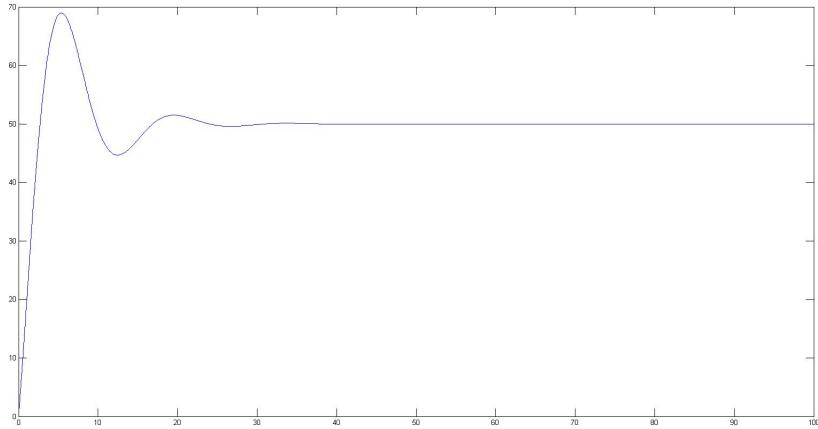


Figura 4.52: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação

Pelas respostas das sintonias propostas nesse método, pode-se observar, novamente, que não satisfazem a necessidade da planta nos casos servo. Isso ocorre por conta da parcela integral do controlador ser mais considerada nesses casos, gerando maior sobrelevação e oscilação. Já para o caso regulatório, o resultado é um bom funcionamento do sistema controlador-trocador de calor.

4.5.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Mais uma vez, os parâmetros da dinâmica do processo serão os mesmos da tabela 3.5. Com tais valores associados às relações nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, obtém-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.35: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método CHR

Caso	K_p	T_i	T_d
Servo sem sobrelevação	401.5596	224.3662	1.3169
Regulatório sem sobrelevação	635.8027	6.2554	1.1088
Servo com 20% de sobrelevação	635.8027	304.4649	1.2458

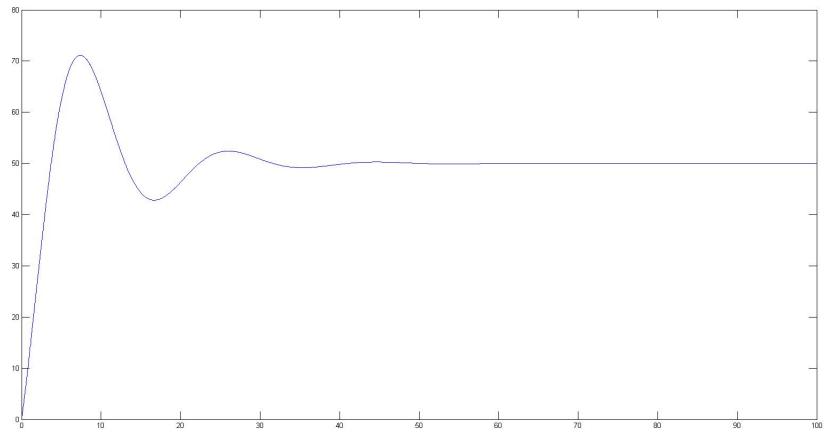


Figura 4.53: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo sem sobrelevação

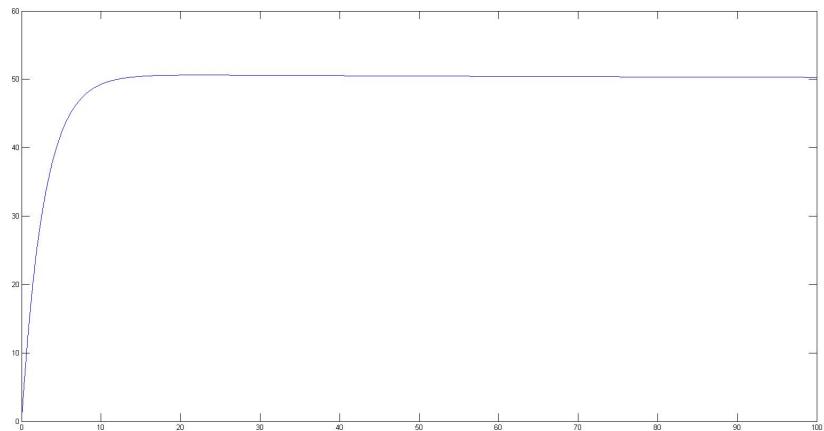


Figura 4.54: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso regulatório sem sobrelevação

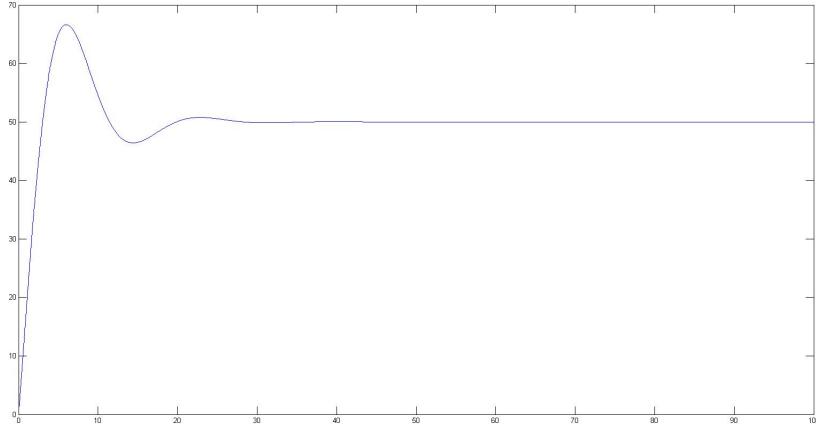


Figura 4.55: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método CHR, caso servo com 20% de sobrelevação

Pelas respostas das sintonias propostas nesse método, pode-se observar, mais uma vez, que não satisfazem a necessidade da planta nos casos servo. Isso ocorre por conta da parcela integral do controlador ser mais considerada nesses casos, gerando maior sobrelevação e oscilação. Já para o caso regulatório, o resultado é um bom e suave funcionamento do sistema controlador-trocador de calor.

4.6 Método IMC

Nesse método, além de utilizar as mesmas funções de transferência identificadas, também utiliza-se um novo parâmetro λ aos cálculos para determinar os ganhos de cada trocador.

Como RIVERA *et al.* (1986) explica, os valores sugeridos para essa variável estão na tabela 4.36. A primeira sugestão é o limitante do desempenho como visto na tabela 2.4 e a segunda sugestão é uma escolha conservadora para o processo.

Tabela 4.36: Valores de λ sugeridos para o Método IMC

λ_1	λ_2
1.7θ	τ

Dessa maneira, pode-se ver os ganhos determinados para cada trocador e cada λ .

4.6.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

Nesse método, os parâmetros da dinâmica do processo estão na tabela 4.37.

Tabela 4.37: Parâmetros da dinâmica do processo de *coolerMain1* e *coolerMain2* - Mé todo IMC

K	τ	θ	λ_1	λ_2
0.3859	208.7247	2.2753	3.8680	208.7247

Com os valores da tabela 4.37, associados às relações na tabela 2.4, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.38: Ganhos resultantes do controlador de *coolerMain1* e *coolerMain2* pelo mé todo IMC

λ	K_p	T_i	T_d
3.8680	108.6328	209.8623	1.1315
208.7247	2.5911	209.8623	1.1315

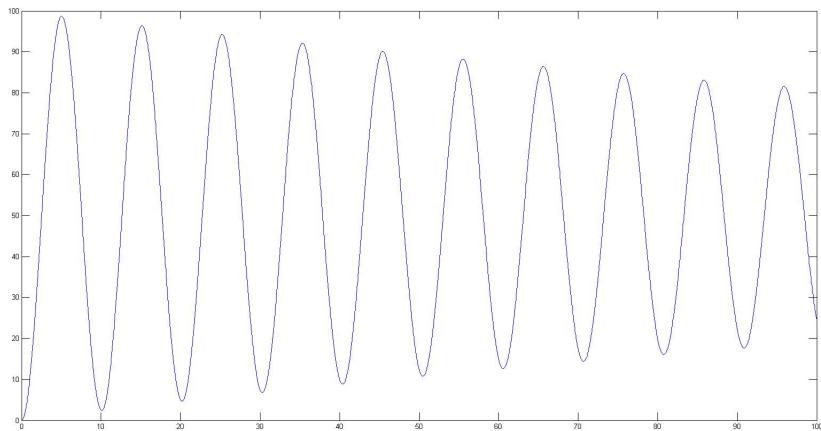


Figura 4.56: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1

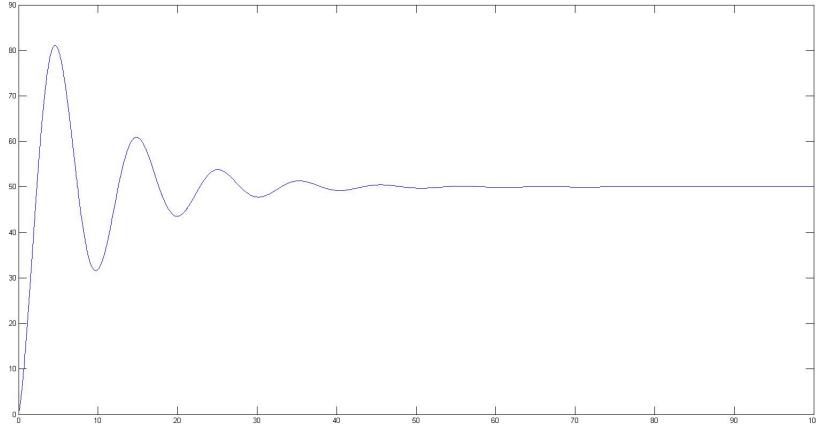


Figura 4.57: Resposta dos sistemas controlador-*coolerMain1* e controlador-*coolerMain2* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2

Nos dois gráficos anteriores, apresentam-se os resultados das sintonias propostas por esse método. Pode-se observar que ambas são bastante oscilatórias e com grandes sobrelevações, portanto, não resultam em um bom controle do processo. Essas características se devem ao fato da parcela integral do controle ser a mais considerada do controlador PID.

4.6.2 Trocador *coolerDehy*

Nesse método, os parâmetros da dinâmica do processo estão na tabela 4.39.

Tabela 4.39: Parâmetros da dinâmica do processo de *coolerDehy* - Método IMC

K	τ	θ	λ_1	λ_2
0.0359	209.1175	2.8825	4.9003	209.1175

Com os valores da tabela 3.2, associados às relações na tabela 2.4, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.40: Ganhos resultantes do controlador de *coolerDehy* pelo método IMC

λ	K_p	T_i	T_d
4.9002	923.6738	210.5588	1.4314
209.1175	27.8185	210.5588	1.4314

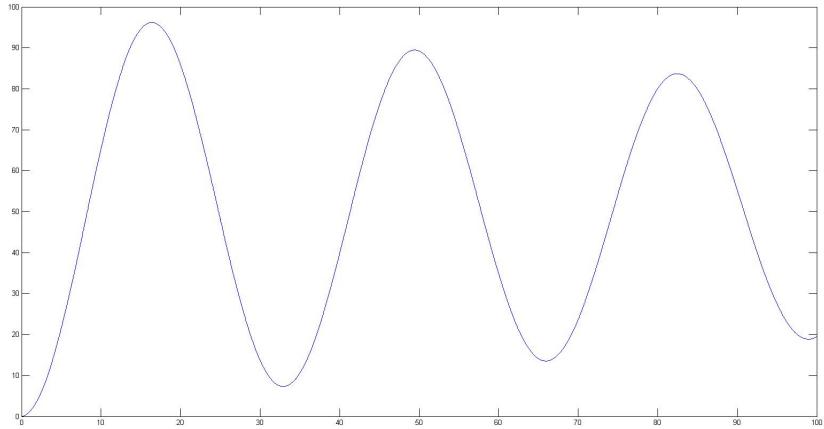


Figura 4.58: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1

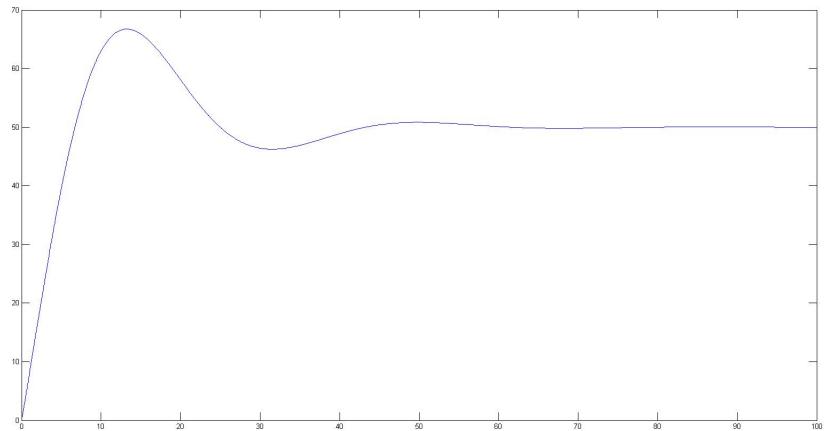


Figura 4.59: Resposta do sistema controlador-*coolerDehy* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2

Nos dois gráficos anteriores, apresentam-se os resultados das sintonias propostas por esse método. Pode-se observar que ambas não resultam em um bom controle do processo, a primeira por ter alta sobrelevação e a segunda por sua característica oscilatória, também, com grande sobrelevação. Essas características se devem ao fato da parcela integral do controle ser bastante considerada pelo controlador.

4.6.3 Trocador *MembraneHeater*

Nesse método, os parâmetros da dinâmica do processo estão na tabela 4.41.

Tabela 4.41: Parâmetros da dinâmica do processo de *MembraneHeater* - Método IMC

K	τ	θ	λ_1	λ_2
0.0348	206.9180	3.0892	5,2516	206.9180

Com os valores da tabela 3.3, associados às relações na tabela 2.4, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.42: Ganhos resultantes do controlador de *MembraneHeater* pelo método IMC

λ	K_p	T_i	T_d
5.2516	881.8537	208.4554	1.5331
206.9108	28.7507	208.4554	1.5331

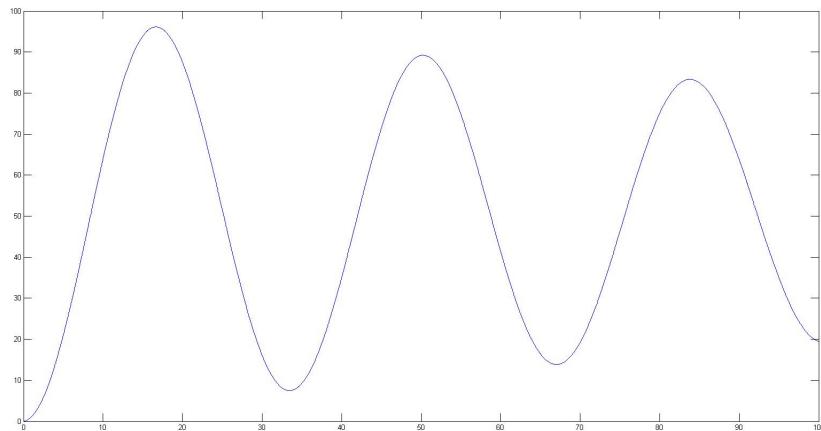


Figura 4.60: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1

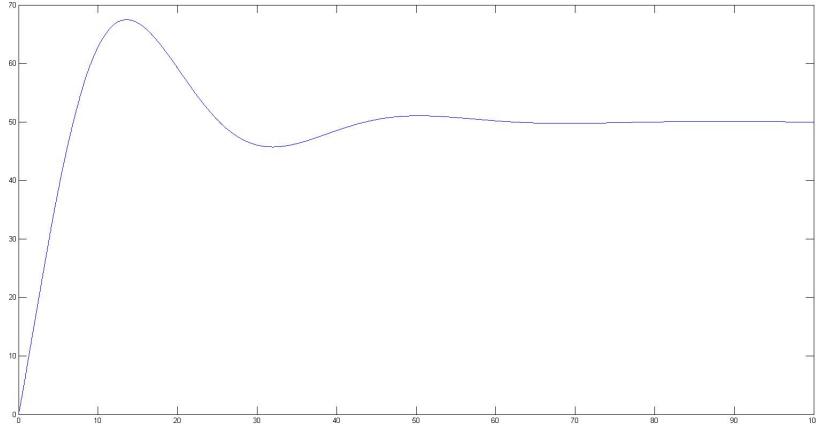


Figura 4.61: Resposta do sistema controlador-*MembraneHeater* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2

Nos dois gráficos anteriores, apresentam-se os resultados das sintonias propostas por esse método. Pode-se observar, novamente, que ambas não resultam em um bom controle do processo, a primeira por ter alta sobrelevação e a segunda por sua característica oscilatória, também, com grande sobrelevação. Mais uma vez, essas características se devem ao fato da parcela integral do controle ser bastante considerada pelo controlador.

4.6.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

Nesse método, os parâmetros da dinâmica do processo estão na tabela 4.43.

Tabela 4.43: Parâmetros da dinâmica do processo de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* - Método IMC

K	τ	θ	λ_1	λ_2
0.1684	222.3210	2.6790	4.0443	222.3210

Com os valores da tabela 3.4, associados às relações na tabela 2.4, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.44: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2* pelo método IMC

λ	K_p	T_i	T_d
4.5542	225.3387	223.6605	1.3315
222.3210	5.9380	223.6605	1.3315

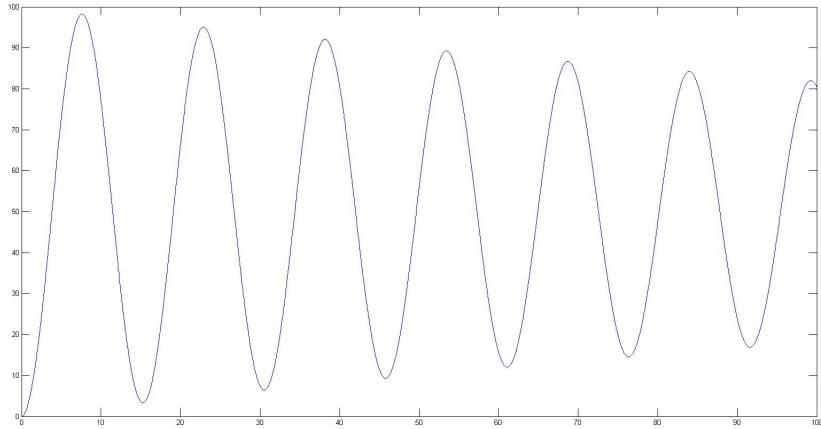


Figura 4.62: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1

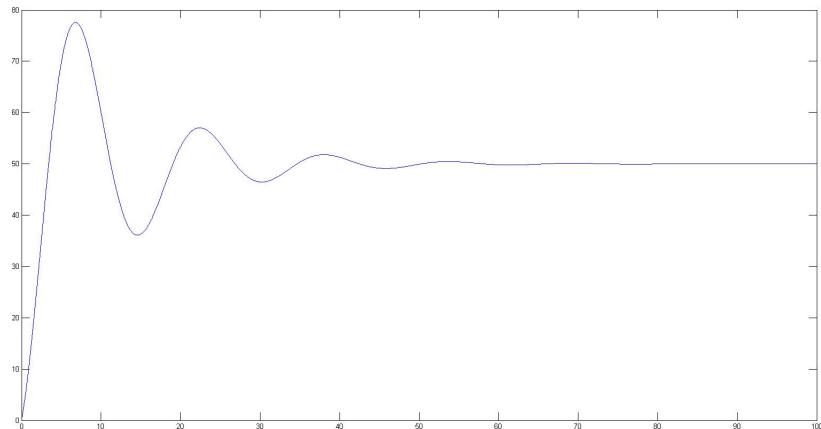


Figura 4.63: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_1* e controlador-*Cooler1ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2

Nos dois gráficos anteriores, apresentam-se os resultados das sintonias propostas por esse método. Pode-se observar que ambas são bastante oscilatórias e com grandes sobrelevações, portanto, não resultam em um bom controle do processo. Essas características se devem ao fato da parcela integral do controle ser muito considerada pelo controlador.

4.6.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

Nesse método, os parâmetros da dinâmica do processo estão na tabela 4.45.

Tabela 4.45: Parâmetros da dinâmica do processo de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* - Método IMC

K	τ	θ	λ_1	λ_2
0.1273	224.3662	2.6338	4.4775	222.3210

Com os valores da tabela 3.5, associados às relações na tabela 2.4, obtêm-se os seguintes ganhos:

Tabela 4.46: Ganhos resultantes do controlador de *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2* pelo método IMC

λ	K_p	T_i	T_d
4.4775	305.9974	225.6831	1.3092
224.3662	7.8565	225.6831	1.3092

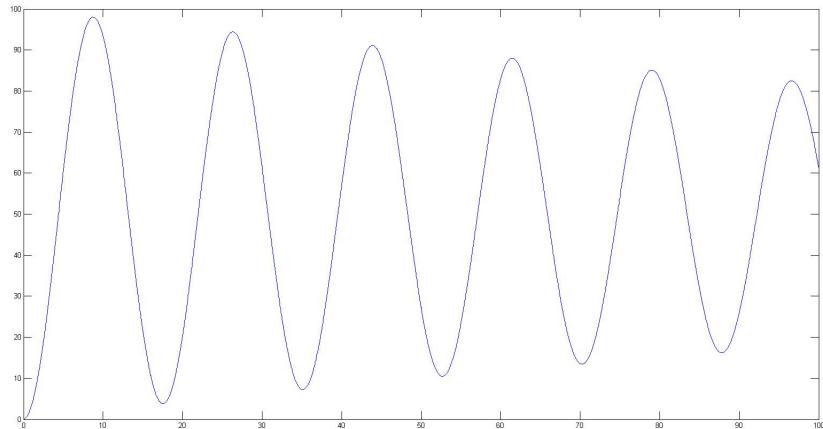


Figura 4.64: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_1

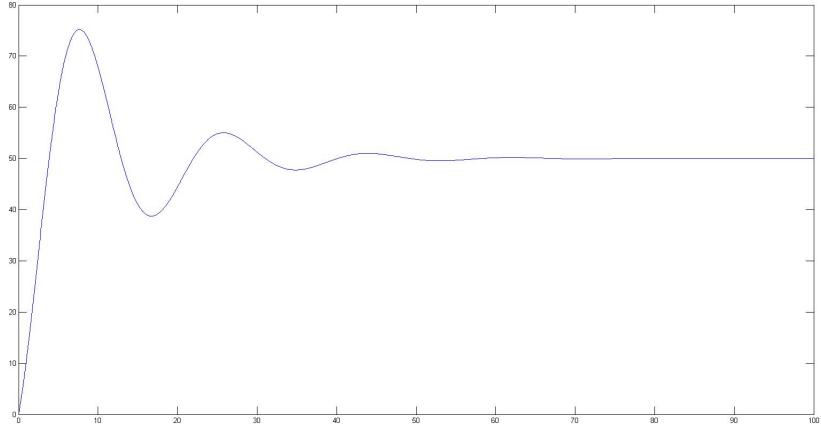


Figura 4.65: Resposta dos sistemas controlador-*Cooler_Exportation_T1S2* e controlador-*Cooler2ExpTRain2* utilizando os ganhos do método IMC, com λ_2

Nos dois gráficos anteriores, apresentam-se os resultados das sintonias propostas por esse método. Pode-se observar, mais uma vez, que ambas são bastante oscilatórias e com grandes sobrelevações, portanto, não resultam em um bom controle do processo. Novamente, essas características se devem ao fato da parcela integral do controle ser muito considerada pelo controlador.

4.7 Comparação das Sintonias

Tendo todos os valores dos ganhos de cada um dos métodos de sintonização e para cada um dos controladores utilizados, pode-se então realizar uma comparação por trocador de calor para que seja possível escolher qual ganho será utilizado na planta simulada.

4.7.1 Trocadores *coolerMain1* e *coolerMain2*

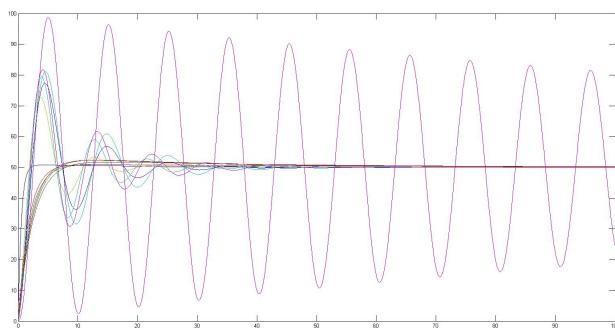


Figura 4.66: Respostas para os diferentes métodos utilizados nos controladores do *coolerMain1* e do *coolerMain2*

Para se ter uma melhor visualização do gráfico, descarta-se os métodos que claramente não apresentaram um controle agradável, por possuírem alta sobrelevação (por se tratar da temperatura de um gás, uma sobrelevação de 10% já pode ser considerada alta) e/ou forte característica oscilatória, como já foi concluído em cada seção dos diferentes métodos de sintonia. Tem-se o seguinte gráfico então:

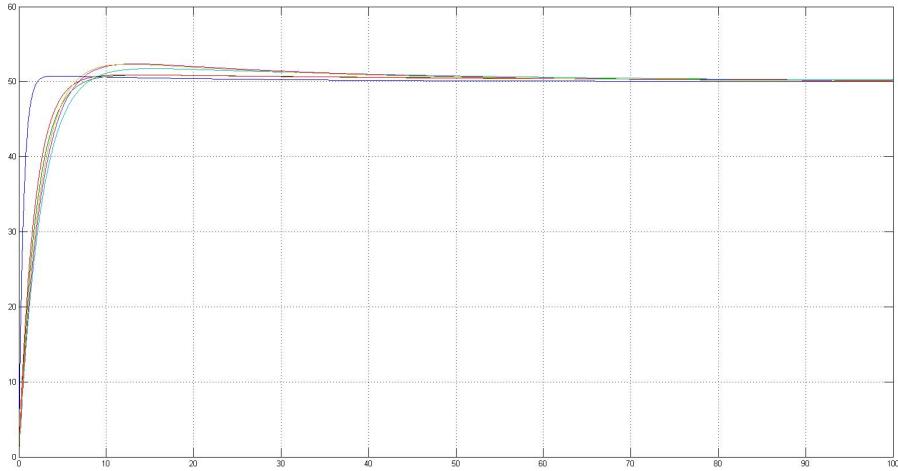


Figura 4.67: Respostas dos melhores métodos utilizados nos controladores do *coolerMain1* e do *coolerMain2*

Como se pode ver no gráfico acima, o método Ziegler-Nichols da Malha Fechada, representado pela curva azul, é o que resulta em uma resposta mais rápida e com menos sobrelevação e, por isso, será utilizado na simulação da planta.

4.7.2 Trocador *coolerDehy*

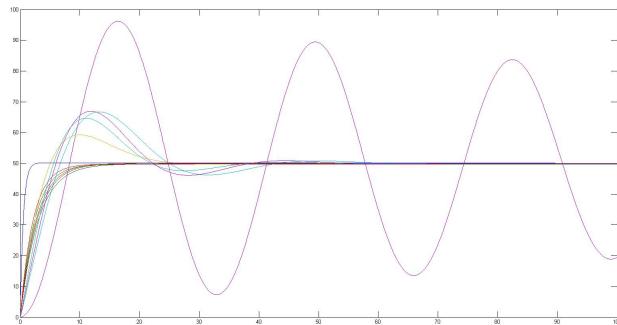


Figura 4.68: Respostas para os diferentes métodos utilizados no controlador do *coolerDehy*

Para se ter uma melhor visualização do gráfico, descarta-se os métodos que claramente não apresentaram um controle agradável, por possuírem alta sobrelevação (por se tratar da temperatura de um gás, uma sobrelevação de 10% já pode ser considerada alta) e/ou forte característica oscilatória, como já foi concluído em cada seção dos diferentes métodos de sintonia. Tem-se o seguinte gráfico então:

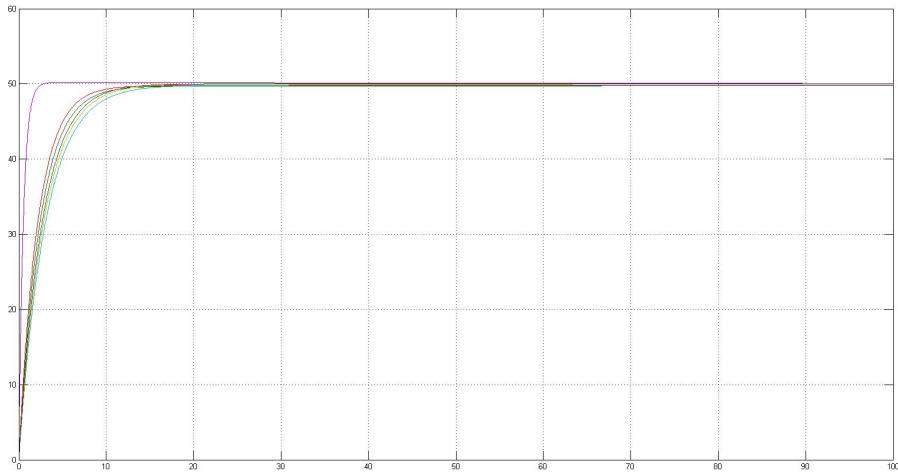


Figura 4.69: Respostas dos melhores métodos utilizados no controlador do *coolerDehy*

Para esse controlador, o método CHR no caso servo sem sobrelevação, representado pela curva roxa, foi o que resultou na melhor e mais rápida resposta, portanto, será utilizado na simulação da planta.

4.7.3 Trocador *MembraneHeater*

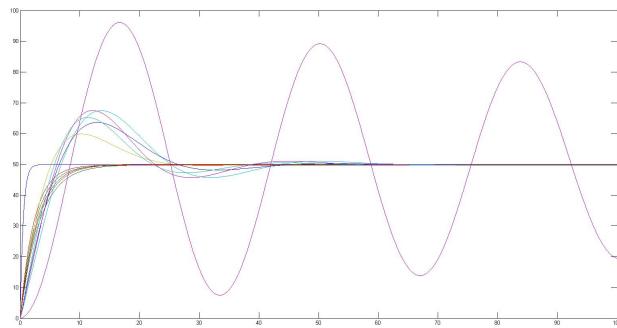


Figura 4.70: Respostas para os diferentes métodos utilizados no controlador do *MembraneHeater*

Para se ter uma melhor visualização do gráfico, descarta-se os métodos que claramente não apresentaram um controle agradável, por possuírem alta sobrelevação (por se tratar da

temperatura de um gás, uma sobrelevação de 10% já pode ser considerada alta) e/ou forte característica oscilatória, como já foi concluído em cada seção dos diferentes métodos de sintonia. Tem-se o seguinte gráfico então:

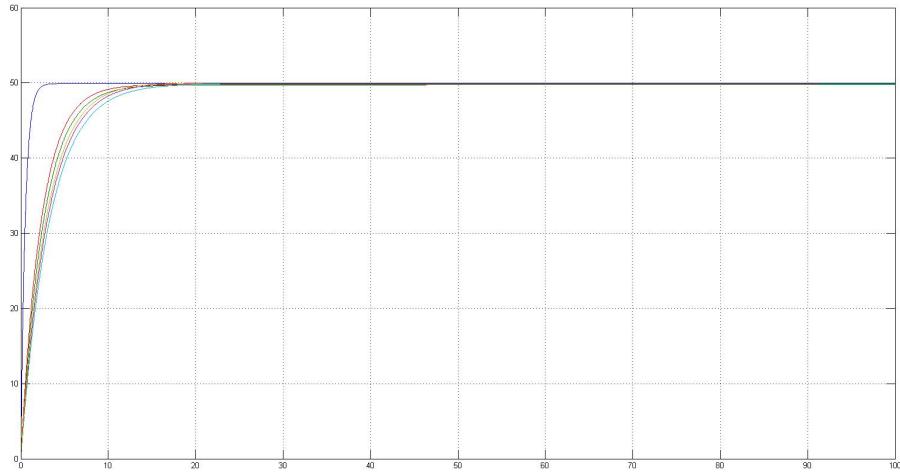


Figura 4.71: Respostas dos melhores métodos utilizados no controlador do *MembraneHeater*

Novamente, o método Ziegler-Nichols da Malha Fechada, representado pela curva azul, será o escolhido para a simulação no *EMSO* por resultar na melhor e mais rápida resposta.

4.7.4 Trocadores *Cooler_Exportation_1* e *Cooler1ExpTRain2*

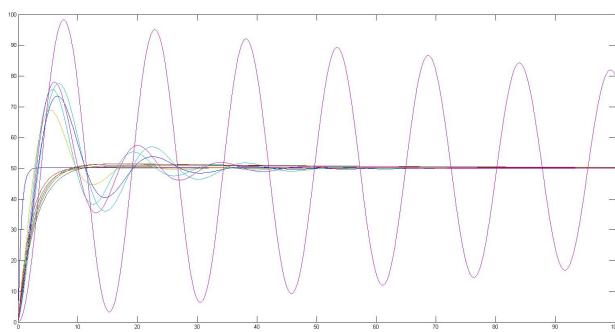


Figura 4.72: Respostas para os diferentes métodos utilizados nos controladores do *Cooler_Exportation_1* e do *Cooler1ExpTRain2*

Para se ter uma melhor visualização do gráfico, descarta-se os métodos que claramente não apresentaram um controle agradável, por possuírem alta sobrelevação (por se tratar da

temperatura de um gás, uma sobrelevação de 10% já pode ser considerada alta) e/ou forte característica oscilatória, como já foi concluído em cada seção dos diferentes métodos de sintonia. Tem-se o seguinte gráfico então:

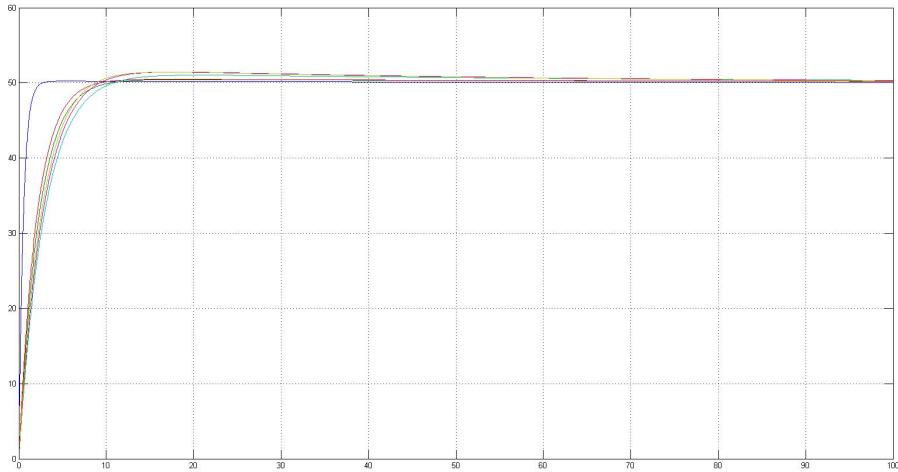


Figura 4.73: Respostas dos melhores métodos utilizados nos controladores do *Cooler_Exportation_1* e do *Cooler1ExpTRain2*

Mais uma vez, será escolhido o método Ziegler-Nichols da Malha Fechada, representado pela curva azul, para a simulação no *EMSO* por resultar na melhor e mais rápida resposta, como se pode ver no gráfico acima.

4.7.5 Trocadores *Cooler_Exportation_T1S2* e *Cooler2ExpTRain2*

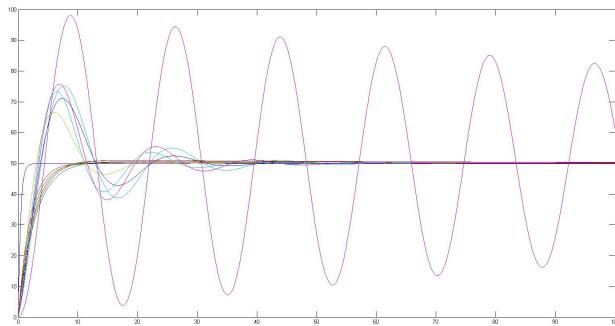


Figura 4.74: Respostas para os diferentes métodos utilizados nos controladores do *Cooler_Exportation_T1S2* e do *Cooler2ExpTRain2*

Para se ter uma melhor visualização do gráfico, descarta-se os métodos que claramente não apresentaram um controle agradável, por possuírem alta sobrelevação (por se tratar da

temperatura de um gás, uma sobrelevação de 10% já pode ser considerada alta) e/ou forte característica oscilatória, como já foi concluído em cada seção dos diferentes métodos de sintonia. Tem-se o seguinte gráfico então:

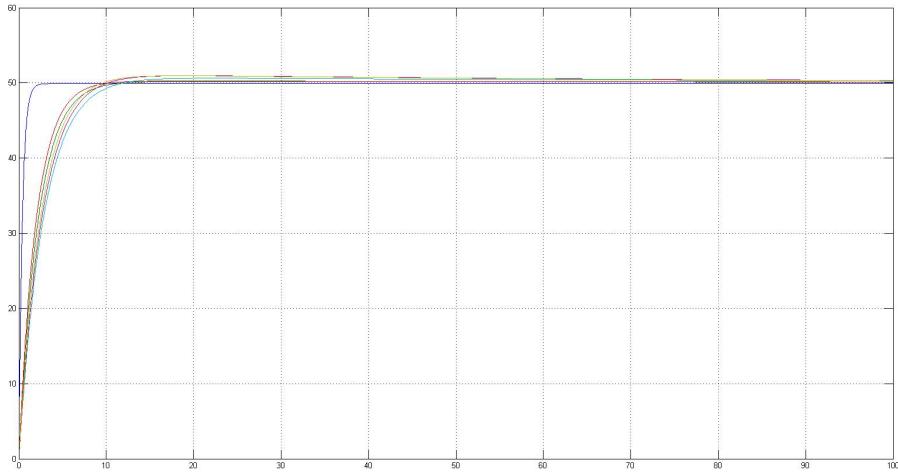


Figura 4.75: Respostas dos melhores métodos utilizados nos controladores do *Cooler_Exportation_T1S2* e do *Cooler2ExpTRain2*

Como se pode ver no gráfico, o método Ziegler-Nichols da Malha Fechada, representado pela curva azul, é o que resulta na melhor resposta. Sendo assim, utiliza-se o mesmo na simulação da planta no *EMSO*.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Como se pode observar pelas simulações anteriores no *Matlab*, os controladores implementados após a realização das sintonias são bastante confiáveis e seguros em se tratando do controle de temperatura.

Dito isso, pode-se analisar os métodos utilizados em si. Pelos resultados, é bastante claro que o método Ziegler-Nichols da Malha Fechada não é, à toa, o mais disseminado e utilizado. No caso desse projeto, ele atendeu muito bem ao que foi requisitado e, por isso, foi utilizado na maioria dos controladores inseridos na planta de processamento do gás. Dessa maneira, consegue-se completar o que foi proposto por esse trabalho: controlar os trocadores de calor de uma planta de processamento do gás natural.

Para complementar tal projeto e a fim de estabelecer trabalhos futuros nesse mesmo caminho, é sugerido implementar controladores de pressão na planta e, ainda, realizar simulações na planta pelo *EMSO* a fim de concretizar um ajuste fino, de forma empírica, sobre os controladores, de modo a estudar os efeitos deles agregados à planta por inteira. Seria interessante, ainda, realizar um estudo do MPC e comparar com os outros métodos aqui testados.

Referências Bibliográficas

- MORAIS, J. M. D. “Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore”, 2013.
- THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência, 2001.
- LOPEZ, A., MILLER, J., SMITH, C., et al. “Tuning controllers with error-integral criteria”, *Instrumentation Technology*, 1967.
- ROVIRA, A. A., MURRILL, P. W., SMITH, C. L. *TUNING CONTROLLERS FOR SET POINT CHANGES*. Relatório técnico, DTIC Document, 1969.
- CARAPETO, L. V. “CONTROLE DA COMPRESSÃO DE GÁS EM PLATAFORMA OFFSHORE: CAMADA REGULATÓRIA”, 2017.
- CAMPOS, M., GOMES, M., PEREZ, J. “Controle Avançado e Otimizaçao na Indústria do Petróleo. Number ISBN 85-212-0398-5”, *Interciência, Sao Paulo*,, 2013.
- SANT’ANNA, A. A. “Simulação de Processamento de Gás Natural em Plataforma Off-Shore”, *Monografia. Programa Escola de Química/Agência Nacional do Petróleo–Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de*, pp. 13–14, 2005.
- SEBORG, D. E., MELLICHAMP, D. A., EDGAR, T. F., et al. *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2010.
- OGATA, K., YANG, Y. “Modern control engineering”, 1970.
- ZIEGLER, J. G., NICHOLS, N. B. “Optimum settings for automatic controllers”, *trans. ASME*, v. 64, n. 11, 1942.
- ÅSTRÖM, K., HÄGGLUND, T. “Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control”, *Journal of process control*, v. 14, n. 6, pp. 635–650, 2004.
- COHEN, G., COON, G. “Theoretical consideration of retarded control”, *Trans. Asme*, v. 75, n. 1, 1953.

BATISTA, L. C. F., FERNANDES, G. Q., MAIA, A. A. T. “ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM COM ATRASO”, 2014.

RIVERA, D. E., MORARI, M., SKOGESTAD, S. “Internal model control: PID controller design”, *Industrial & engineering chemistry process design and development*, v. 25, n. 1, 1986.

CHIEN, K. L. “On the automatic control of generalized passive systems”, *Trans. Asme*, v. 74, 1972.