



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

CONTROLE PREDITIVO PARA COMPRESSÃO DE GÁS NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO *OFFSHORE* DE PETRÓLEO

Isabella Quintanilha de Souza

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 Bezerra de Souza Junior
Daniel Machado Thomaz
Argimiro Resende Secchi

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

CONTROLE PREDITIVO PARA COMPRESSÃO DE GÁS NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO *OFFSHORE* DE PETRÓLEO

Isabella Quintanilha de Souza

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 Bezerra de Souza Junior, D.Sc.

Eng. Daniel Machado Thomaz, B.Sc.

Prof. Argimiro Resende Secchi , D.Sc.

Prof. Alessandro Jacoud Peixoto, D.Sc.

Prof. Simone de Carvalho Miyoshi, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2017

Quintanilha de Souza, Isabella

Controle Preditivo para Compressão de Gás no Processo de Produção *Offshore* de Petróleo/Isabella Quintanilha de Souza.

– Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2017.

XXI, 104 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Junior

Daniel Machado Thomaz

Argimiro Resende Secchi

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

Referências Bibliográficas: p. 103 – 104.

1. Controle preditivo. 2. Produção de petróleo. 3. Compressão do gás. I. Bezerra de Souza Junior, Maurício *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

*Às minhas avós, por sempre me
lembrarem de onde eu vim.*

Agradecimentos

Não há como iniciar meus agradecimentos de outra forma. Serei eternamente grata aos meus pais, Rafael e Luiza, pelo apoio e amor incondicional e por sempre me ensinarem a ser merecedora de tudo que tenho e desejo ter. Tudo que faço é para orgulhá-los e retribuir todos os sacrifícios que fizeram por mim.

Além deles, é importante lembrar do incentivo e apoio de todos os meus familiares, meu irmão Gabriel, meus padrinhos, tios, primos e avós.

Agradeço ao meu amor, amigo e companheiro, José Vitor, por estar ao meu lado desde que a universidade era apenas um sonho para nós dois e por me manter de pé nos momentos mais difíceis. Esse é mais um passo para nós construirmos a nossa vida.

Aos meus orientadores, Daniel e professores Maurício e Argimiro, deixo meu sentimento de admiração e gratidão. Esse trabalho não seria possível sem vocês. Obrigada por sempre estarem dispostos a ensinar e me ajudar. Também agradeço ao meu amigo de projeto, Vinícius, nossa ajuda mútua com certeza adicionou muito aos dois trabalhos.

No primeiro dia de aula me disseram que ninguém se forma sozinho e até então isso se confirmou milhares de vezes. Nossas diferenças, brincadeiras, dificuldades e manhãs de estudo antes das provas foram essenciais para minha formação e para meu crescimento. Deixo aqui meu agradecimento e carinho a todos os alunos da UFRJ que passaram pela minha vida durante esses 5 anos, mas em especial para meus amigos: Gabriel, Fernanda, Adriana, Luis Gustavo, Guilherme, Rodrigo, Pedro, Bruno, Rob, Cayo e Thaís.

Ainda sobre amizade, não poderia deixar de agradecer aos meus grandes amigos Amanda, Carlos Vinicius e Mariane. Vocês, médicos, foram quem ajudaram o meu sonho de ser engenheira a nascer, quem diria! E não posso deixar de lembrar da minha amiga e companheira de profissão, Suelen. Sempre bom sentir, mesmo com a distância, que nossa amizade de infância é para a vida toda.

Por fim, agradeço a Deus por essa conquista. Senhor, sei que durante esses anos te procurei a maioria das vezes em momentos difíceis para te pedir ajuda. Agora venho somente agradecer. Obrigada por ter me dado forças sempre que precisei, obrigada pela família que tenho, obrigada pelos amigos que ganhei.

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.

CONTROLE PREDITIVO PARA COMPRESSÃO DE GÁS NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO *OFFSHORE* DE PETRÓLEO

Isabella Quintanilha de Souza

Fevereiro/2017

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Junior

Daniel Machado Thomaz

Argimiro Resende Secchi

Curso: Engenharia de Controle e Automação

Neste trabalho é realizado o projeto de um sistema de controle preditivo linear multi-variável para uma unidade de compressão de gás em um processo de produção de petróleo. Para isso, foi feita uma análise da planta não linear e a escolha das variáveis a serem utilizadas. De modo geral, essa determinação foi baseada nos compressores e trocadores de calor e nos possíveis distúrbios de vazão e queda da eficiência dos equipamentos.

Os resultados mostram que a utilização do controle preditivo é vantajosa para processos multivariáveis com restrições, como o estudado nesse trabalho. Além disso, o controlador projetado apresentou boa performance tanto para cenários servos como para regulatórios, com exceção de casos cujos distúrbios foram tratados como não medidos. Para esses casos, algumas restrições determinadas não foram respeitadas.

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

PREDICTIVE CONTROL FOR NATURAL GAS COMPRESSION IN THE OFFSHORE OIL PRODUCTION PROCESS

Isabella Quintanilha de Souza

February/2017

Advisors: Maurício Bezerra de Souza Junior

Daniel Machado Thomaz

Argimiro Resende Secchi

Course: Control and Automation Engineering

In this work was studied the design of a linearized multivariate predictive control system for a unit of gas compression during oil production. In order to do that an analysis was done of the non-linear plant and the choice of the variables to be used. In general, this determination was based on the compressors and heat exchangers and on the possible disturbances of flow and drop in equipment efficiency.

The results show that the use of predictive control is advantageous for constrained multivariate processes, such as the one studied in this work. In addition, the designed controller presented good performance for both servo and regulatory scenarios, except for cases whose disturbances were treated as unmeasured. For these cases some specified restrictions was not respected.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xviii
Lista de Símbolos	xix
Lista de Abreviaturas	xxi
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Produção de Petróleo em Águas Profundas	3
2.2 Separador Gravitacional Trifásico	4
2.3 Tratamento do Óleo	5
2.4 Tratamento da Água	6
2.5 Tratamento do Gás	7
2.5.1 Compressão	7
2.5.2 Depuração e Filtração	8
2.5.3 Desidratação	8
2.5.4 Remoção de Dióxido de Carbono e Enxofre	8
2.6 Controle Preditivo	9
2.6.1 QDMC (<i>Quadratic Dynamic Matrix Control</i>)	11
2.6.2 Restrições	14
3 Descrição do Processo	16
3.1 Planta Estudada	16
3.2 Variáveis Utilizadas	20
3.2.1 Variáveis Controladas	21
3.2.2 Variáveis Manipuladas	22
3.2.3 Distúrbio medido	22
3.2.4 Distúrbios não medidos	22
3.3 Estruturação do Sistema	23

4	Identificação, Resultados e Discussões	26
4.1	Simulação	26
4.2	Resultados	27
4.2.1	Degrau na potência do <i>Cooler Main 1</i>	28
4.2.2	Degrau na potência do <i>Cooler Main 2</i>	32
4.2.3	Degrau na potência do <i>Cooler Dehy</i>	36
4.2.4	Degrau na potência do <i>Membrane Heater</i>	40
4.2.5	Degrau na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	44
4.2.6	Degrau na potência do <i>Cooler Train 1</i>	48
4.2.7	Degrau na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	52
4.2.8	Degrau na potência do <i>Cooler Train 2</i>	56
4.2.9	Degrau na vazão molar de entrada	60
4.2.10	Degrau na Eficiência Mecânica dos Compressores	64
4.3	Discussões	67
5	Controle, Resultados e Discussões	69
5.1	Cenários Escolhidos	69
5.2	Primeiro Cenário	71
5.2.1	Primeira Sintonia	71
5.2.2	Segunda Sintonia	77
5.3	Segundo Cenário	82
5.3.1	Primeira Sintonia	82
5.3.2	Segunda Sintonia	87
5.3.3	Terceira Sintonia	89
5.4	Terceiro Cenário	93
5.4.1	Primeira Sintonia	93
5.4.2	Segunda Sintonia	99
6	Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros	101
	Referências Bibliográficas	103

Lista de Figuras

2.1	Esquema de um FPSO acoplado a <i>risers</i> (ASPEN).	4
2.2	Separador gravitacional trifásico (SANTOS JÚNIOR, 2014).	5
2.3	Hidrociclone (Adaptado de AKW).	7
2.4	Diagrama de blocos do controle preditivo (Adaptado de CAMACHO e BORDONS (2011)).	10
2.5	Conceito básico do funcionamento do controle preditivo (Adaptado de SEBORG (2007)).	10
3.1	Primeira etapa da planta.	16
3.2	Segunda etapa da planta.	17
3.3	Terceira etapa da planta.	18
3.4	Quarta etapa da planta.	19
3.5	Quinta e última etapa da planta.	20
3.6	Relação de todas as variáveis selecionadas de acordo com o tipo.	21
3.7	Estrutura de montagem do sinal da temperatura do <i>Membrane Heater</i> a partir do sinal de todas as variáveis manipuladas e distúrbios.	24
3.8	Composição completa do sistema estruturado através do Simulink para simulação.	25
4.1	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Main 1</i> para identificação.	28
4.2	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Main 1</i>	28
4.3	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 1</i>	29
4.4	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 1</i>	29
4.5	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 1</i>	30
4.6	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 1</i>	30

4.7	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 1</i>	31
4.8	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 1</i>	31
4.9	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Main 2</i> para identificação.	32
4.10	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Main 2</i>	32
4.11	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 2</i>	33
4.12	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 2</i>	33
4.13	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 2</i>	34
4.14	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 2</i>	34
4.15	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 2</i>	35
4.16	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Main 2</i>	35
4.17	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Dehy</i> para identificação.	36
4.18	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Dehy</i>	36
4.19	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Dehy</i>	37
4.20	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Dehy</i>	37
4.21	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Dehy</i>	38
4.22	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Dehy</i>	38
4.23	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Dehy</i>	39
4.24	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Dehy</i>	39
4.25	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Membrane Heater</i> para identificação.	40

4.26	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Membrane Heater</i>	40
4.27	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Membrane Heater</i>	41
4.28	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Membrane Heater</i>	41
4.29	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Membrane Heater</i>	42
4.30	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Membrane Heater</i>	42
4.31	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Membrane Heater</i>	43
4.32	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Membrane Heater</i>	43
4.33	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Exportation 1</i> para identificação.	44
4.34	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	44
4.35	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	45
4.36	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	45
4.37	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	46
4.38	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	46
4.39	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	47
4.40	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 1</i>	47
4.41	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Train 1</i> para identificação.	48
4.42	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Train 1</i>	48
4.43	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 1</i>	49
4.44	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 1</i>	49

4.45	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 1</i>	50
4.46	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 1</i>	50
4.47	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 1</i>	51
4.48	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 1</i>	51
4.49	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Exportation 2</i> para identificação.	52
4.50	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	52
4.51	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	53
4.52	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	53
4.53	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	54
4.54	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	54
4.55	Identificação da potência do <i>Compressor Exportaion 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	55
4.56	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Exportation 2</i>	55
4.57	Sequência de degraus aplicada na potência do <i>Cooler Train 2</i> para identificação.	56
4.58	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na potência do <i>Cooler Train 2</i>	56
4.59	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 2</i>	57
4.60	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 2</i>	57
4.61	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 2</i>	58
4.62	Identificação da potência do <i>Compressor Termoleess 1</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 2</i>	58
4.63	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 2</i>	59

4.64	Identificação da potência do <i>Compressor Termoless 2</i> para a sequência de degraus na potência do <i>Cooler Train 2</i>	59
4.65	Sequência de degraus aplicada na vazão molar de entrada (kmol/h) para identificação.	60
4.66	Identificação da temperatura do <i>Membrane Heater</i> para o degrau na vazão molar de entrada.	60
4.67	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	61
4.68	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	61
4.69	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	62
4.70	Identificação da potência do <i>Compressor Termoless 1</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	62
4.71	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	63
4.72	Identificação da potência do <i>Compressor Termoless 2</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	63
4.73	Sequência de degraus aplicada na eficiência mecânica para identificação.	64
4.74	Identificação da potência do <i>Compressor Main 1</i> para a sequência de degraus na sua eficiência mecânica.	64
4.75	Identificação da potência do <i>Compressor Main 2</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	65
4.76	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 1</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	65
4.77	Identificação da potência do <i>Compressor Exportation 2</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	66
4.78	Identificação da potência do <i>Compressor Termoless 1</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	66
4.79	Identificação da potência do <i>Compressor Termoless 2</i> para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.	67
5.1	Sinal do distúrbio tipo degrau na vazão molar de entrada para análise do primeiro cenário.	71
5.2	Sinal da temperatura de saída do <i>Membrane Heater</i> da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	72
5.3	Sinais das potências dos compressores <i>Main 1</i> e <i>2</i> da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	73

5.4	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 1 da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	73
5.5	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 2 da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	74
5.6	Sinais das potências dos cooler <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	74
5.7	Sinais das potências do cooler <i>Dehy</i> e do <i>Membrane Heater</i> da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	75
5.8	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 1 da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	75
5.9	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 2 da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.	76
5.10	Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	77
5.11	Sinais das potências dos compressores <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	78
5.12	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 1 da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	78
5.13	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 2 da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	79
5.14	Sinais das potências dos cooler <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	79
5.15	Sinais das potências do cooler <i>Dehy</i> e do <i>Membrane Heater</i> da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	80
5.16	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 1 da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	80
5.17	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 2 da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	81
5.18	Sinal do distúrbio tipo degrau na eficiência mecânica do compressor <i>Main</i> 2 para análise do segundo cenário.	82
5.19	Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	83
5.20	Sinais das potências dos compressores <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	83
5.21	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 1 da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	84
5.22	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 2 da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	84

5.23	Sinais das potências dos cooler <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	85
5.24	Sinais das potências do cooler <i>Dehy</i> e do <i>Membrane Heater</i> da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	85
5.25	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 1 da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	86
5.26	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 2 da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.	86
5.27	Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da segunda sintonia para o segundo cenário.	88
5.28	Sinais das potências dos compressores <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da segunda sintonia para o segundo cenário.	88
5.29	Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	89
5.30	Sinais das potências dos compressores <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	90
5.31	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 1 da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	90
5.32	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 2 da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	91
5.33	Sinais das potências dos cooler <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	91
5.34	Sinais das potências do cooler <i>Dehy</i> e do <i>Membrane Heater</i> da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	92
5.35	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 1 da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	92
5.36	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train</i> 2 da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.	93
5.37	Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	94
5.38	Sinais das potências dos compressores <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	95
5.39	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 1 da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	95
5.40	Sinais das potências dos compressores <i>Exportation</i> e <i>Termoless</i> 2 da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	96
5.41	Sinais das potências dos cooler <i>Main</i> 1 e 2 da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	96

5.42	Sinais das potências do cooler <i>Dehy</i> e do <i>Membrane Heater</i> da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	97
5.43	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train 1</i> da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	97
5.44	Sinais das potências dos cooler <i>Exportation</i> e <i>Train 2</i> da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.	98
5.45	Sinal da temperatura de saída do <i>Membrane Heater</i> da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.	99

Lista de Tabelas

3.1	Valores das variáveis no estado estacionário (EE).	23
5.1	Restrições determinadas para o primeiro cenário a ser sintonizado.	70
5.2	Parâmetros da primeira sintonia do primeiro cenário.	72
5.3	Parâmetros da segunda sintonia do primeiro cenário.	77
5.4	Parâmetros da primeira sintonia do segundo cenário.	82
5.5	Parâmetros da segunda sintonia do segundo cenário.	87
5.6	Parâmetros da primeira sintonia do terceiro cenário.	94
5.7	Parâmetros da segunda sintonia do terceiro cenário.	99

Lista de Símbolos

CO_2	Dióxido de carbono, p. 7
H_2S	Sulfeto de hidrogênio, p. 8
K	Kelvin, p. 21
M	Horizonte de controle, p. 10
P	Horizonte de predição, p. 10
P_E	Potência efetiva, p. 21
P_T	Potência total, p. 21
S	Matriz dinâmica, p. 13
S_i	Coefficiente de resposta ao degrau no instante i , p. 11
$\Delta \mathbf{u}^{max}$	Restrição da taxa de variação máxima da ação de controle, p. 15
$\Delta \mathbf{u}^{min}$	Restrição da taxa de variação mínima da ação de controle, p. 15
Γ	Fator de ponderação das variáveis manipuladas, p. 14
Λ	Fator de ponderação das variáveis manipuladas, p. 14
η	Eficiência mecânica, p. 21
\mathbf{S}^\dagger	Matriz pseudo-inversa da matriz dinâmica, p. 13
$\hat{\mathbf{e}}$	Erro predito, p. 12
$\hat{\mathbf{y}}$	Sinal de saída predita do processo, p. 9
$\hat{\mathbf{y}}^{des}$	Trajetória desejada para o sinal de saída, p. 12
$\hat{\mathbf{y}}^{ref}$	Trajetória de referência para o sinal de saída, p. 14
\mathbf{u}^{max}	Restrição superior para a ação de controle, p. 15

\mathbf{u}^{min}	Restrição inferior para a ação de controle, p. 15
\mathbf{y}^{max}	Restrição superior para a saída, p. 15
\mathbf{y}^{min}	Restrição inferior para a saída, p. 15
d	Sinal de perturbação, p. 11
k	Instante de amostragem, p. 10
kW	Kilowatt, p. 22
$kmol/h$	Kilomol por hora, p. 22
u	Sinal de controle, p. 10
y_{medido}	Sinal de saída medido, p. 12
y_{modelo}	Sinal de saída do modelo, p. 12

Lista de Abreviaturas

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, p. 1
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente, p. 6
DMC	<i>Dynamic Matrix Control</i> , p. 11
EMSO	<i>Environment for Modeling, Simulation and Optimization</i> , p. 16
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i> , p. 3
GNV	Gás Natural Veicular, p. 1
MIMO	<i>Multiple-Input, Multiple-Output</i> , p. 8
MPC	Model Predictive Control, p. 8
QDMC	<i>Quadratic Dynamic Matrix Control</i> , p. 11
SISO	<i>Single-Input, Single-Output</i> , p. 10
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural, p. 7

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas a produção do petróleo no Brasil vem se intensificando, o que é refletido no recorde histórico de uma média de produção de 2,22 milhões de barris por dia alcançado pela Petrobras em agosto do ano passado (G1, 2016). Grande parte dessa produção é oriunda de poços de petróleo *offshore*.

O petróleo recém extraído de um reservatório é composto não só pelo óleo, como também por quantidades significativas de gás e água. Vale ressaltar que a quantidade de água presente em um poço é diretamente proporcional a idade do mesmo, de modo que a quantidade de óleo extraído diminui ao longo do tempo.

A presença de mais de uma fase durante a produção de petróleo faz necessário um tratamento cuidadoso de cada uma delas, de modo a respeitar normas comerciais e ambientais, a fim de realizar a comercialização de derivados de petróleo de alta qualidade e o descarte da água sem agredir o meio ambiente.

A fase gasosa pode ter por objetivo final, por exemplo, a utilização como gás *lift* e a comercialização como combustível, o gás natural veicular (GNV). Assim, o condicionamento do gás é uma etapa extremamente necessária para a remoção de compostos e materiais que possam alterar as características determinadas pela Resolução ANP nº 16/2008 e danificar os equipamentos utilizados no seu aproveitamento. O condicionamento é composto pelos processos de separação, depuração e filtração, dessulfurização, desidratação e compressão. Este último será o foco deste trabalho.

Durante o processo de compressão, há grandes variações de pressão e temperatura. Assim, caso o funcionamento dos compressores e trocadores de calor ocorra de modo descontrolado e sem um monitoramento adequado, pode causar a redução da vida útil dos equipamentos ou o consumo excessivo de energia. Problemas como esses podem determinar o fracasso de um projeto.

Como o processo de compressão do gás natural é, normalmente, composto por mais de um estágio de compressores seguidos de trocadores de calor para manter a temperatura desejada, o sistema a ser controlado se torna multivariável. Por essa característica, um método de controle indicado para esse caso é o controle preditivo. Portanto, sua imple-

mentação em uma planta de compressão de gás será o objetivo deste trabalho.

Nos capítulos seguintes, será apresentado o tratamento primário do petróleo bruto, com sua separação em três fases, bem como o tratamento individual destas. Em seguida, serão introduzidos os fundamentos teóricos do controle preditivo e da estratégia de controle adotada. Também haverá uma análise da planta utilizada e de todas as variáveis escolhidas para o trabalho. Por fim, será detalhado todo o processo de criação do sistema de controle da planta do compressor, os cenários simulados e seus resultados.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Produção de Petróleo em Águas Profundas

O avanço da exploração em direção as profundezas do mar traz a necessidade de novas tecnologias, técnicas e equipamentos que se adequem melhor para a extração do petróleo nesse ambiente. Segundo MORAIS (2013), as características que resultam em alto grau de dificuldades técnicas na produção de petróleo são:

1. as condições prevalentes no clima, no ambiente marinho e nas rochas abaixo do leito oceânico;
2. as grandes distâncias entre as plataformas e os poços no fundo do oceano, e entre as plataformas e o continente;
3. a invisibilidade das operações no mar.

A unidade de produção na superfície, seja um navio FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) ou qualquer outro tipo de plataforma, recebe o petróleo recém extraído do fundo do mar através de tubulações longas e flexíveis conhecidas como *risers* e mostradas na Figura 2.1. Esse método ameniza o problema da distância citado anteriormente, contudo, os *risers* ainda ficam sujeitos às intempéries do oceano. Além disso, é normal a ocorrência de um regime de escoamento caracterizado por grandes variações na vazão que escoam ao longo dos dutos, que representam um tipo de perturbação para o processo (STASIAK, 2012).

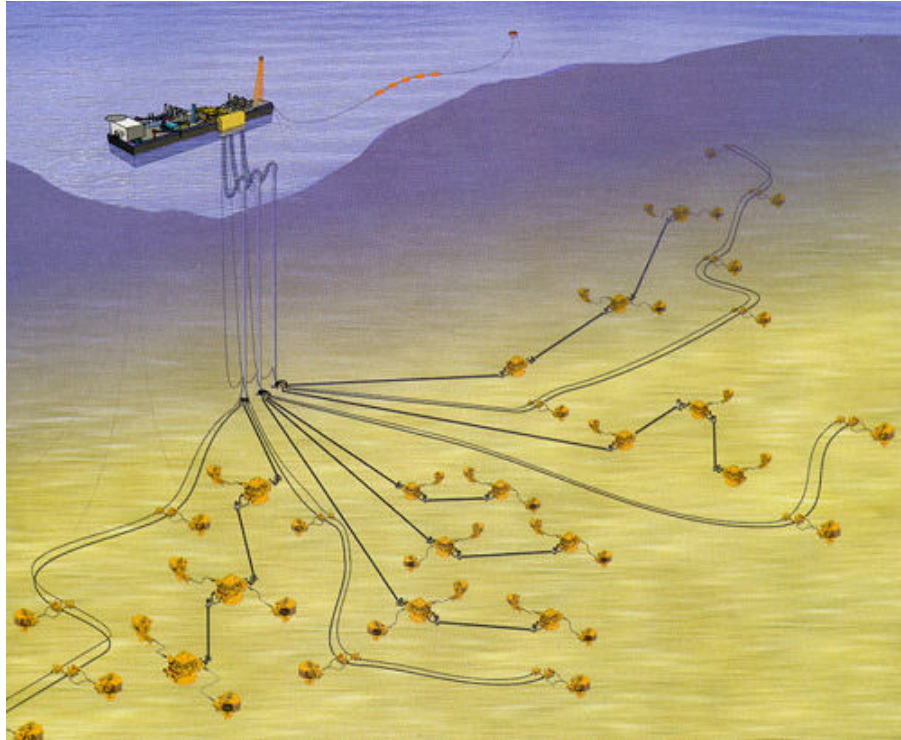


Figura 2.1: Esquema de um FPSO acoplado a *risers* (ASPEN).

2.2 Separador Gravitacional Trifásico

Entre os fluidos produzidos, é comum a ocorrência de gás natural e água. Assim, o petróleo se torna uma mistura trifásica que precisa ser separada. Portanto, a primeira etapa de tratamento do óleo bruto é a separação da mistura por meio do separador gravitacional trifásico, de modo a manter a quantidade de impurezas dentro de limites toleráveis, isto porque as etapas posteriores de tratamento e transporte são afetadas pela pureza de cada fase.

O separador trifásico também exerce a função de tanque pulmão (*surge tank*), pois ele recebe diretamente as variações de vazão vindas dos *risers* e deve absorver essas flutuações de carga para fornecer uma vazão mais estável a jusante, a fim de não comprometer a operação da unidade de produção (MENDES, 2012).

Conforme mostrado na Figura 2.2, este equipamento possui uma entrada para o óleo bruto e três saídas, uma para cada fase. Além disso, ele é constituído por uma placa defletora, extratores de névoa, controladores de pressão e nível, os quais realizam o controle do fluxo de saída dos fluidos, e duas câmaras: a de separação e a de óleo.

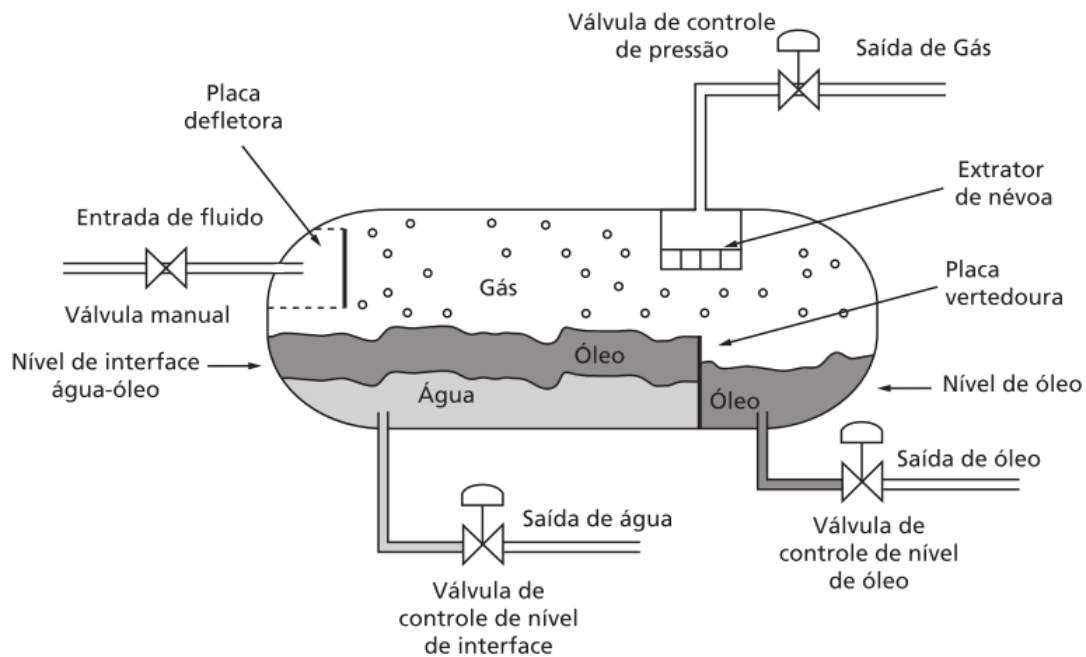


Figura 2.2: Separador gravitacional trifásico (SANTOS JÚNIOR, 2014).

O gás passa pela placa defletora, a qual serve como barreira para as gotas maiores de água presentes no gás. Em seguida, por extratores de névoa, que retiram as gotículas de umidades que ainda possam ter sido arrastadas pelo gás durante o processo. Por fim, a vazão de saída do gás é manipulada para o controle da pressão do mesmo. Esta pressão de saída é uma importante componente do sistema de tratamento e exportação do gás que será visto a seguir, isto porque os compressores devem funcionar de modo que esta não aumente e diminua a vazão de exploração.

O líquido, após passar pela placa defletora, é direcionado para a câmara de separação, onde as placas de coalescência realizam a separação gravitacional das fases oleosa e aquosa. Dessa forma, através de controle de nível, a água se mantém na câmara de separação e o óleo é levado para a câmara de óleo.

2.3 Tratamento do Óleo

O separador gravitacional trifásico é capaz de remover toda a água livre misturada com o óleo, contudo, não consegue retirar a água emulsionada. A emulsão de duas fases ocorre por causa da agitação das duas em contato e também pela presença de agentes emulsificantes, aqueles que apresentam afinidade tanto pela água quanto pelo óleo. Para o caso do petróleo, a emulsão da água em óleo pode ter origem tanto da formação no poço quanto de altas taxas de cisalhamento durante o escoamento (IIDA *et al.*, 2007).

A estabilidade de uma emulsão aumenta a viscosidade do óleo e causa, conseqüentemente, uma perda de carga de todo o sistema, o que pode comprometer a capacidade de

todo o processo de produção (DE SOUZA, 2009). Portanto, um tratamento mais cuidadoso do óleo deve ser realizado a fim de desestabilizar a emulsão.

Algumas técnicas que auxiliam na desestabilização de emulsões são listadas a seguir (DA SILVA *et al.*, 2007):

- Adição de desemulsificante: produtos químicos que deslocam os emulsificantes naturais da superfície das gotas;
- Aquecimento: reduz a viscosidade e aumenta a difusibilidade do desemulsificante facilitando sua chegada na superfície das gotas;
- Uso de campo elétrico: através da indução cria correntes alternadas que causam contração e alongamento sucessivo das gotas;
- Uso de campo centrífugo: gera um campo gravitacional que aumenta a velocidade de segregação das gotas de água.

Após a desemulsificação, o óleo tem como destino as refinarias, onde são realizados processos químicos de limpeza e refino do óleo bruto.

2.4 Tratamento da Água

Além do óleo e do gás, a água contida no poço também é produzida durante as atividades de produção. Seu descarte deve ser feito de acordo com as normas vigentes (Resoluções CONAMA 357/2005 e 430/2011). Caso a qualidade do efluente não seja observada e o teor de óleo contido na água não esteja de acordo com a legislação, pode-se ter prejuízo financeiro por multas e danos à imagem do órgão explorador.

Portanto, o óleo residual precisa ser removido a fim de torná-la apropriada para o descarte ou reinjeção no poço. Para esta finalidade, hidrociclones são normalmente utilizados. Este equipamento utiliza a força centrífuga e seu funcionamento está associado à alimentação tangencial. Desta forma, se torna adequado para ser empregado na separação do óleo e da água, acoplado na saída de água do separador trifásico (MENDES, 2012).

Como mostrado na Figura 2.3, a água com resquícios de óleo é introduzida no hidrociclone e segue um fluxo em espiral no sentido do maior ao menor diâmetro, de modo que o fluxo é acelerado ao longo desse decréscimo. Com isso, a força centrífuga criada mantém a água, que é o componente mais pesado, próxima as paredes e o óleo mais próximo ao centro. Devido ao formato cônico do equipamento e a diferença de pressão criada entre o centro e as paredes, é gerado um fluxo axial reverso na parte central do hidrociclone. Assim, o óleo é levado até o orifício de rejeito e a água sai pelo outro extremo (COELHO, 2011).

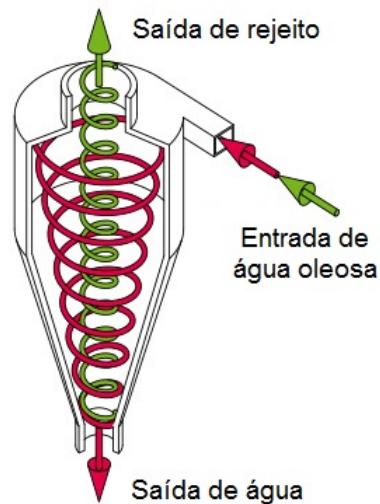


Figura 2.3: Hidrociclone (Adaptado de AKW).

2.5 Tratamento do Gás

Após sair do separador, o gás passa por uma etapa de condicionamento, a qual é composta por etapas de depuração, compressões, desidratação e remoção de CO_2 e enxofre. Somente após esses processos ele pode ser utilizado como gás *lift* nos próprios poços de petróleo, reinjetado no reservatório ou então exportado através dos gasodutos para Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN).

As quatro etapas do condicionamento do gás são detalhadas a seguir:

2.5.1 Compressão

Durante o estágio de compressão do gás a sua pressão é elevada por meio de um conjunto de compressores para fornecer energia e promover seu escoamento pelos processos, além de manter uma pressão de operação adequada no separador trifásico, a fim de não comprometer a continuação da exploração do poço.

Esse processo é composto por dois estágios de compressão (DA SILVA *et al.*, 2007):

- **Estágio principal:** composto por um compressor e responsável por fornecer a energia necessária para o gás fluir por todas as fases seguintes.
- **Estágio para exportação:** composto por dois ou três compressores em sequência e encarregado de elevar a pressão para que o gás seja exportado para as UPGNs.

Todos os compressores são seguidos de resfriadores para reduzir a temperatura do gás recém comprimido e também de vasos depuradores, os quais removem as frações condensáveis geradas pelas trocas térmicas.

Nesse trabalho, será utilizada essa etapa do condicionamento. Como será visto no capítulo seguinte, a potência dos compressores e dos trocadores de calor, entre outras variáveis, serão utilizados para controlar o processo. Dessa forma, o método de controle escolhido para este trabalho é por meio de controlador preditivo, o qual, de acordo com SEBORG (2007), apresenta bom resultados em processos químicos multivariáveis com restrições.

2.5.2 Depuração e Filtração

Nas etapas de depuração e filtração é realizada a separação de partículas líquidas e sólidas ainda presentes no gás (DE OLIVEIRA, 2010), como por exemplo: água, condensado de gás, produtos químicos, areia, óxidos de ferro e produtos de corrosão. Elas ocorrem normalmente antes do processo de compressão, mas também estão presentes entre os seus estágios.

2.5.3 Desidratação

A desidratação é o processo no qual ocorre a remoção da umidade residual, já que o gás, após sair do separador, ainda pode conter alguns resquícios de líquido. Essa etapa se torna extremamente necessária porque em certas condições a água pode formar hidratos com o gás, produzindo depósitos e reduzindo o diâmetro da tubulação ou até mesmo bloqueá-la (SANT'ANNA, 2005).

No processo estudado, a etapa de desidratação ocorre após o término do estágio principal de compressão.

2.5.4 Remoção de Dióxido de Carbono e Enxofre

Segundo AMARAL *et al.* (2010), a remoção do dióxido de carbono (CO_2) e do enxofre, normalmente na forma de sulfeto de hidrogênio (H_2S), se torna necessária, pois ambos, em conjunto com a umidade, geram ácidos que corroem os dutos. Além disso, o H_2S pode causar efeitos graves à saúde e o CO_2 diminui o poder de combustão do gás natural.

Na planta utilizada, a remoção de CO_2 ocorre logo após a desidratação e antes de iniciar o estágio de compressão para exportação do gás. A remoção é realizada através da técnica da membrana de fibra oca, na qual a absorção do composto é promovida em um contato entre o gás-líquido de forma não dispersiva. É importante ressaltar para este estudo que a estabilidade da membrana é condicionada a limites de temperatura e pressão (AMARAL, 2009).

2.6 Controle Preditivo

O controle preditivo ou MPC (*Model Predictive Control*) é uma técnica de controle avançado em que o modelo da planta e os valores reais de suas entradas (variáveis manipuladas) são utilizados para realizar previsões e correções dos valores futuros das saídas (variáveis controladas). É muito utilizado em sistemas relacionados a processos químicos, visto que é uma estratégia de controle adequada para sistemas MIMO (*multiple-input, multiple-output*) com restrições (MORARI *et al.*, 1989).

O MPC oferece diversas vantagens importantes (SEBORG, 2007):

1. O modelo do processo captura as interações dinâmicas e estáticas entre as variáveis de entrada, saída e de distúrbio;
2. Restrições nas entradas e saídas são consideradas de maneira sistemática;
3. Os cálculos de controle podem ser coordenados com o cálculo dos *setpoints* ideais;
4. Previsões do modelo precisas podem fornecer avisos prévios de potenciais problemas.

Vale ressaltar que, para que esse tipo de controle obtenha o resultado esperado, é necessário que o modelo do processo apresente um certo nível de precisão. Como a maioria dos processos químicos são sistemas não-lineares, o levantamento de um modelo aproximado da planta é uma etapa fundamental para seu bom funcionamento. Dessa forma, neste trabalho adotou-se a identificação de modelos linearizados em torno do estado estacionário de operação da planta.

Os objetivos gerais de um controlador MPC são (QIN e BADGWELL, 2003):

1. Evitar violações nas restrições das entradas e das saídas;
2. Levar uma das variáveis controladas a sua referência, enquanto mantém as outras dentro de seus limites especificados;
3. Evitar movimento excessivo das variáveis manipuladas;
4. Controlar o maior número possível de variáveis de processo quando um sensor ou atuador não estiver disponível.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 2.4, a seguir, mostra o funcionamento do controle preditivo. Um modelo é utilizado para prever as saídas futuras \hat{y} da planta, baseado nos valores atuais e passados das entradas e saídas, com o objetivo de otimizar as ações de controle futuras u . Essas ações de controle são calculadas a partir de uma função custo e suas restrições que serão apresentadas ainda nessa seção.

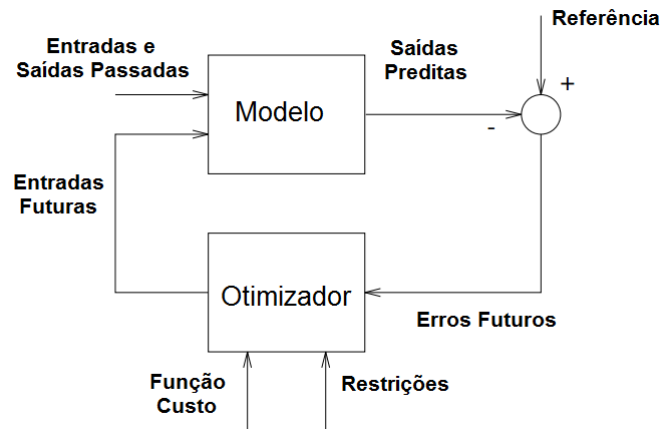


Figura 2.4: Diagrama de blocos do controle preditivo (Adaptado de CAMACHO e BORDONS (2011)).

A Figura 2.5, a seguir, mostra o princípio de operação do controle no instante de amostragem atual k considerando um sistema SISO (*single-input, single-output*) para simplificação.

O horizonte de controle M representa os M movimentos futuros do *input* u (um a cada instante de amostragem) para que o *output* predito \hat{y} atinja o *setpoint* determinado na hipótese que não haja nenhum distúrbio no processo. Após esses M movimentos, o sinal de controle u se manterá constante. O horizonte de predição P define o intervalo de tempo em que, aplicadas as ações de controle e na ausência de distúrbios, a saída do processo atingirá o *setpoint*.

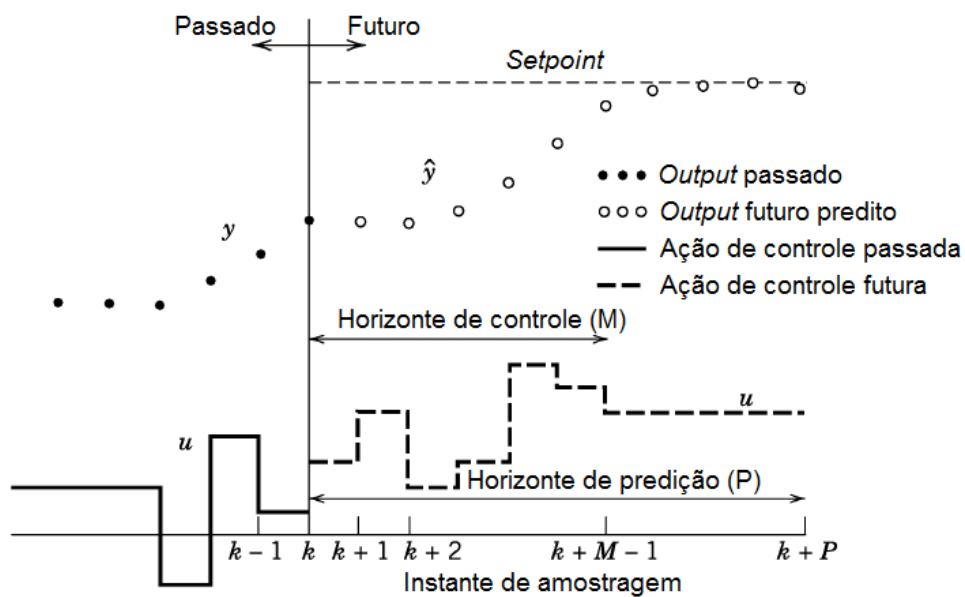


Figura 2.5: Conceito básico do funcionamento do controle preditivo (Adaptado de SEBORG (2007)).

Portanto, temos que o valor de u será dado por $u(k+i-1)$, em que $i = 1, 2, \dots, M$, para obter o *output* predito dado por $y(k+i)$, em que $i = 1, 2, \dots, P$. Tendo os conceitos de horizonte de controle e de predição, é fácil notar a restrição $M < P$.

Embora a sequência de M ações de controle seja definida, apenas a primeira ação é realizada. Isto ocorre porque o modelo do controlador não representa o comportamento real da planta, apenas uma aproximação, normalmente linearizada, do processo. Além disso, podem ocorrer distúrbios não medidos, deixando a saída do sistema ainda mais diferente da que foi prevista. Assim, a cada iteração será necessário realizar um novo cálculo para a correção desse erro. Por isso, o algoritmo iterativo do MPC, após a realização da ação de controle no instante $k+1$, calcula novamente uma nova sequência a partir do valor do *output* do processo $y(k+1)$.

2.6.1 QDMC (*Quadratic Dynamic Matrix Control*)

O QDMC será a estratégia de controle utilizada nesse trabalho e foi primeiramente descrita em CUTLER *et al.* (1983). Ela é um melhoramento da técnica DMC (*Dynamic Matrix Control*) (CUTLER e RAMAKER, 1979), visto que nesta ainda não havia sido proposta uma forma de lidar com restrições.

Considerando um sistema SISO contínuo e estável e discretizado-o com um período de amostragem N , a sua representação entrada/saída dada pela resposta ao degrau (Modelo de Reposta ao Degrau) é dada por:

$$\hat{y}(k) = \hat{y}_0 + \sum_{i=1}^{N-1} S_i [u(k-i) - u(k-i-1)] + S_N u(k-N+1) \quad (2.1)$$

Em que S_i é o coeficiente da resposta ao degrau no instante i . Esse coeficiente é fundamental para que o controle seja capaz de prever o comportamento do sistema. Portanto, o primeiro passo da implementação do QDMC será determiná-lo aplicando ao modelo do sistema perturbações do tipo degrau.

Como durante todo esse trabalho será utilizado variável desvio, pode-se considerar o valor das variáveis no instante inicial igual a zero, portanto temos que $y_0 = 0$. Será também adicionado o efeito de perturbações $d(k)$. Além disso, dado que $\Delta u(k-i) = u(k-i) - u(k-i-1)$ e substituindo esses valores em 2.1, teremos:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{N-1} S_i \Delta u(k-i) + S_N u(k-N+1) + d(k) \quad (2.2)$$

Tipicamente, a principal característica dos distúrbios é sua imprevisibilidade. Por isso, durante a predição do comportamento futuro das variáveis controladas, uma forma de contornar esse problema será considerar as perturbações futuras iguais as perturbações atuais, ou seja, no instante k . Como $\hat{d}(k)$ também não é previsível, ela é inferida como

sendo a diferença entre o valor medido de $y(k)$ e o valor predito pelo modelo $\hat{y}(k)$, logo:

$$\hat{d}(k) = y(k)_{medido} - y(k)_{modelo} \quad (2.3)$$

$$= y(k)_{medido} - \left[\sum_{i=1}^{N-1} S_i \Delta u(k-i) + S_N u(k-N+1) \right] \quad (2.4)$$

Pode-se observar que as únicas incógnitas em 2.4 são as futuras ações de controle (u). Assim, manipulando a Equação 2.4 e representando as previsões do longo do horizonte de previsão P na forma matricial temos:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(k+1) \\ \hat{y}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}^*(k+1) \\ \hat{y}^*(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}^*(k+P) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \cdots & 0 \\ S_2 & S_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_P & S_{(P-1)} & \cdots & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+P-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{d}(k) \\ \hat{d}(k) \\ \vdots \\ \hat{d}(k) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Ou, de forma simplificada:

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \hat{\mathbf{y}}^*(k) + \mathbf{S}\Delta\mathbf{u}(k) + \hat{\mathbf{d}}(k) \quad (2.6)$$

Em que \mathbf{y}^* , anteriormente denotado por y_{modelo} são as chamadas previsões em malha aberta e são dadas por:

$$\hat{y}^*(k+v) = \sum_{j=v+1}^{N-1} S_j \Delta u(k+v-j) + S_N u(k+v-N), \quad \text{para } v = 1, 2, \dots, P \quad (2.7)$$

Dessa forma, ao observar a equação 2.5, temos P equações ($\hat{y}(k+1), \hat{y}(k+2), \dots, \hat{y}(k+P)$) e P incógnitas ($\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+P-1)$).

Como o objetivo é que as previsões da saída futura satisfaçam uma trajetória desejada, ou seja, $\hat{\mathbf{y}}(k) = \hat{\mathbf{y}}^{des}(k)$, manipulando a equação 2.6, temos a lei de controle proporcional ao erro predito dada por:

$$\Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{S}^{-1} \left[\hat{\mathbf{y}}^{des}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) - \hat{\mathbf{d}}(k) \right] \quad (2.8)$$

$$= \mathbf{S}^{-1} \hat{\mathbf{e}}(k) \quad (2.9)$$

Em que $\hat{\mathbf{e}}(k)$ é o erro predito.

Contudo, as ações de controle determinadas por essa lei seriam muito fortes e não garantiriam que as variáveis se mantivessem dentro das restrições, não sendo apropriadas para problemas reais (SILVEIRA, 2006). Portanto, serão apresentadas a seguir duas soluções para esse problema.

1ª Solução: Reduzir o número de incógnitas para $M < P$.

Ao reduzir o número de incógnitas de P para M , sendo, como dito anteriormente, $M < P$, de modo que as ações de controle só serão definidas ao longo do horizonte de controle M . Dessa forma, a equação 2.5 será agora dada por:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(k+1) \\ \hat{y}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}^*(k+1) \\ \hat{y}^*(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}^*(k+P) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \cdots & 0 \\ S_2 & S_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_P & S_{(P-1)} & \cdots & S_{(P-M+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{d}(k) \\ \hat{d}(k) \\ \vdots \\ \hat{d}(k) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Em que a matriz

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \cdots & 0 \\ S_2 & S_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_P & S_{(P-1)} & \cdots & S_{(P-M+1)} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

É chamada de matriz dinâmica.

Portanto, nota-se que teremos um sistema com mais equações (P) do que incógnitas (M). Apesar de um sistema desse tipo não ter uma solução direta, ele se encaixa perfeitamente em um problema de otimização com o objetivo de minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor do *output* desejado determinado pela trajetória de referência e o o valor predito pelo modelo:

$$\min_{\Delta \mathbf{u}(k)} \left[\hat{\mathbf{y}}^{des}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) \right]^T \left[\hat{\mathbf{y}}^{des}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) \right] \quad (2.12)$$

Além disso, como a matriz dinâmica \mathbf{S} não é mais uma matriz quadrada, será necessário utilizar a matriz pseudo-inversa (\mathbf{S}^\dagger) para termos a nova lei de controle proporcional ao erro predito. Assim, substituindo \mathbf{S} por \mathbf{S}^\dagger na Equação (2.9), tem-se que:

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{S}^\dagger \hat{\mathbf{e}}(k) \quad (2.13)$$

$$= [(\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T] \hat{\mathbf{e}}(k) \quad (2.14)$$

2ª Solução: Definir uma trajetória que leve suavemente ao valor desejado.

Definindo uma trajetória de referência suave dada por

$$y^{ref}(k) = y_{medido}(k) \quad (2.15)$$

$$y^{ref}(k+v) = \alpha y^{ref}(k+v-1) + (1-\alpha) y^{des}(k+v), \quad \text{para } v = 1, 2, \dots, P \quad (2.16)$$

Além disso, na prática, é indicado que sejam incluídos na função objetivo (2.12) um fator de ponderação nas variáveis controladas e um termo adicional com ponderação das variáveis manipuladas. Nesse último caso os fatores de ponderação são chamados de fatores de supressão de movimento e, como o próprio nome indica, tem como objetivo incluir restrições implícitas para as ações de controle (PRETT e GILLETTE, 1980). Dessa forma, utilizando a trajetória de referência $\mathbf{y}^{ref}(k)$ teremos a seguinte função objetivo:

$$\min_{\Delta \mathbf{u}(k)} \left\{ \left[\mathbf{y}^{ref}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) \right]^T \Gamma^T \Gamma \left[\mathbf{y}^{ref}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) \right] + \Delta \mathbf{u}^T(k) \Lambda^T \Lambda \Delta \mathbf{u}(k) \right\} \quad (2.17)$$

Em que Γ e Λ são as matrizes positivas definidas dadas por:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \gamma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \gamma_p \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_M \end{bmatrix}$$

De modo que sua solução analítica será

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \left[(\mathbf{S}^T \Gamma^T \Gamma \mathbf{S} + \Lambda^T \Lambda)^{-1} \mathbf{S}^T \Gamma^T \Gamma \right] \left[\mathbf{y}^{ref}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) - \hat{\mathbf{d}}(k) \right] \quad (2.18)$$

$$= \left[(\mathbf{S}^T \Gamma^T \Gamma \mathbf{S} + \Lambda^T \Lambda)^{-1} \mathbf{S}^T \Gamma^T \Gamma \right] \hat{\mathbf{e}}(k) \quad (2.19)$$

2.6.2 Restrições

Como dito anteriormente, o controle preditivo é capaz de lidar com restrições explícitas e estas farão parte do algoritmo na forma de equações. Na prática existem três tipos de restrições principais baseadas nas limitações de cada equipamento e que serão usadas nesse trabalho (RIBEIRO, 2012):

- no valor absoluto da ação de controle;
- na variação da ação de controle num intervalo de amostragem;
- no valor absoluto da variável controlada.

Dessa forma, a função objetivo do controle preditivo linear multivariável com restrições será dada por:

$$\arg \min_{\Delta \mathbf{u}(k)} \left\{ \left[\mathbf{y}^{ref}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) \right]^T \Gamma^T \Gamma \left[\mathbf{y}^{ref}(k) - \hat{\mathbf{y}}^*(k) \right] + \Delta \mathbf{u}^T(k) \Lambda^T \Lambda \Delta \mathbf{u}(k) \right\} \quad (2.20)$$

Sujeito a:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{y}}(k) = \hat{\mathbf{y}}^*(k) + \mathbf{S}\Delta\mathbf{u}(k) + \hat{\mathbf{d}}(k) \\ \mathbf{u}^{min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}^{max} \\ \Delta\mathbf{u}^{min} \leq \Delta\mathbf{u}(k) \leq \Delta\mathbf{u}^{max} \\ \mathbf{y}^{min}(k) \leq \hat{\mathbf{y}}(k) \leq \mathbf{y}^{max} \end{cases} \quad (2.21)$$

Capítulo 3

Descrição do Processo

3.1 Planta Estudada

Para representar o processo real de compressão do gás, foi utilizada uma planta virtual através do programa EMSO 10.6 (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*). Assim, como a planta foi tratada como o processo real, o modelo e equacionamento do mesmo foi dado como desconhecido. Vale ressaltar que os controles PID's presentes na planta foram sintonizados no estudo realizado por CARAPETO (2016).

Com o objetivo de facilitar sua apresentação e visualização, a planta que descreve o processo de compressão do gás utilizada foi dividida em cinco etapas. Cada uma dessas etapas são detalhadas a seguir:

1. Primeira etapa (Figura 3.1): etapa inicial na qual ocorre a entrada do gás na planta e a onde está localizada a primeira válvula *flare* para liberação de gás no caso de um aumento de pressão não planejado.

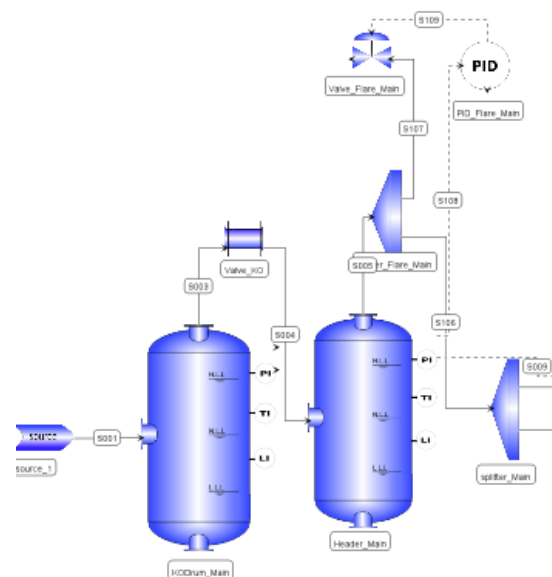


Figura 3.1: Primeira etapa da planta.

2. Segunda etapa (Figura 3.2): etapa onde está contido o estágio principal de compressão da planta. No início dessa etapa, o processo é dividido em dois trens a fim de promover uma maior robustez a planta, visto que, dessa forma, problemas em uma das duas partes não impede o funcionamento do processo como um todo.

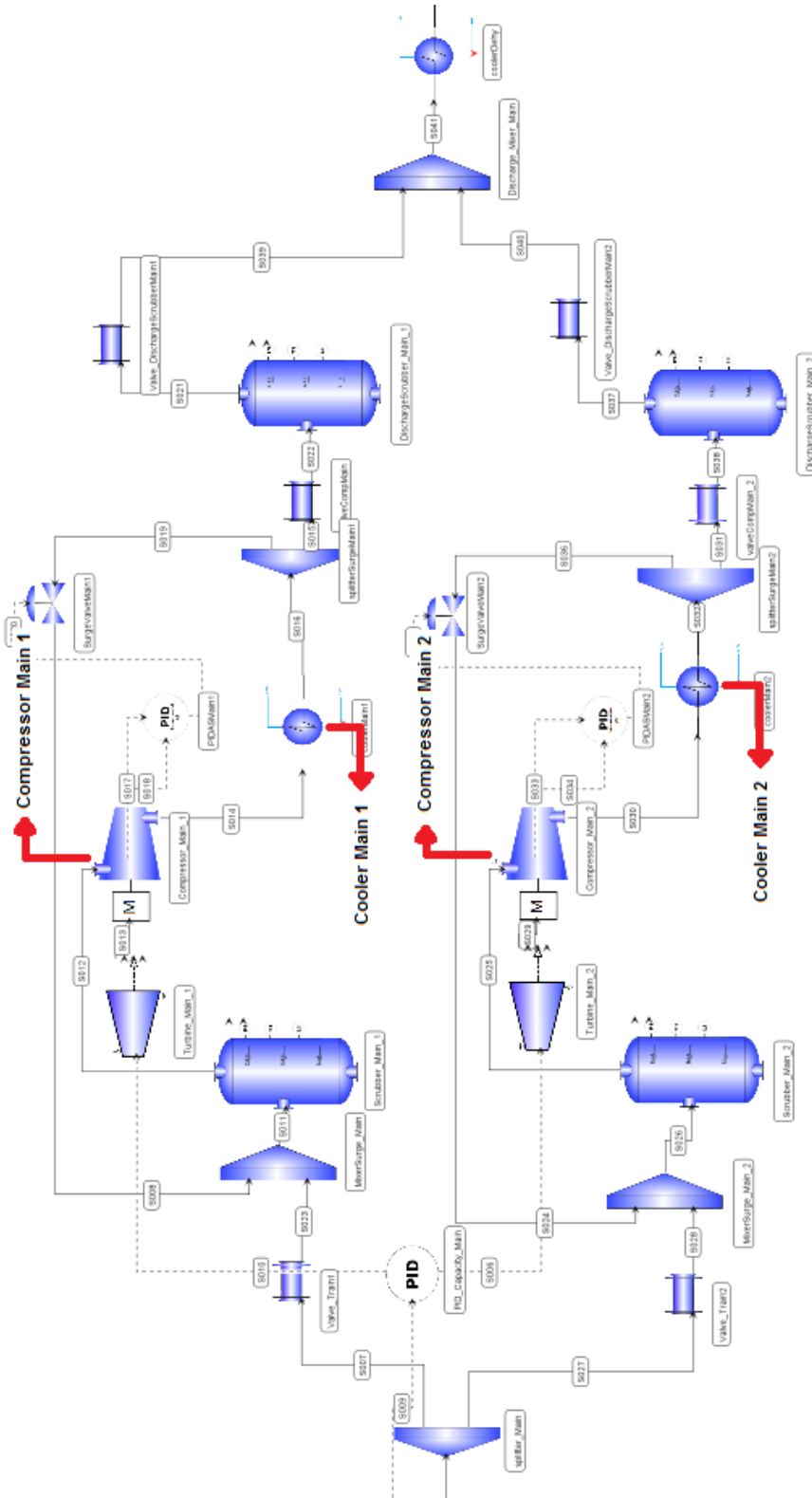


Figura 3.2: Segunda etapa da planta.

3. Terceira etapa (Figura 3.3): é a etapa entre os estágio principal e o estágio de compressão para exportação. Nela ocorrem a desidratação e remoção de CO_2 do gás. Além disso, temos mais uma válvula *flare* para casos de aumento de pressão emergenciais.

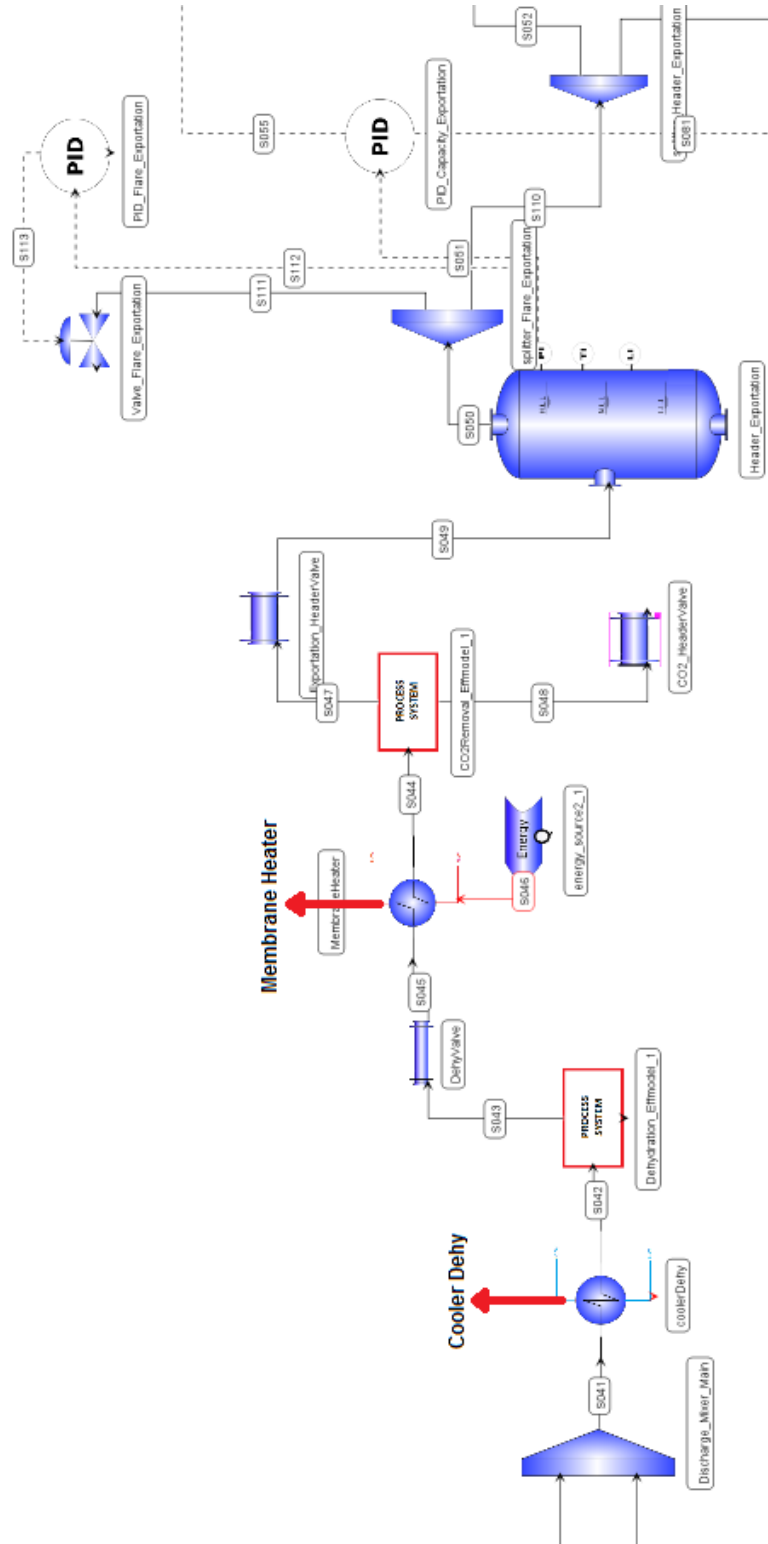


Figura 3.3: Terceira etapa da planta.

4. Quarta etapa (Figura 3.4): etapa na qual acontece o estágio de compressão para exportação, composto por dois trens em paralelo, cada qual com dois compressores em série.

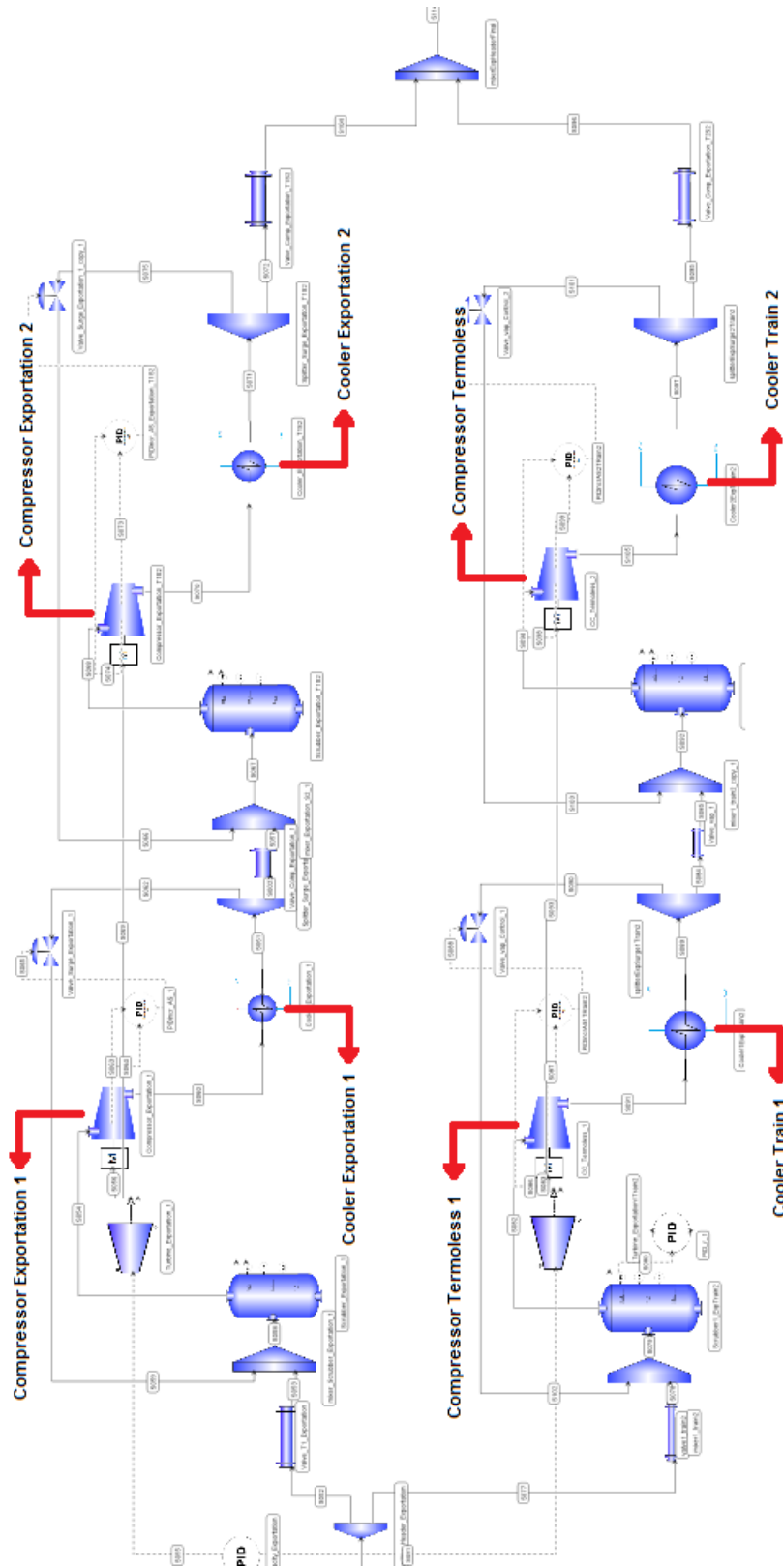


Figura 3.4: Quarta etapa da planta.

5. Quinta etapa (Figura 3.5): a etapa final apresenta a junção das duas partes da etapa anterior e a liberação do produto final pela válvula.

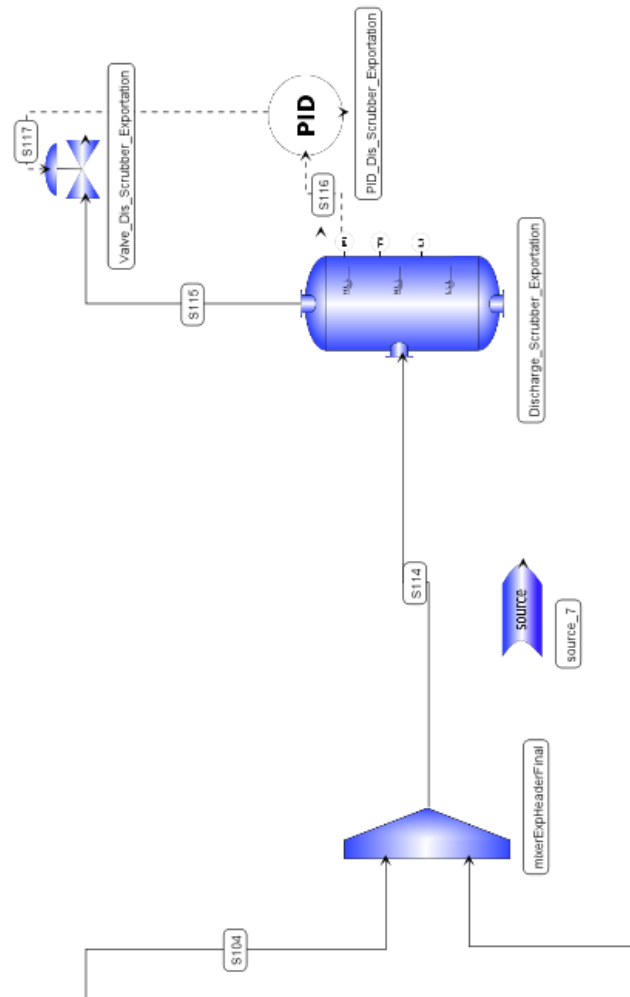


Figura 3.5: Quinta e última etapa da planta.

3.2 Variáveis Utilizadas

Como foi apresentado no capítulo anterior, o processo de remoção de CO_2 é realizado através de membranas de fibra oca e, sua estabilidade pode ser comprometida por grandes variações de temperatura, pois a composição do gás é alterada. Portanto, foi feita a escolha da temperatura que entrará nesse processo como variável controlada, visto que é necessário que ela seja mantida em uma temperatura determinada, sem muitas oscilações e, também capaz de rejeitar distúrbios.

A potência dos compressores pode ser associada diretamente ao consumo de energia da planta. Assim, sabendo que um gasto excessivo de energia pode ser determinante para a lucratividade de um processo produtivo, é de extrema importância o controle e monitoramento da potência utilizada.

Também é importante ter em mente quanto da potência exigida por cada compressor é de fato aproveitada no processo e, quanto dela é dissipada em forma de calor. Assim, a eficiência mecânica (η) apresenta essa relação como o percentual da potência total (P_T) que será a potência efetiva (P_E), ou seja,

$$P_E = P_T \eta \quad (3.1)$$

Portanto, com o intuito de observar o comportamento das variáveis frente a alterações na eficiência dos compressores, estas serão consideradas como distúrbios não-medidos.

Além disso, como o processo de compressão é precedido pela separação das três fases e ainda fica sujeito a reflexos das golfadas que ocorrem no início da extração do petróleo, é esperado que ocorram variações inesperadas na vazão de entrada da planta. Por isso, a vazão molar de entrada do processo será considerada como um distúrbio medido.

Por fim, como a escolha da temperatura está atrelada aos graus de liberdade do sistema e, como ela afeta todas as demais variáveis, todos os trocadores de calor da planta, tanto os que resfriam o gás recém comprimido quanto os que antecedem a desidratação e a remoção de CO_2 , serão utilizadas como variáveis manipuladas.

Tento em vista as considerações realizadas acima, as subseções a seguir irão apresentar as variáveis utilizadas esquematizadas na Figura 3.6. Por conveniência, elas serão tratadas com nomes similares aos definidos na planta virtual que será utilizada. Após listar todas as variáveis, a Tabela 3.1 apresentará os seus valores iniciais no estado estacionário.

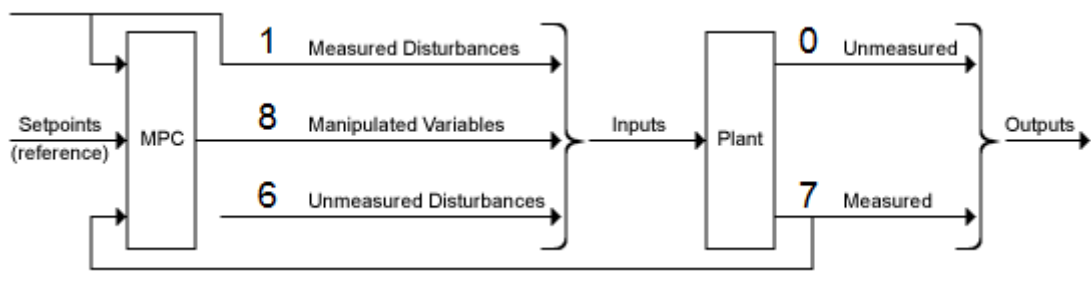


Figura 3.6: Relação de todas as variáveis selecionadas de acordo com o tipo.

3.2.1 Variáveis Controladas

1. Temperatura do *Membrane Heater*: temperatura de saída do aquecedor antes da etapa de remoção de CO_2 .
2. Potência dos compressores:
 - *Compressor Main 1 e Main 2*: compressores do estágio principal de compressão da planta.

- *Compressor Exportation 1 e Termoless 1*: primeiros compressores dos dois trens do estágio de compressão para exportação.
- *Compressor Exportation 2 e Termoless 2*: segundos compressores dos dois trens do estágio de compressão para exportação.

3.2.2 Variáveis Manipuladas

1. Potência dos trocadores de calor:

- *Cooler Main 1 e Main 2*: utilizados no estágio principal para resfriar o gás após a compressão.
- *Cooler Dehy*: resfriador utilizado antes da desidratação.
- *Membrane Heater*: aquecedor utilizado antes da remoção de CO_2 .
- *Cooler Exportation 1 e Train 1*: utilizados na primeira parte dos dois trens do estágio de compressão para exportação para resfriar o gás após a compressão.
- *Cooler Exportation 2 e Train 2*: utilizados na segunda parte dos dois trens do estágio de compressão para exportação para resfriar o gás após a compressão.

3.2.3 Distúrbio medido

- #### 1. Vazão da *Source 1*: vazão molar de entrada do processo

3.2.4 Distúrbios não medidos

1. Eficiência Mecânica dos compressores:

- *Compressor Main 1 e Main 2*
- *Compressor Exportation 1 e Termoless 1*
- *Compressor Exportation 2 e Termoless 2*

Tabela 3.1: Valores das variáveis no estado estacionário (EE).

Tipo de Variável	Variável	Valor no EE
Controladas	Temperatura no Membrane Heater	313,8 <i>K</i>
	Potência do Compressor Main 1	8076 <i>kW</i>
	Potência do Compressor Main 2	8076 <i>kW</i>
	Potência do Compressor Exportation 1	1925 <i>kW</i>
	Potência do Compressor Exportation 2	2362 <i>kW</i>
	Potência do Compressor Termoless 1	1925 <i>kW</i>
	Potência do Compressor Termoless 2	2362 <i>kW</i>
Manipuladas	Potência do Cooler Main 1	9662,29 <i>kW</i>
	Potência do Cooler Main 2	9662,29 <i>kW</i>
	Potência do Cooler Dehy	1641,28 <i>kW</i>
	Potência do Membrane Heater	1599,42 <i>kW</i>
	Potência do Cooler Exportation 1	2837,38 <i>kW</i>
	Potência do Cooler Exportation 2	2727,56 <i>kW</i>
	Potência do Cooler Train 1	2837,38 <i>kW</i>
	Potência do Cooler Train 2	2727,56 <i>kW</i>
Distúrbios	Vazão molar de entrada	10213,6 <i>kmol/h</i>
	Eficiência do Compressor Main 1	99%
	Eficiência do Compressor Main 2	99%
	Eficiência do Compressor Exportation 1	99%
	Eficiência do Compressor Exportation 2	99%
	Eficiência do Compressor Termoless 1	99%
	Eficiência do Compressor Termoless 2	99%

3.3 Estruturação do Sistema

Após realizar todas as identificações, as quais serão apresentadas detalhadamente no Capítulo seguinte, e obter as funções de transferências que relacionam todas as entradas do sistema com todas as saídas, foi possível estruturar a planta linear em conjunto com controle no Simulink-MATLAB 2015b através do seu *toolbox* próprio de controle preditivo.

O exemplo na Figura 3.7 mostra como o sinal de saída em variável desvio de uma das variáveis controladas foi construído. Cada uma das funções de transferência representa a relação de uma variável manipulada ou distúrbio com a variável controlada em questão, de modo que a junção de todas as saídas dos blocos determina o sinal final da variável controlada.

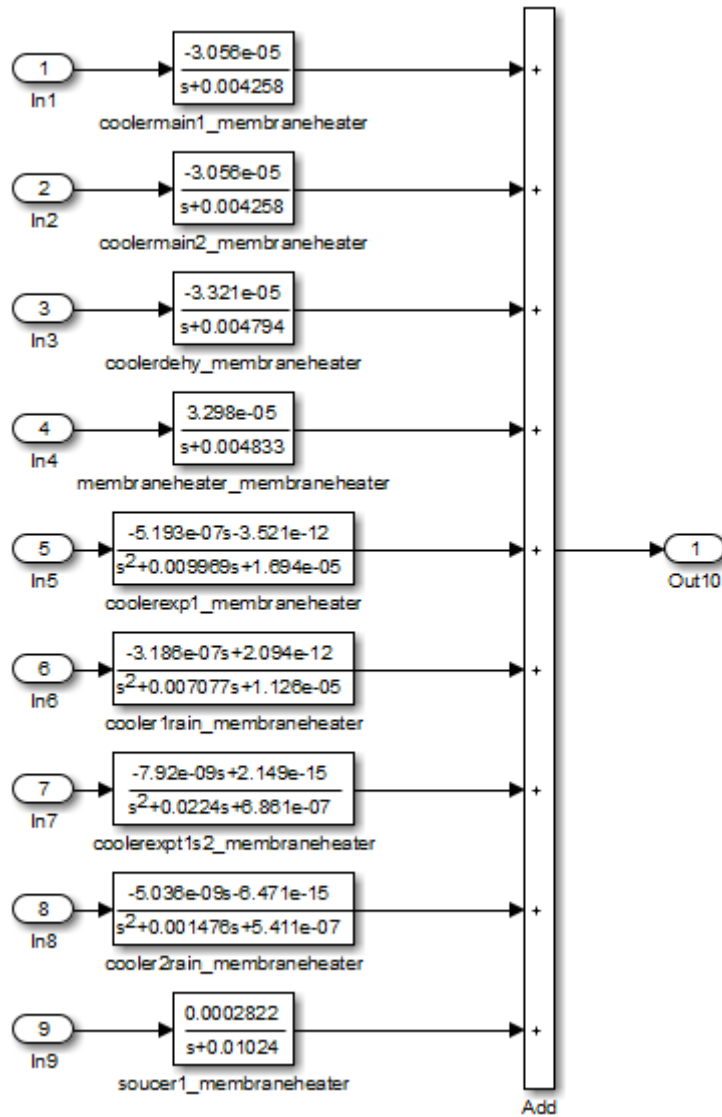


Figura 3.7: Estrutura de montagem do sinal da temperatura do *Membrane Heater* a partir do sinal de todas as variáveis manipuladas e distúrbios.

A Figura 3.8 apresenta o sistema completo já montado. No bloco maior se encontram todas as funções de transferências dispostas como foi mostrado na Figura 3.7. Pode-se notar que nesse bloco há entradas para todas as variáveis manipuladas e distúrbios, e saídas para todas as variáveis controladas.

No bloco do controle preditivo existem uma saída para todas as variáveis manipuladas e três entradas: uma para os sinais das controladas, uma para suas referências e uma última para o distúrbio medido, visto que este é considerado pelo MPC. Os distúrbios não medidos se encontram a esquerda da planta e não passam pelo controle.

Com o sistema completamente estruturado é possível iniciar a sintonia do controlador e a simulação de cenários para observar seu comportamento em conjunto com a planta.

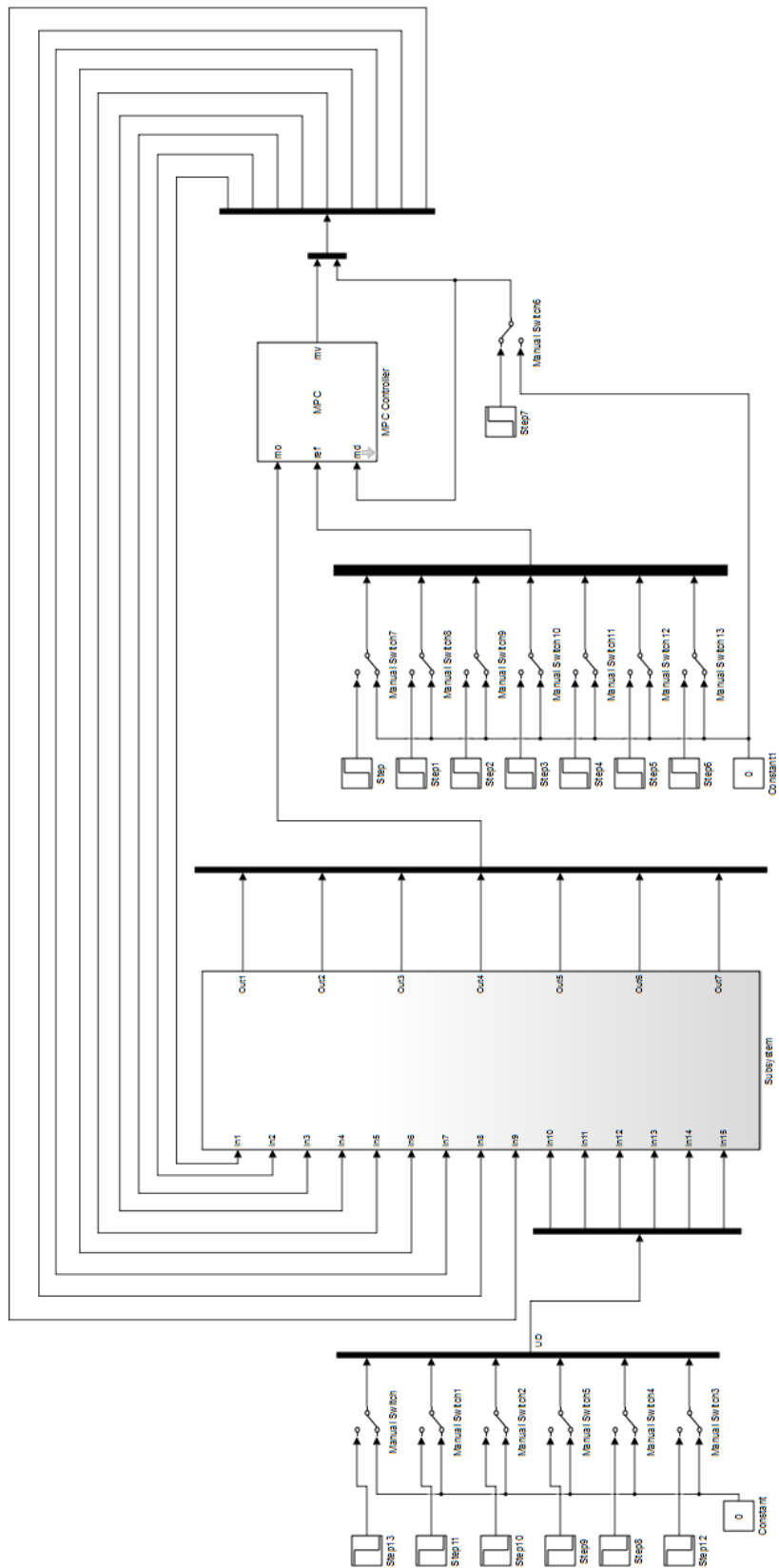


Figura 3.8: Composição completa do sistema estruturado através do Simulink para simulação.

Capítulo 4

Identificação, Resultados e Discussões

4.1 Simulação

A necessidade de uma identificação prévia da planta virtual se faz necessária pelo fato da planta desenvolvida no Simulink ser uma representação linear da mesma. O método escolhido para a identificação foi a aplicação de uma entrada constituída por dois degraus seguidos, com amplitudes absolutas em relação ao estado estacionário iguais e sinais opostos. Esse tipo de entrada irá evidenciar o comportamento não-linear do sistema e, dessa forma, a função de transferência que representará o conjunto entrada-saída será uma aproximação linear para qualquer amplitude de perturbação do tipo degrau que venha a ocorrer durante o processo.

As identificações realizadas tem como objetivo relacionar os conjuntos entrada-saída, compostos por uma das variáveis manipuladas ou pelo distúrbio medido como entrada e, por uma das variáveis controladas como saída. Além dessas identificações, cada um dos seis compressores terá uma função de transferência que relacionará a sua potência com sua eficiência mecânica, o distúrbio não medido. A eficiência não afeta diretamente mais nenhuma variável utilizada e, por isso, todas as outras funções de transferências ligadas à eficiência serão nulas.

Com oito variáveis manipuladas, um distúrbio medido e seis distúrbios não medidos, haverão nove entradas no total. As sete variáveis controladas serão as saídas. Assim, haverá um total de cento e cinco funções de transferência, nas quais trinta e seis serão as nulas citadas anteriormente. Portanto, desconsiderando estas últimas, haverá um total sessenta e nove funções de transferências a serem identificadas.

Com isso, foram realizadas simulações no EMSO, nas quais foram aplicadas perturbações do tipo degrau com as características descritas acima em cada uma das entradas por vez e mantendo as restantes em seus valores estacionários constantes. A fim de realizar uma boa identificação e obter funções de transferência adequadas para utilizar em conjunto com o *toolbox* do MPC, todos os dados foram convertidos de valor absoluto para

variável desvio.

Assim, os dados convertidos de cada par de entrada e saída obtidos foram utilizados para a identificação através do *System Identification Toolbox* do MATLAB. Como será apresentado a seguir, foram buscadas funções de transferência contínuas, de menor ordem possível e estáveis, ou seja, com a parte real menor que zero.

Vale ressaltar que, como a interface de comunicação entre o EMSO e o MATLAB foi desenvolvida para uma versão de 32 bits deste último, todo o processo de comunicação EMSO-MATLAB para a identificação foi realizado em uma máquina virtual (VirtualBox 5.0.24) com o sistema operacional Windows XP (Microsoft), o qual possibilita a instalação e utilização do MATLAB 2012b de 32 bits.

4.2 Resultados

Os gráficos, em conjunto com as funções de transferência obtidas, são mostrados nas subseções seguintes, divididas de acordo com a variável manipulada ou distúrbio no qual o degrau foi aplicado.

4.2.1 Degrau na potência do *Cooler Main 1*

A Figura 4.1 apresenta os degraus aplicados na potência do *Cooler Main 1* para a realização da identificação.

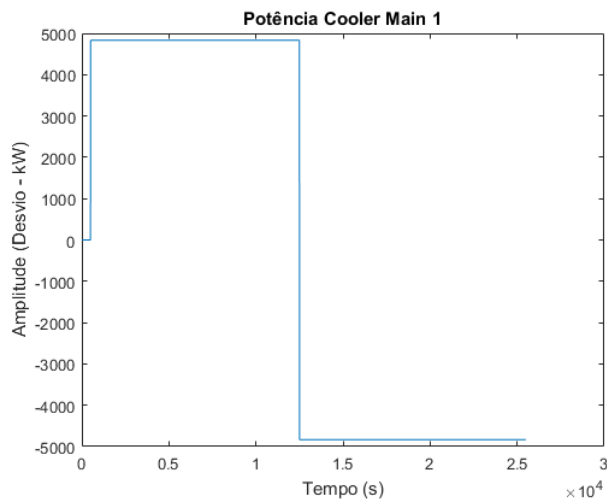


Figura 4.1: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Main 1* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.2, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,1}(s) = \frac{-0,0072}{234,877s + 1}$$

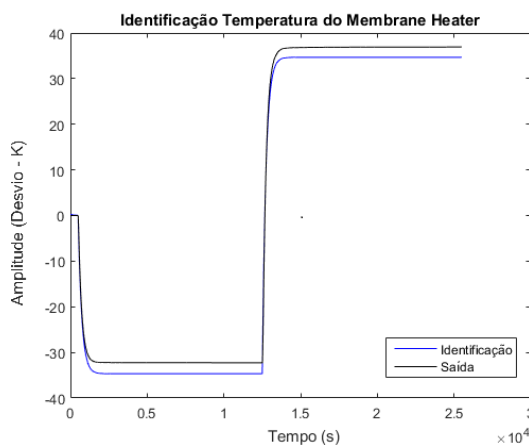


Figura 4.2: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Main 1*.

Potência do Compressor Main 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.3, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,2}(s) = \frac{-0,0504}{203,8s + 1}$$

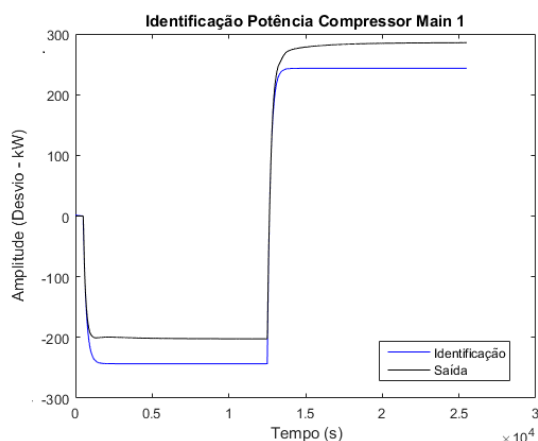


Figura 4.3: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 1*.

Potência do Compressor Main 2

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.4, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,3}(s) = \frac{-0,0415}{201.317s + 1}$$

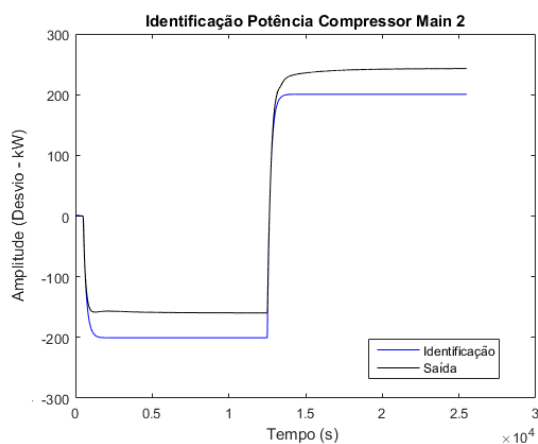


Figura 4.4: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 1*.

Potência do Compressor Exportation 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.5, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,4}(s) = \frac{-0,0672}{228,622s + 1}$$

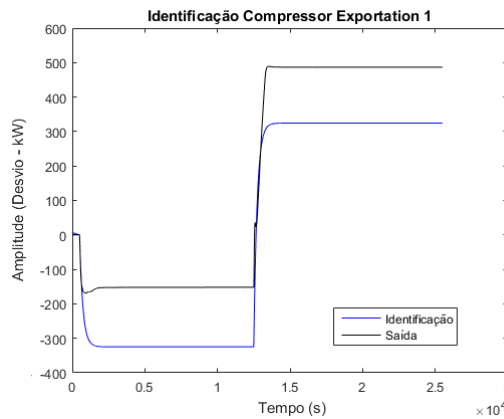


Figura 4.5: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 1*.

Potência do Compressor Termoless 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 1* é mostrada na Figura 4.6, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,5}(s) = \frac{-0,0672}{228,622s + 1}$$

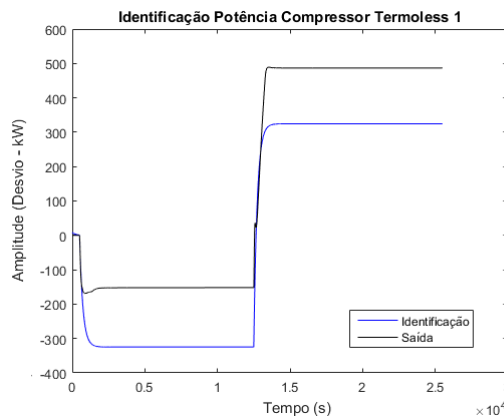


Figura 4.6: Identificação da potência do *Compressor Termoless 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 1*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.7, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,6}(s) = \frac{-0,0969}{211,374s + 1}$$

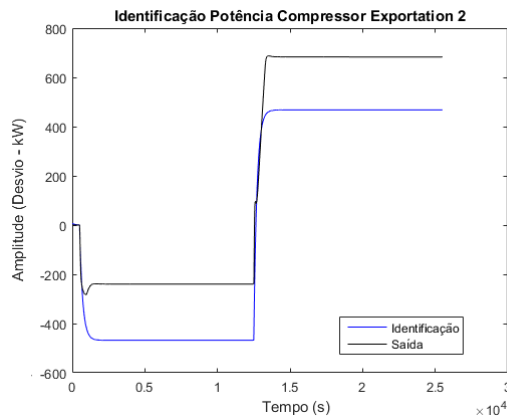


Figura 4.7: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 1*.

Potência do *Compressor Termoless 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 2* é mostrada na Figura 4.8, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{1,7}(s) = \frac{-0,0969}{211,374s + 1}$$

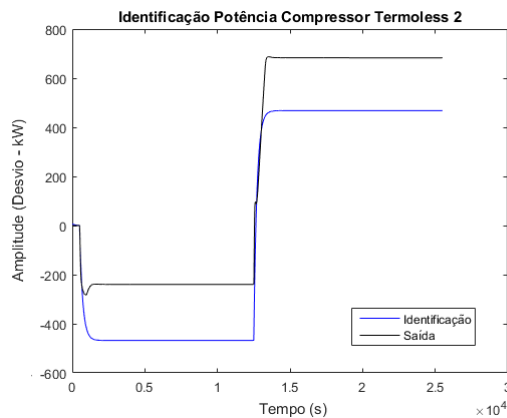


Figura 4.8: Identificação da potência do *Compressor Termoless 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 1*.

4.2.2 Degrau na potência do *Cooler Main 2*

A Figura 4.9 apresenta os degraus aplicados na potência do *Cooler Main 2* para a realização da identificação.

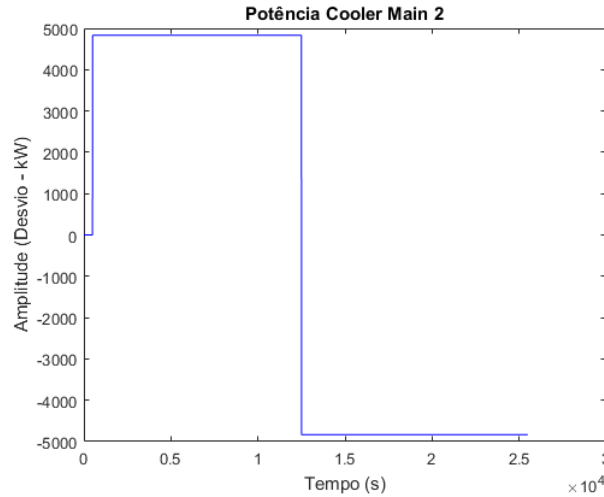


Figura 4.9: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Main 2* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.10, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,1}(s) = \frac{-0,0072}{234,876s + 1}$$

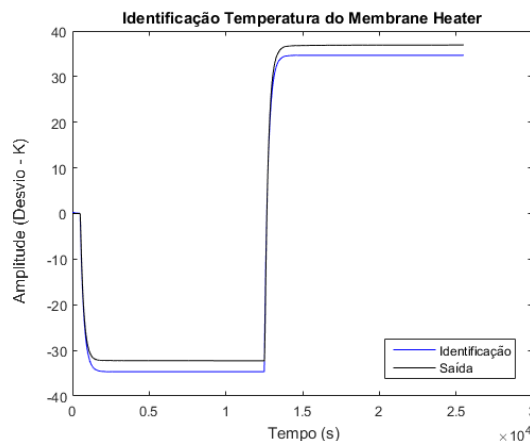


Figura 4.10: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Main 2*.

Potência do *Compressor Main 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.11, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,2}(s) = \frac{-0,0415}{201,317s + 1}$$

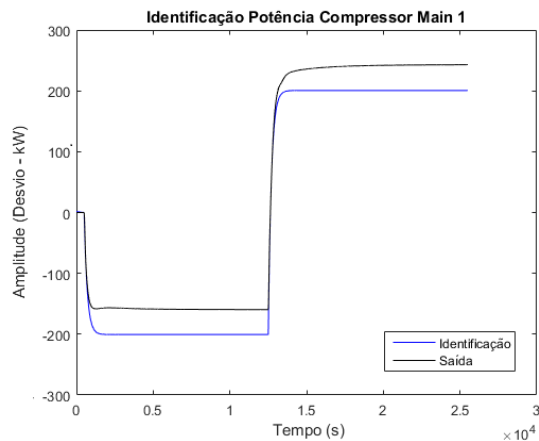


Figura 4.11: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 2*.

Potência do *Compressor Main 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.12, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,3}(s) = \frac{-0,0504}{203,8s + 1}$$

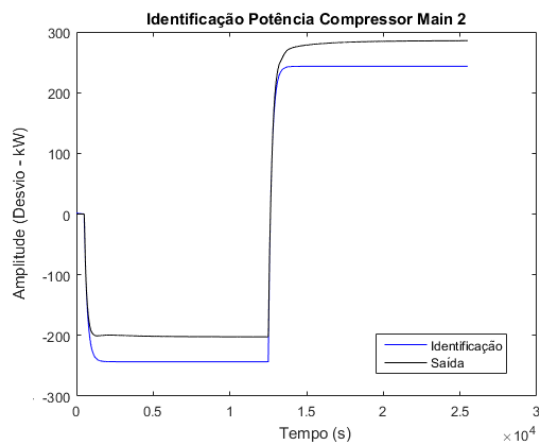


Figura 4.12: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 2*.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.13, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,4}(s) = \frac{-0,0672}{228,622s + 1}$$

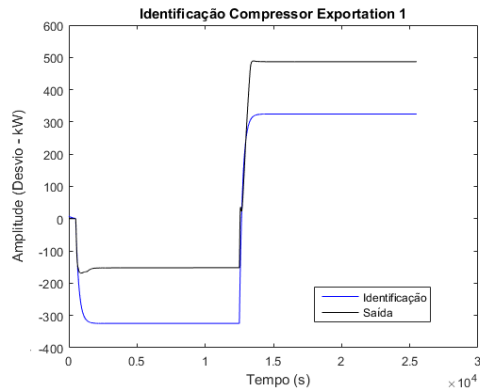


Figura 4.13: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 2*.

Potência do *Compressor Termoless 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 1* é mostrada na Figura 4.14, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,5}(s) = \frac{-0,0672}{228,622s + 1}$$

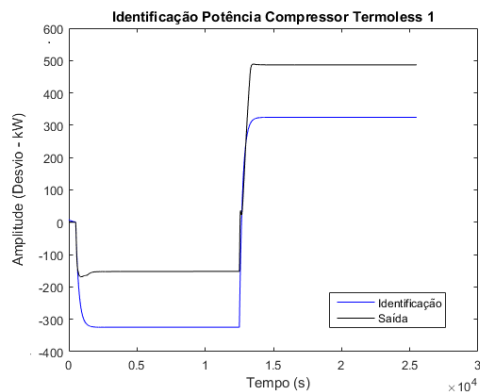


Figura 4.14: Identificação da potência do *Compressor Termoless 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 2*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.15, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,6}(s) = \frac{-0,0969}{211,374s + 1}$$

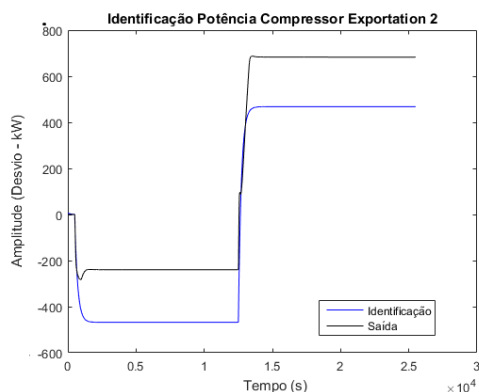


Figura 4.15: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 2*.

Potência do *Compressor Termoless 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 2* é mostrada na Figura 4.16, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{2,7}(s) = \frac{-0,0969}{211,374s + 1}$$

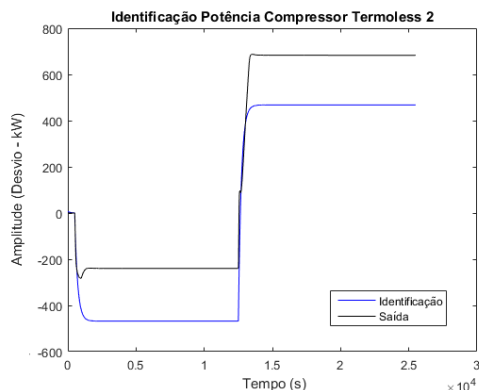


Figura 4.16: Identificação da potência do *Compressor Termoless 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Main 2*.

4.2.3 Degrau na potência do *Cooler Dehy*

A Figura 4.17 apresenta os degraus aplicados na potência do *Cooler Dehy* para a realização da identificação.

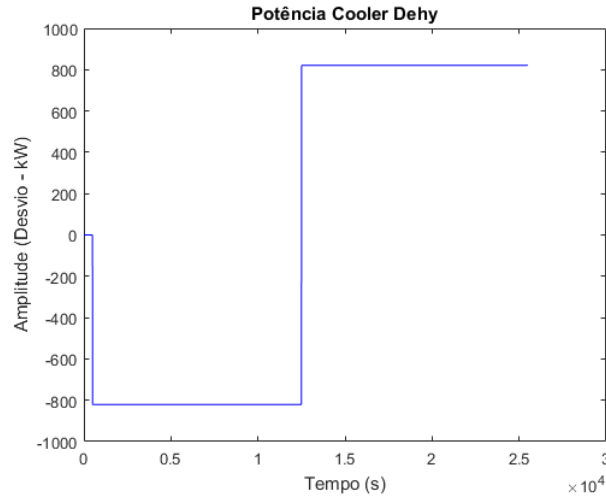


Figura 4.17: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Dehy* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.18, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,1}(s) = \frac{-0,0069}{208,59s + 1}$$

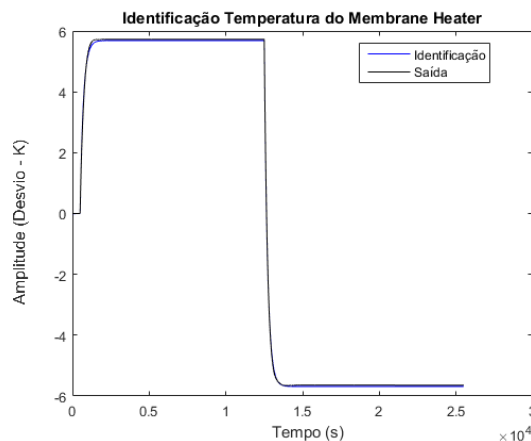


Figura 4.18: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Dehy*.

Potência do Compressor Main 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.19, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,2}(s) = \frac{-0,0001414s - 4,627 \times 10^{-7}}{s^2 + 0,007257s + 1,9 \times 10^{-5}}$$

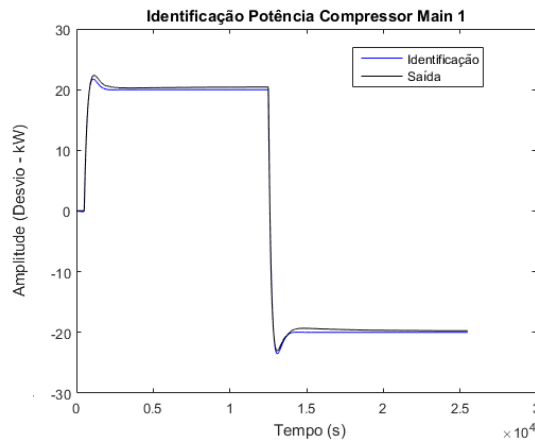


Figura 4.19: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Dehy*.

Potência do Compressor Main 2

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.20, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,3}(s) = \frac{-0,0001414s - 4,627 \times 10^{-7}}{s^2 + 0,007257s + 1,9 \times 10^{-5}}$$

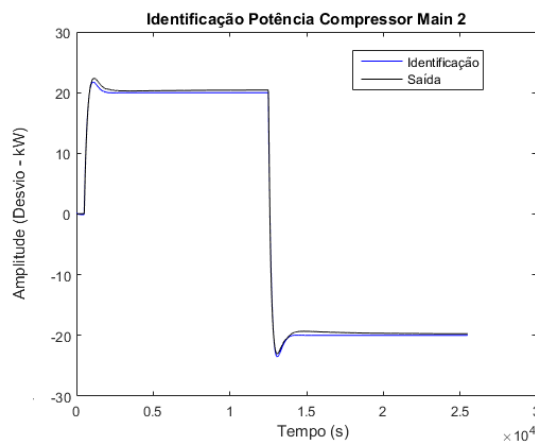


Figura 4.20: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Dehy*.

Potência do Compressor Exportation 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.21, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,4}(s) = \frac{-0,0747}{385.464s + 1}$$

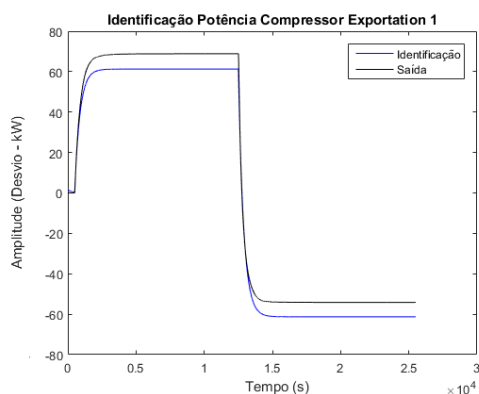


Figura 4.21: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Dehy*.

Potência do Compressor Termoleess 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleess 1* é mostrada na Figura 4.22, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,5}(s) = \frac{-0,0747}{385.464s + 1}$$

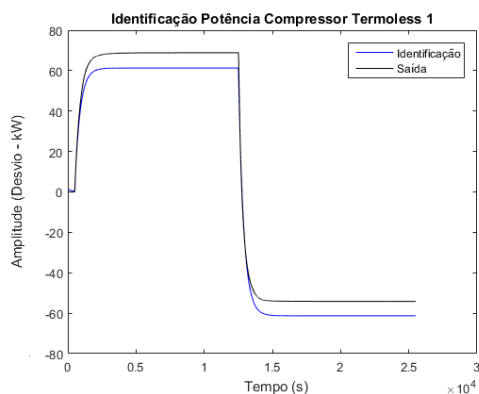


Figura 4.22: Identificação da potência do *Compressor Termoleess 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Dehy*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada temperatura da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.23, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,6}(s) = \frac{-0,1018}{348,29s + 1}$$

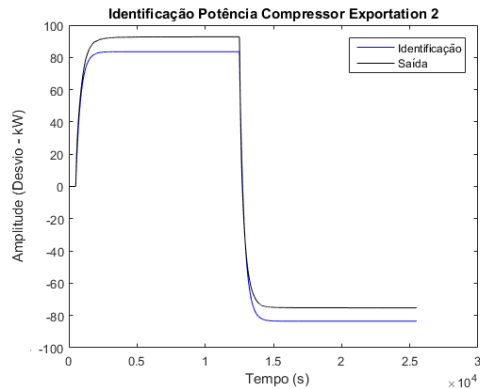


Figura 4.23: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Dehy*.

Potência do *Compressor Termoless 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 2* é mostrada na Figura 4.24, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{3,7}(s) = \frac{-0,1018}{348,29s + 1}$$

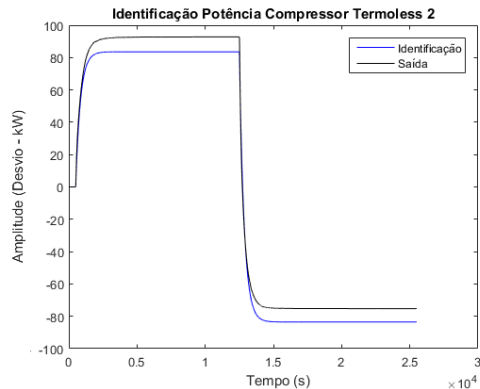


Figura 4.24: Identificação da potência do *Compressor Termoless 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Dehy*.

4.2.4 Degrau na potência do *Membrane Heater*

A Figura 4.25 apresenta os degraus aplicados na potência do *Membrane Heater* para a realização da identificação.

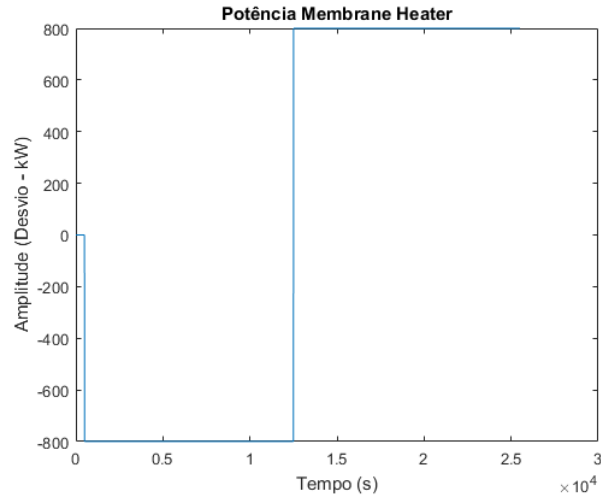


Figura 4.25: Sequência de degraus aplicada na potência do *Membrane Heater* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.26, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,1}(s) = \frac{0,0068}{206,916s + 1}$$

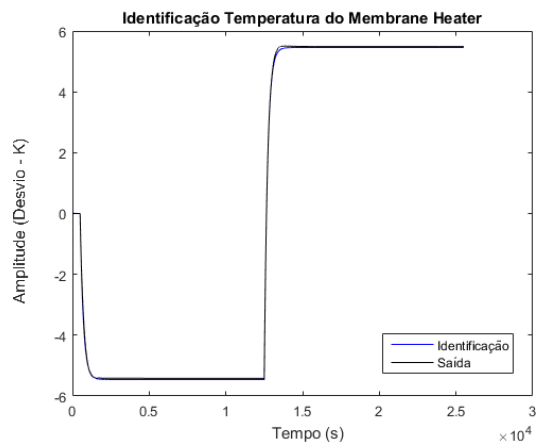


Figura 4.26: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Membrane Heater*.

Potência do Compressor Main 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.27, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,2}(s) = \frac{9,982 \times 10^{-5}s + 1,306 \times 10^{-7}}{s^2 + 0,006877s + 1,129 \times 10^{-5}}$$

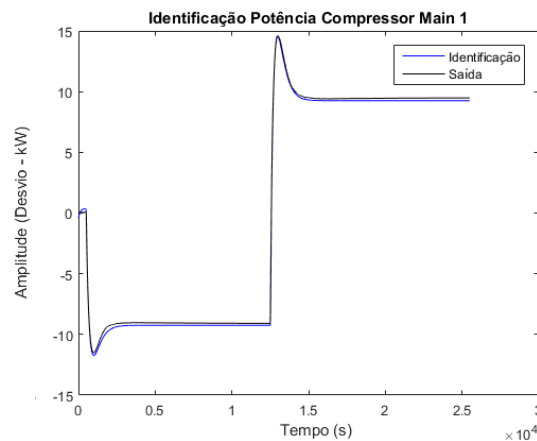


Figura 4.27: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Membrane Heater*.

Potência do Compressor Main 2

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.28, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,3}(s) = \frac{9,982 \times 10^{-5}s + 1,306 \times 10^{-7}}{s^2 + 0,006877s + 1,129 \times 10^{-5}}$$

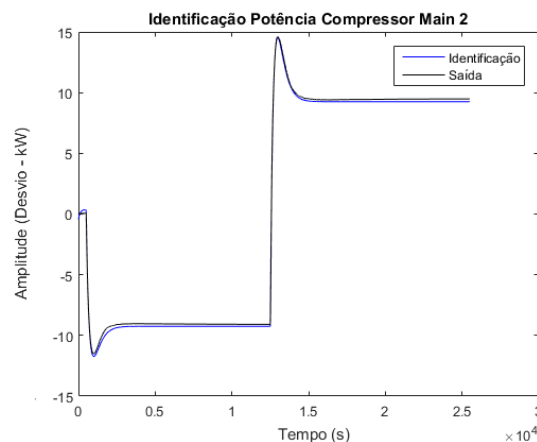


Figura 4.28: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Membrane Heater*.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.29, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,4}(s) = \frac{0,0738}{346,9s + 1}$$

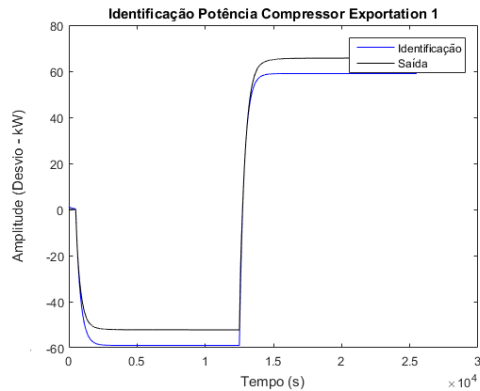


Figura 4.29: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Membrane Heater*.

Potência do *Compressor Termoleess 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleess 1* é mostrada na Figura 4.30, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,5}(s) = \frac{0,0738}{346,9s + 1}$$

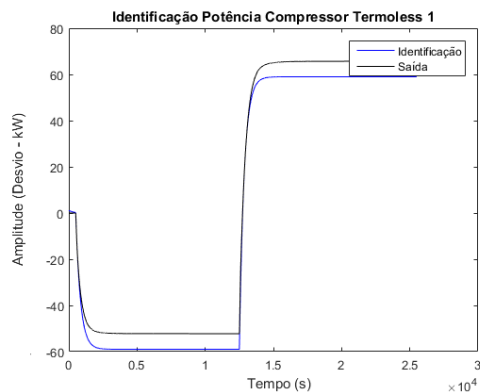


Figura 4.30: Identificação da potência do *Compressor Termoleess 1* para a sequência de degraus na potência do *Membrane Heater*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.31, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,6}(s) = \frac{-0,1005}{316,448s + 1}$$

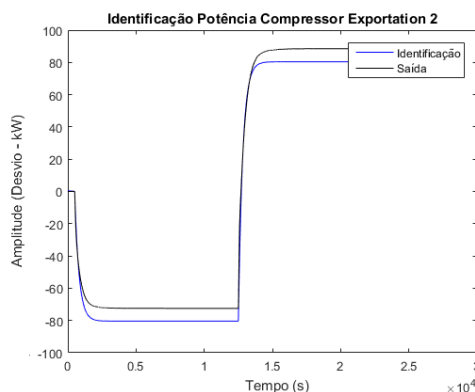


Figura 4.31: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Membrane Heater*.

Potência do *Compressor Termoleess 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleess 2* é mostrada na Figura 4.32, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{4,7}(s) = \frac{-0,1005}{316,448s + 1}$$

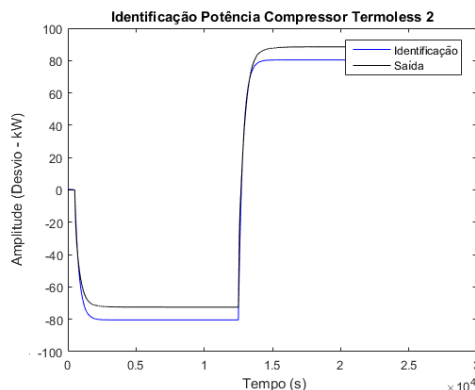


Figura 4.32: Identificação da potência do *Compressor Termoleess 2* para a sequência de degraus na potência do *Membrane Heater*.

4.2.5 Degrau na potência do *Cooler Exportation 1*

A Figura 4.33 apresenta os degraus aplicados na potência do *Cooler Exportation 1* para a realização da identificação.

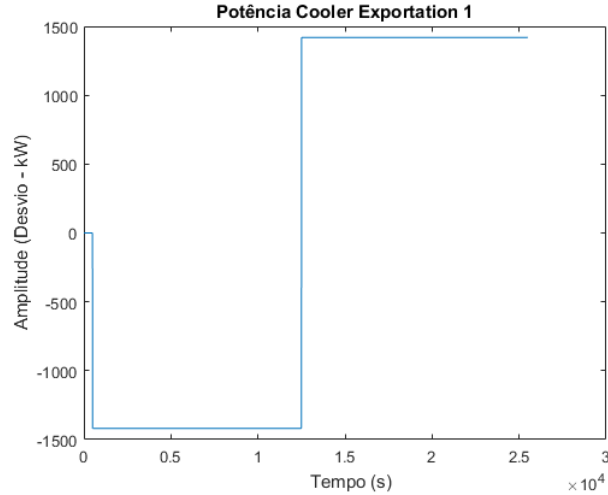


Figura 4.33: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Exportation 1* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.34, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,1}(s) = \frac{-5,193 \times 10^{-7}s - 3,521 \times 10^{-12}}{s^2 + 0,009969s + 1,694 \times 10^{-5}}$$

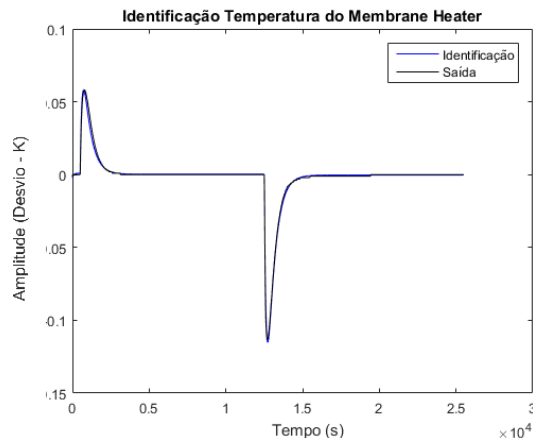


Figura 4.34: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Exportation 1*.

Potência do Compressor Main 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.35, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,2}(s) = \frac{-1,596 \times 10^{-5}s - 1,49 \times 10^{-10}}{s^2 + 0,00898s + 1,541 \times 10^{-5}}$$

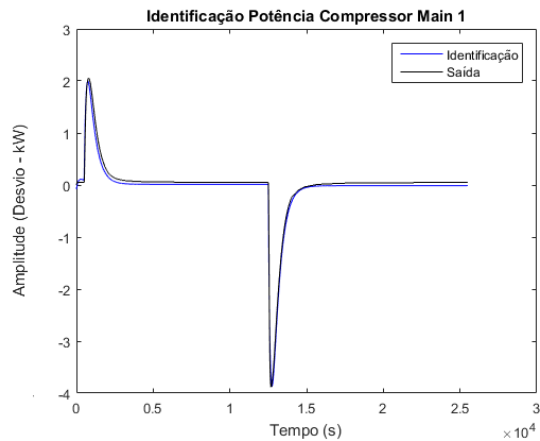


Figura 4.35: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 1*.

Potência do Compressor Main 2

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.36, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,2}(s) = \frac{-1,596 \times 10^{-5}s - 1,49 \times 10^{-10}}{s^2 + 0,00898s + 1,541 \times 10^{-5}}$$

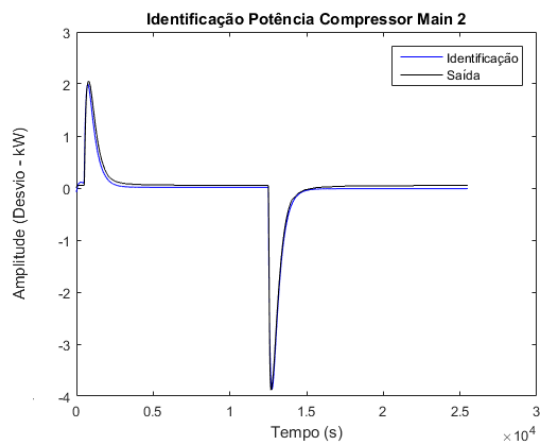


Figura 4.36: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 1*.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.37, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,4}(s) = \frac{-0,023}{347,019s + 1}$$

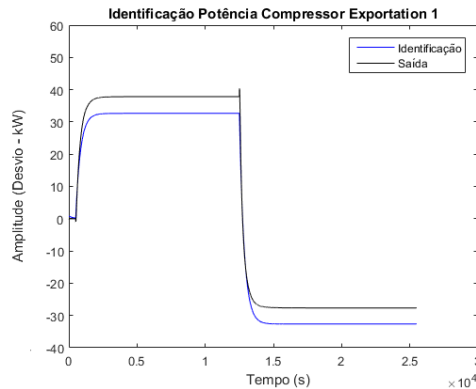


Figura 4.37: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 1*.

Potência do *Compressor Termoless 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 1* é mostrada na Figura 4.38, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,5}(s) = \frac{-0,0295}{314,238s + 1}$$

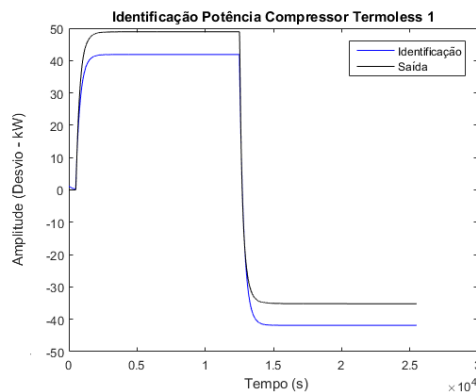


Figura 4.38: Identificação da potência do *Compressor Termoless 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 1*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.39, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,6}(s) = \frac{0,0501}{254,041s + 1}$$

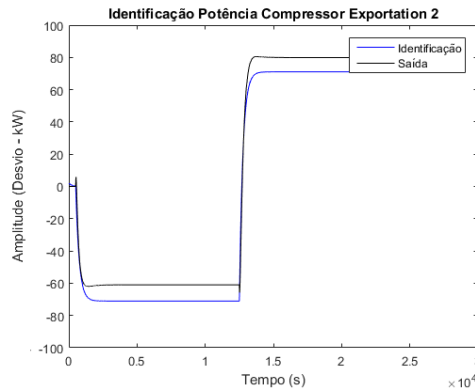


Figura 4.39: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 1*.

Potência do *Compressor Termoless 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 2* é mostrada na Figura 4.40, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{5,7}(s) = \frac{-0,0372}{308,811s + 1}$$

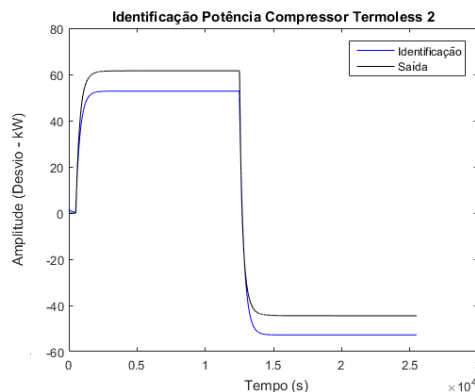


Figura 4.40: Identificação da potência do *Compressor Termoless 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 1*.

4.2.6 Degrau na potência do *Cooler Train 1*

A Figura 4.41 apresenta os degrau aplicados na potência do *Cooler Train 1* para a realização da identificação.

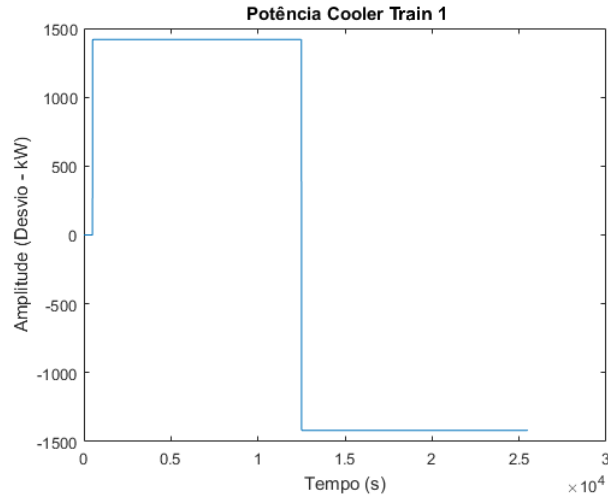


Figura 4.41: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Train 1* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.42, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,1}(s) = \frac{-3,186 \times 10^{-7}s - 2,094 \times 10^{-12}}{s^2 + 0,007077s + 1,126 \times 10^{-5}}$$

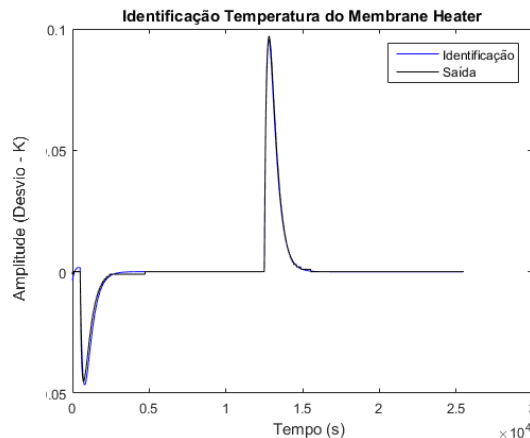


Figura 4.42: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Train 1*.

Potência do Compressor Main 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.43, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,2}(s) = \frac{-1,068 \times 10^{-5}s - 1,41 \times 10^{-11}}{s^2 + 0,00691s + 1,057 \times 10^{-5}}$$

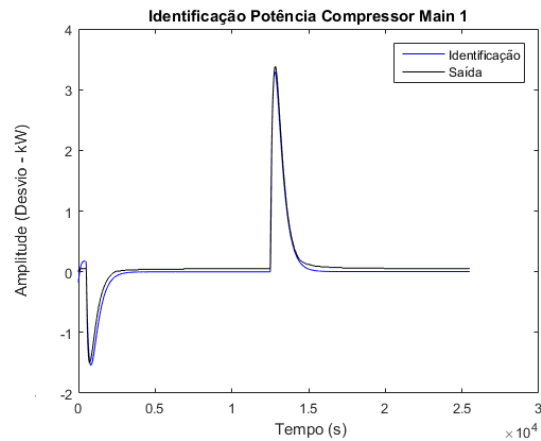


Figura 4.43: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 1*.

Potência do Compressor Main 2

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.44, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,3}(s) = \frac{-1,068 \times 10^{-5}s - 1,41 \times 10^{-11}}{s^2 + 0,00691s + 1,057 \times 10^{-5}}$$

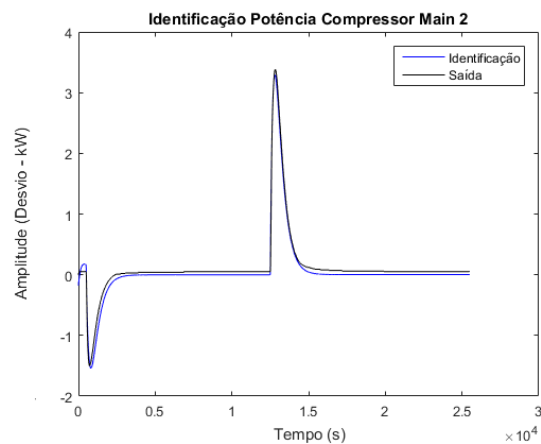


Figura 4.44: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 1*.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.45, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,4}(s) = \frac{-0,0298}{279,66s + 1}$$

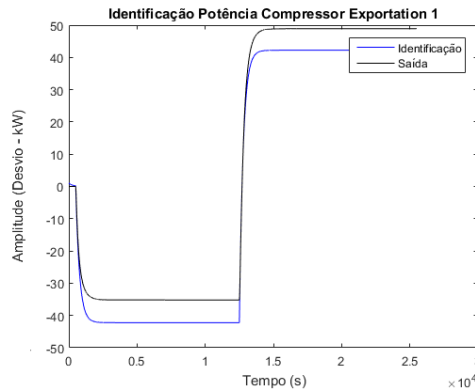


Figura 4.45: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 1*.

Potência do *Compressor Termoles 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoles 1* é mostrada na Figura 4.46, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,5}(s) = \frac{-0,0232}{309,611s + 1}$$

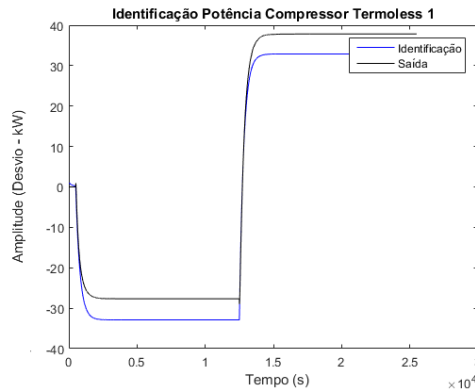


Figura 4.46: Identificação da potência do *Compressor Termoles 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 1*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.47, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,6}(s) = \frac{-0,0375}{275,261s + 1}$$

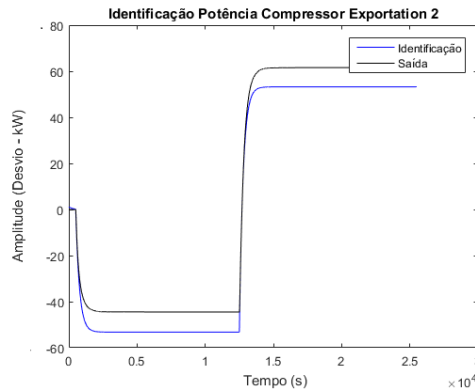


Figura 4.47: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 1*.

Potência do *Compressor Termoleess 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleess 2* é mostrada na Figura 4.48, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{6,7}(s) = \frac{0,0497}{281,707s + 1}$$

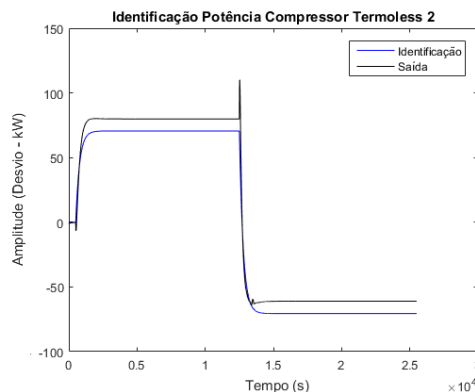


Figura 4.48: Identificação da potência do *Compressor Termoleess 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 1*.

4.2.7 Degrau na potência do *Cooler Exportation 2*

A Figura 4.49 apresenta os degraus aplicados na potência do *Cooler Exportation 2* para a realização da identificação.

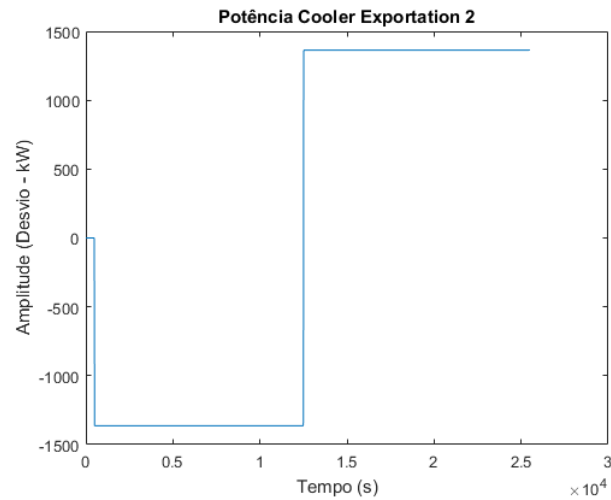


Figura 4.49: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Exportation 2* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.50, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,1}(s) = \frac{-7,92 \times 10^{-9}s - 2,149 \times 10^{-15}}{s^2 + 0,0224s + 6,861 \times 10^{-7}}$$

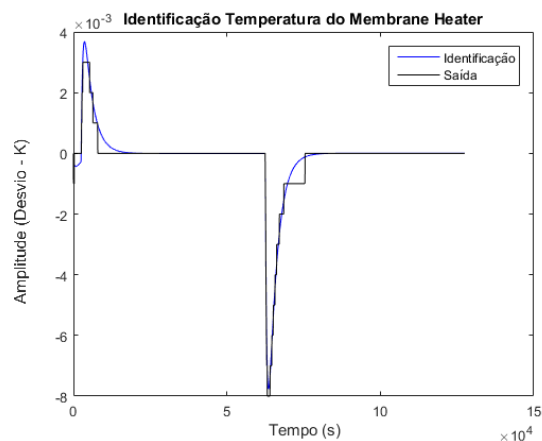


Figura 4.50: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Exportation 2*.

Potência do *Compressor Main 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.51, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,2}(s) = \frac{-1,931 \times 10^{-7}s - 2,327 \times 10^{-13}}{s^2 + 0,001818s + 6,364 \times 10^{-7}}$$

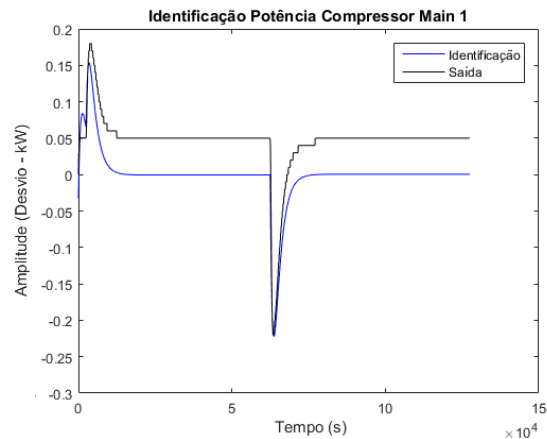


Figura 4.51: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*.

Potência do *Compressor Main 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.52, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,3}(s) = \frac{-1,931 \times 10^{-7}s - 2,327 \times 10^{-13}}{s^2 + 0,001818s + 6,364 \times 10^{-7}}$$

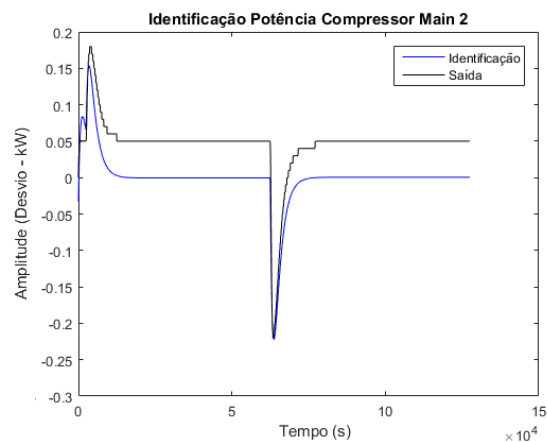


Figura 4.52: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.53, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,4}(s) = \frac{-0,0016}{1470,7s + 1}$$

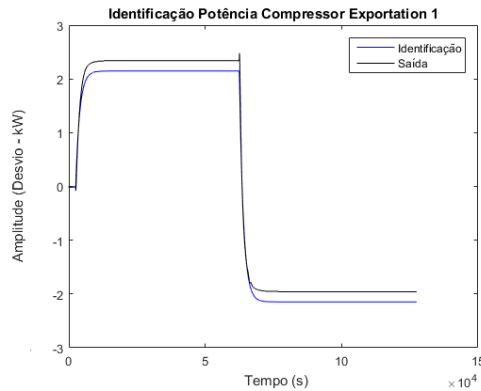


Figura 4.53: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*.

Potência do *Compressor Termoleess 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleess 1* é mostrada na Figura 4.54, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,5}(s) = \frac{-0,002}{1374,6s + 1}$$

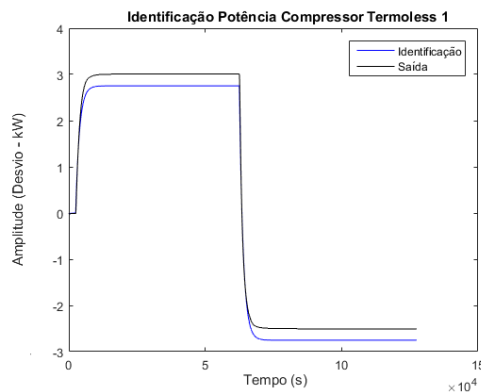


Figura 4.54: Identificação da potência do *Compressor Termoleess 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.55, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,6}(s) = \frac{-0,0018}{1664,9s + 1}$$

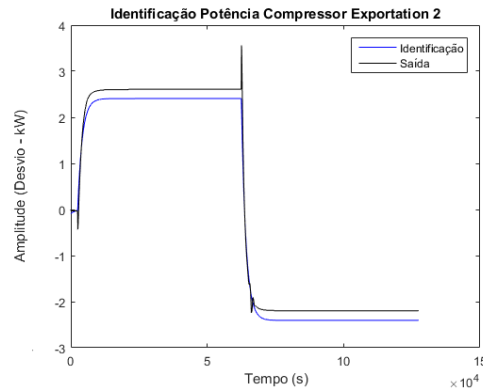


Figura 4.55: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*.

Potência do *Compressor Termoles 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoles 2* é mostrada na Figura 4.56, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{7,7}(s) = \frac{-0,0025}{1352,6s + 1}$$

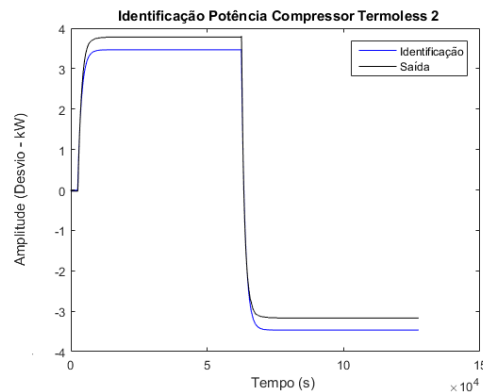


Figura 4.56: Identificação da potência do *Compressor Termoles 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*.

4.2.8 Degrau na potência do *Cooler Train 2*

A Figura 4.57 apresenta os degraus aplicados na potência do *Cooler Train 2* para a realização da identificação.

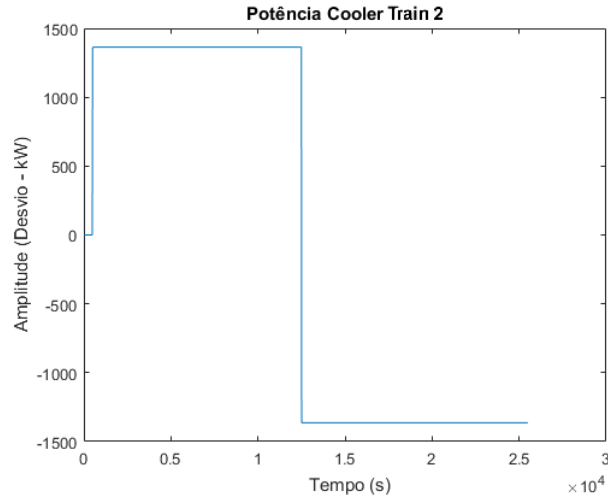


Figura 4.57: Sequência de degraus aplicada na potência do *Cooler Train 2* para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.58, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,1}(s) = \frac{-5,036 \times 10^{-9}s - 6,471 \times 10^{-15}}{s^2 + 0,001476s + 5,411 \times 10^{-7}}$$

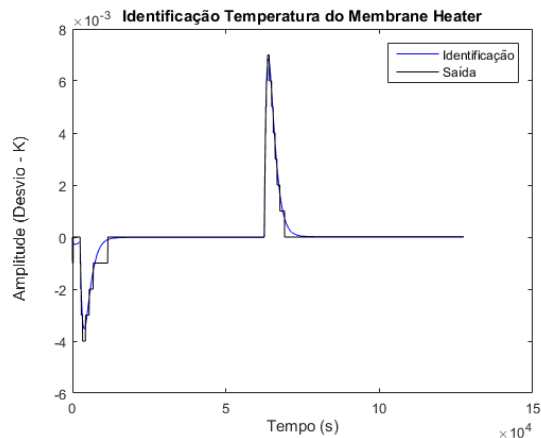


Figura 4.58: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na potência do *Cooler Train 2*.

Potência do *Compressor Main 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.59, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,2}(s) = \frac{-3,195 \times 10^{-7}s - 2,872 \times 10^{-11}}{s^2 + 0,00427s + 3,642 \times 10^{-7}}$$

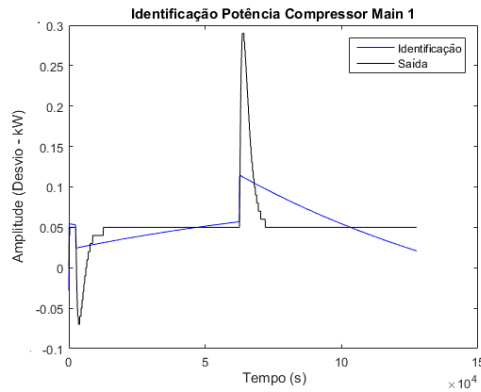


Figura 4.59: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 2*.

Potência do *Compressor Main 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.60, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,3}(s) = \frac{-3,195 \times 10^{-7}s - 2,872 \times 10^{-11}}{s^2 + 0,00427s + 3,642 \times 10^{-7}}$$

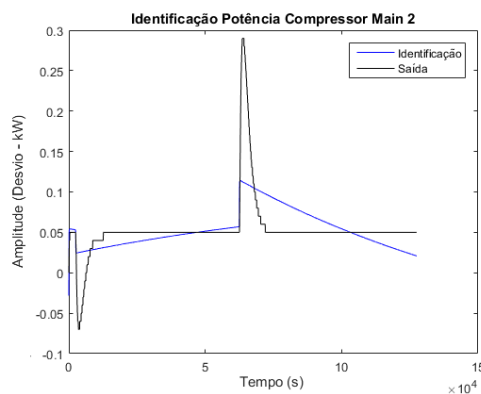


Figura 4.60: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 2*.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.61, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,4}(s) = \frac{-0,002}{1290,2s + 1}$$

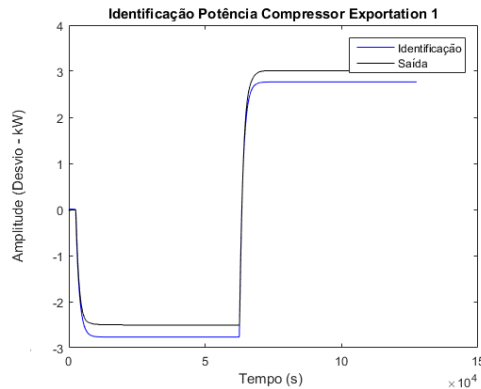


Figura 4.61: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 2*.

Potência do *Compressor Termoleless 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleless 1* é mostrada na Figura 4.62, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,5}(s) = \frac{-0,0016}{1378,9s + 1}$$

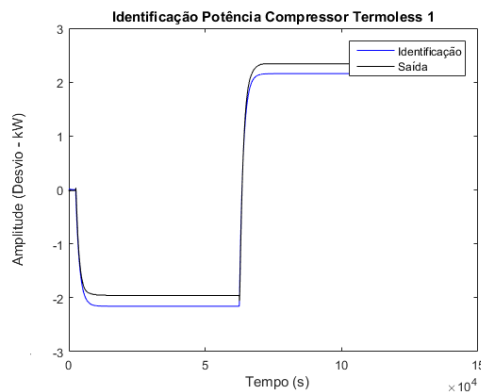


Figura 4.62: Identificação da potência do *Compressor Termoleless 1* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 2*.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.63, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,6}(s) = \frac{-0,0026}{1276,6s + 1}$$

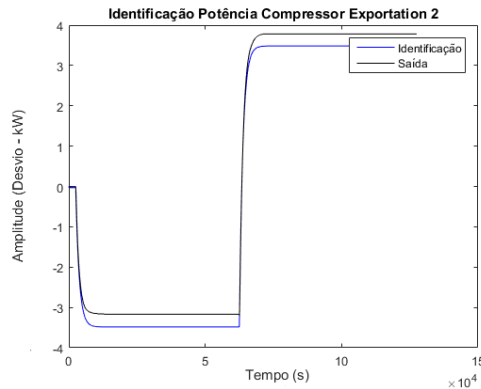


Figura 4.63: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 2*.

Potência do *Compressor Termoless 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 2* é mostrada na Figura 4.64, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{8,7}(s) = \frac{-0,0018}{1581,3s + 1}$$

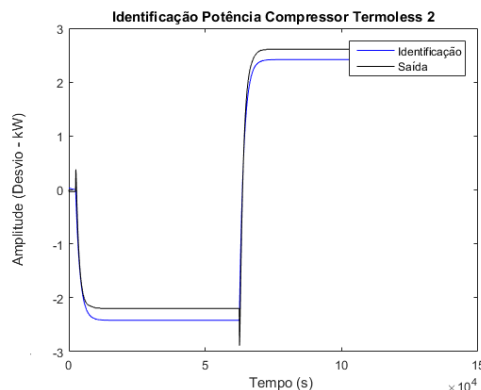


Figura 4.64: Identificação da potência do *Compressor Termoless 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Train 2*.

4.2.9 Degrau na vazão molar de entrada

A Figura 4.65 apresenta os degraus aplicados na vazão molar de entrada para a realização da identificação.

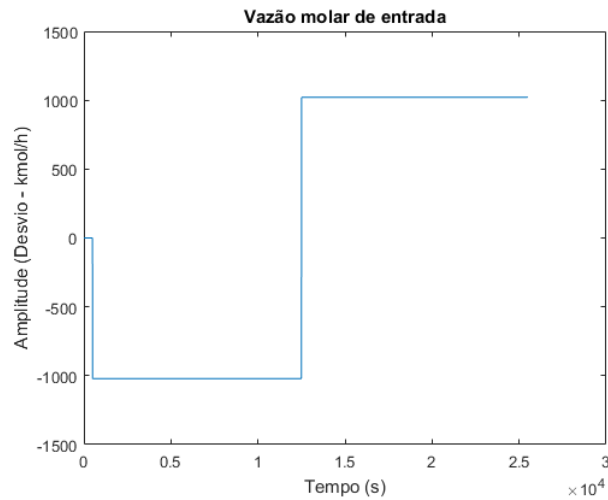


Figura 4.65: Sequência de degraus aplicada na vazão molar de entrada (kmol/h) para identificação.

Temperatura de saída do *Membrane Heater*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da temperatura do *Membrane Heater* é mostrada na Figura 4.66, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,1}(s) = \frac{0,0276}{97,641s + 1}$$

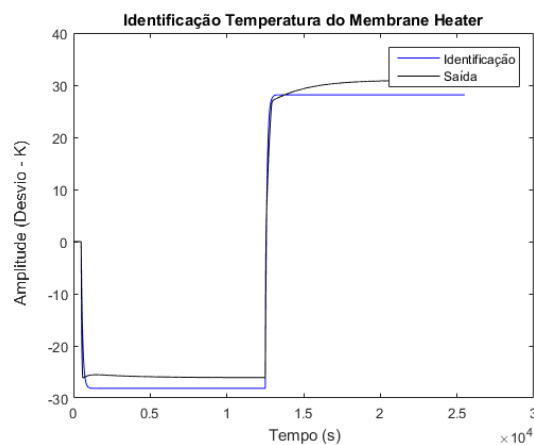


Figura 4.66: Identificação da temperatura do *Membrane Heater* para o degrau na vazão molar de entrada.

Potência do Compressor Main 1

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.67, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,2}(s) = \frac{1,887}{91,052s + 1}$$

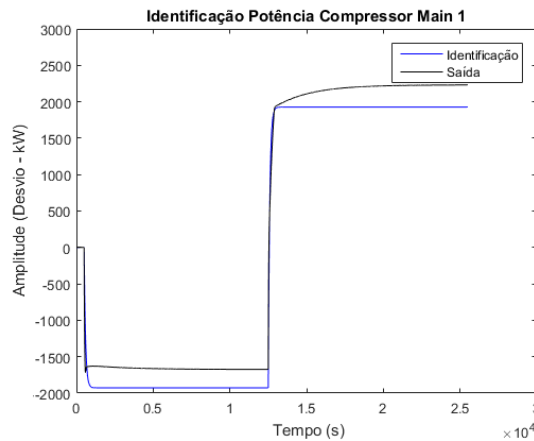


Figura 4.67: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do Compressor Main 2

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.68, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,3}(s) = \frac{1,887}{91,052s + 1}$$

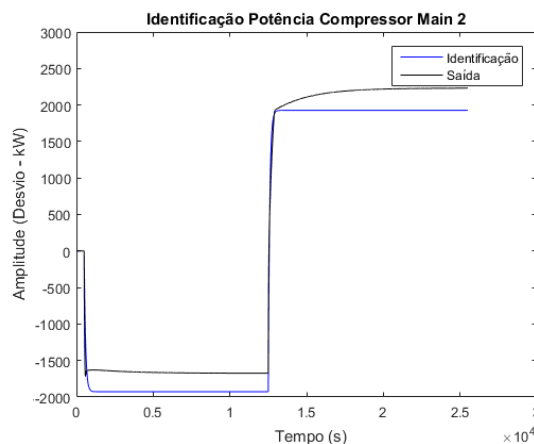


Figura 4.68: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.69, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,4}(s) = \frac{0,4609}{22,88s + 1}$$

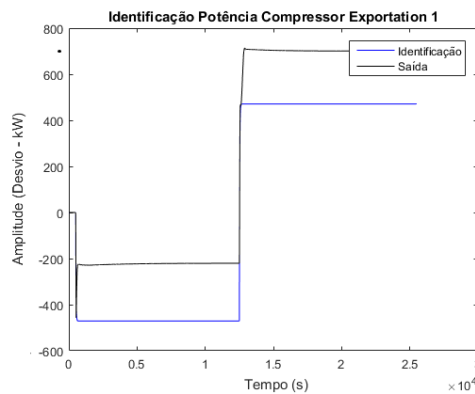


Figura 4.69: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Termoless 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 1* é mostrada na Figura 4.70, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,5}(s) = \frac{0,4609}{22,88s + 1}$$

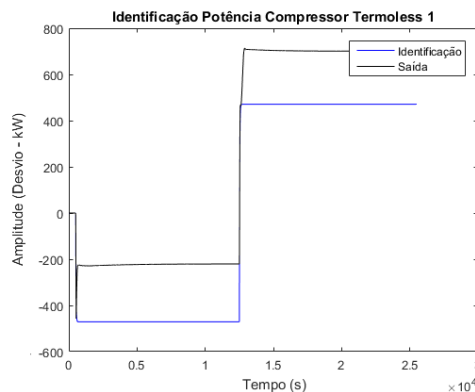


Figura 4.70: Identificação da potência do *Compressor Termoless 1* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.71, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,6}(s) = \frac{0,61}{16,169s + 1}$$

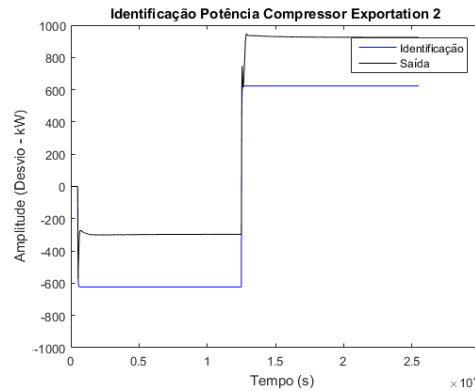


Figura 4.71: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Termoless 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoless 2* é mostrada na Figura 4.72, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{9,7}(s) = \frac{0,61}{16,169s + 1}$$

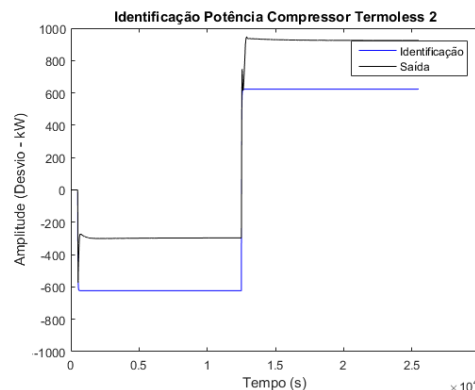


Figura 4.72: Identificação da potência do *Compressor Termoless 2* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

4.2.10 Degrau na Eficiência Mecânica dos Compressores

A Figura 4.73 apresenta os degrau aplicados na eficiência mecânica do compressor *Main 1* para a realização da identificação. Os degraus aplicados na eficiência dos outros compressores são idênticos a esse, não sendo necessária a apresentação dos mesmos.

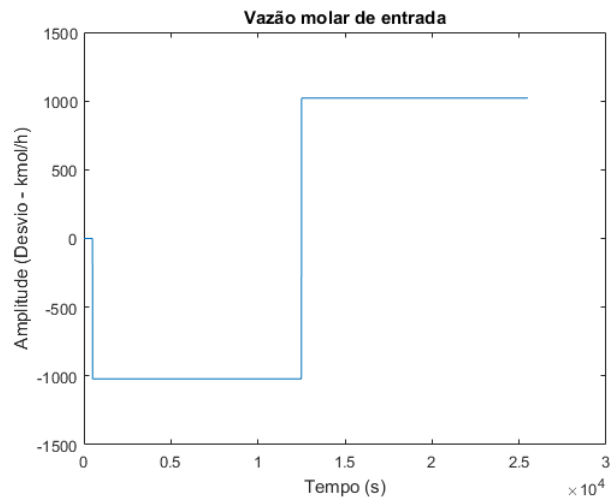


Figura 4.73: Sequência de degraus aplicada na eficiência mecânica para identificação.

Potência do *Compressor Main 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 1* é mostrada na Figura 4.74, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{10,1}(s) = \frac{-9584,5}{0,0801s + 1}$$

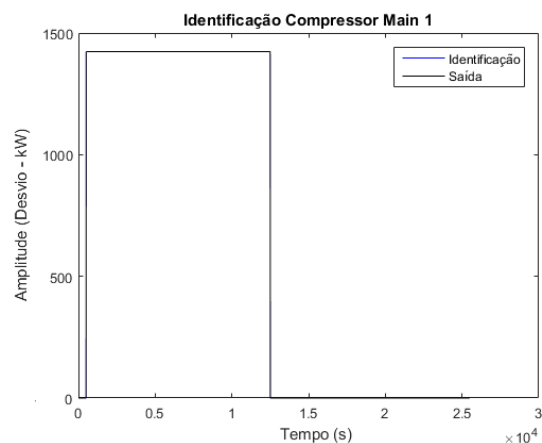


Figura 4.74: Identificação da potência do *Compressor Main 1* para a sequência de degraus na sua eficiência mecânica.

Potência do *Compressor Main 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Main 2* é mostrada na Figura 4.75, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{10,2}(s) = \frac{-9584,5}{0,0801s + 1}$$

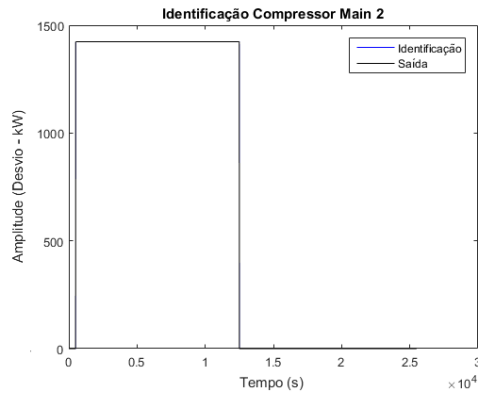


Figura 4.75: Identificação da potência do *Compressor Main 2* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Exportation 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 1* é mostrada na Figura 4.76, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{10,3}(s) = \frac{-2286,7}{0,0713s + 1}$$

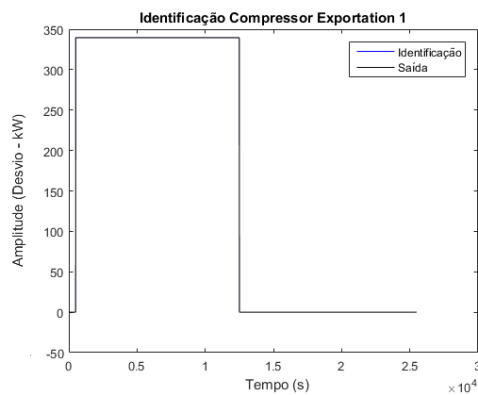


Figura 4.76: Identificação da potência do *Compressor Exportation 1* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Exportation 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Exportation 2* é mostrada na Figura 4.77, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{10,4}(s) = \frac{-2806,2}{0,2362s + 1}$$

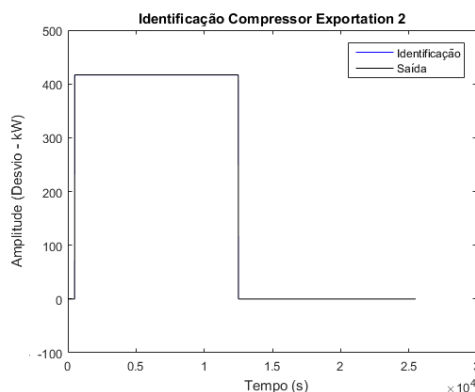


Figura 4.77: Identificação da potência do *Compressor Exportation 2* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Termoleless 1*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleless 1* é mostrada na Figura 4.78, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{10,5}(s) = \frac{-2286,7}{0,0713s + 1}$$

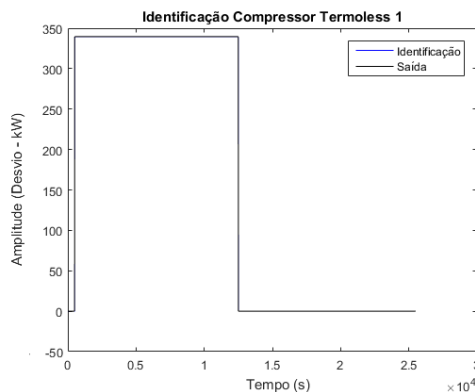


Figura 4.78: Identificação da potência do *Compressor Termoleless 1* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

Potência do *Compressor Termoleess 2*

A melhor identificação obtida para a variável controlada da potência do *Compressor Termoleess 2* é mostrada na Figura 4.79, a qual apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_{10,6}(s) = \frac{-2806,2}{0,2362s + 1}$$

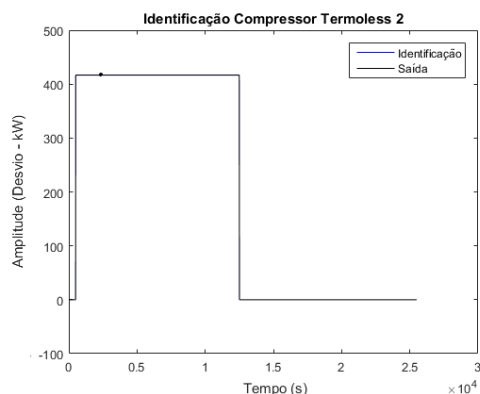


Figura 4.79: Identificação da potência do *Compressor Termoleess 2* para a sequência de degraus na vazão molar de entrada.

4.3 Discussões

Por conta do grande número de identificações realizadas, foi possível observar vários resultados com características distintas para cada par entrada-saída. Características essas ligadas principalmente à não linearidade da relação de cada par. Vale ressaltar que a escolha da melhor identificação para cada caso foi baseada na função de transferência da resposta ao degrau que fornecesse um tempo de assentamento e ganho que se aproximasse mais do sinal original.

Nos gráficos das identificações que relacionam a eficiência com a potência dos compressores, por exemplo para o *Compressor Main 1* mostrado na Figura 4.74, pode-se notar um comportamento não só linear como, também, bem próximo a um degrau. Para esse caso, o sinal identificado foi tão próximo ao obtido na simulação da planta virtual que um sobrepõe o outro.

No gráfico da resposta da potência do *Compressor Termoleess 2* para a sequência de degraus na potência do *Cooler Exportation 2*, mostrado na Figura 4.56, é possível verificar um resultado ainda com um certo nível de linearidade, mas há uma pequena diferença do ganho no estado estacionário. Por se tratar de uma aproximação linear, erros desse tipo são esperados.

Contudo, alguns sinais possuem um comportamento claramente não linear, como é o caso da Figura 4.70, que apresenta a resposta da potência do *Compressor Termoless 1* para a sequência de degraus na vazão de entrada. Pode-se observar que, na resposta ao primeiro degrau, ocorre um grande *overshoot* antes da variável atingir o estado estacionário, o que não está presente na resposta ao degrau positivo seguinte.

Assim, o algoritmo do *toolbox Ident* tenta compensar todo o sinal e, para casos não lineares como esse, não é capaz de representar um ganho no estado estacionário satisfatório para degraus de sinais opostos.

Como, desde o princípio, foi assumido que a identificação traria uma representação aproximada da planta original, algumas resultados mais discrepantes que outros já eram esperados. O simulação da planta linear em conjunto com o controle a ser implementado no capítulo seguinte poderá evidenciar alguma má identificação realizada.

Capítulo 5

Controle, Resultados e Discussões

5.1 Cenários Escolhidos

A partir da natureza da planta e do comportamento esperado das variáveis, foram escolhidos três cenários para serem simulados e analisados.

Os dois primeiros são de natureza regulatória e visam de modo geral observar se o controle rejeita distúrbios. Já o terceiro cenário é de natureza servo e tem como objetivo verificar se uma variável controlada é capaz de seguir uma referência determinada. Eles são listados a seguir:

- **Cenário 1:** Verificar se a temperatura de saída da membrana é capaz de rejeitar distúrbios na vazão e, se ela e a potência dos compressores se mantêm dentro das restrições determinadas.
- **Cenário 2:** Verificar se, mesmo com distúrbios na eficiência, a potência dos compressores se mantêm dentro dos limites e se a temperatura de saída da membrana não fica sujeita a grandes variações e, ainda, se não ultrapassa as restrições determinadas.
- **Cenário 3:** Simular uma variação no fornecimento de energia de um dos compressores aplicando um degrau negativo na sua referência da potência, verificando se o controle é capaz de segui-la e se todas as outras variáveis se mantêm nas restrições determinadas.

Para todos os cenários serão estipuladas restrições baseadas nas análises realizadas no Capítulo 3 sobre a planta virtual. Dessa forma, será determinada uma restrição para impedir que a temperatura fique 6 Kelvin acima ou abaixo do seu valor no estado estacionário.

Para o caso das potências, tanto dos trocadores de calor quanto dos compressores, serão determinadas restrições baseadas no gasto energético e no esforço exigido do equipamento. Assim, as potências serão restringidas em $\pm 50\%$ para os trocadores e em $\pm 30\%$

para os compressores, ambos percentuais referem-se a valores abaixo e acima do estado estacionário. Além disso, para o caso das variáveis manipuladas foram também determinadas restrições para a taxa de variação por tempo de amostragem com o intuito de amenizar o trabalho exercido pelos trocadores de calor.

Todas as restrições determinadas são apresentadas na Tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5.1: Restrições determinadas para o primeiro cenário a ser sintonizado.

Tipo de Unidade	Variável	Restrição	Percentual do EE	Restrição Taxa de Variação
Temperatura (K)	Membrane Heater	± 6	1,91%	-
Potência (kW)	Cooler Main 1	$\pm 4831,145$	50%	± 500
	Cooler Main 2	$\pm 4831,145$	50%	± 500
	Cooler Dehy	$\pm 820,64$	50%	± 50
	Membrane Heater	$\pm 799,71$	50%	± 100
	Cooler Exportation 1	$\pm 1418,69$	50%	± 200
	Cooler Exportation 2	$\pm 1363,78$	50%	± 200
	Cooler Train 1	$\pm 1418,69$	50%	± 200
	Cooler Train 2	$\pm 1363,78$	50%	± 200
	Compressor Main 1	$\pm 2420,1$	30%	-
	Compressor Main 2	$\pm 2420,1$	30%	-
	Compressor Exportation 1	$\pm 577,5$	30%	-
	Compressor Exportation 2	$\pm 708,6$	30%	-
	Compressor Termless 1	$\pm 577,5$	30%	-
	Compressor Termless 2	$\pm 708,6$	30%	-

Vale ressaltar que toda sintonia do MPC será realizada de forma empírica, visto que os parâmetros de sintonia foram escolhidos e testados até obter um controle que apresentasse um comportamento satisfatório. Por isso, serão apresentadas mais de uma sintonia para um único cenário.

5.2 Primeiro Cenário

Para o primeiro cenário, será aplicado um degrau de 800 kmol/h na vazão aos 100 segundos de simulação como mostrado na Figura 5.1. Esse degrau reflete um aumento de 7,83% da vazão de entrada e é uma representação satisfatória desse tipo de distúrbio.

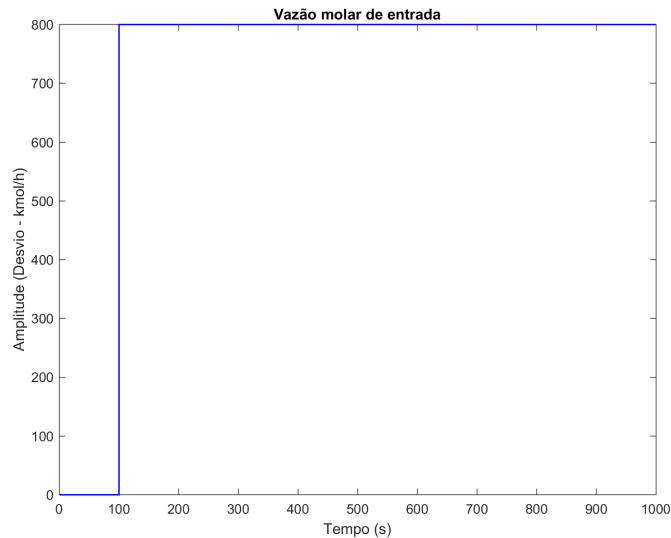


Figura 5.1: Sinal do distúrbio tipo degrau na vazão molar de entrada para análise do primeiro cenário.

Com o objetivo de manter a temperatura de saída da membrana no seu valor inicial mostrado na Tabela 3.1, sua referência será mantida no zero, visto que está sendo trabalhado com variável desvio.

5.2.1 Primeira Sintonia

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros de sintonia utilizados. Como não há necessidade de que a potência dos compressores se mantenha em um valor determinado como no caso da temperatura e somente fique dentro dos limites estipulados, o fator de ponderação Γ , que também será chamado de peso, mostrado na Equação 2.18 foi definido como zero. Assim, o controlador não fará com que a variável siga a referência, mas se mantenha dentro dos valores determinados.

Além disso, o peso para as variáveis manipuladas, a potência dos trocadores de calor, foi determinado como zero e será mantido assim em todas as sintonias, pois essas variáveis só devem se manter dentro das restrições e, a adição de peso para estas, afetaria as variáveis controladas. Portanto, essa configuração será mantida em todas as sintonias apresentadas.

Tabela 5.2: Parâmetros da primeira sintonia do primeiro cenário.

Parâmetro	Valor
Tempo de amostragem	5 s
Horizonte de predição	60
Horizonte de controle	10
Peso da temperatura de saída	9
Peso da potência dos compressores	0
Peso da potência dos trocadores de calor	0

Os resultados obtidos para as variáveis controladas para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

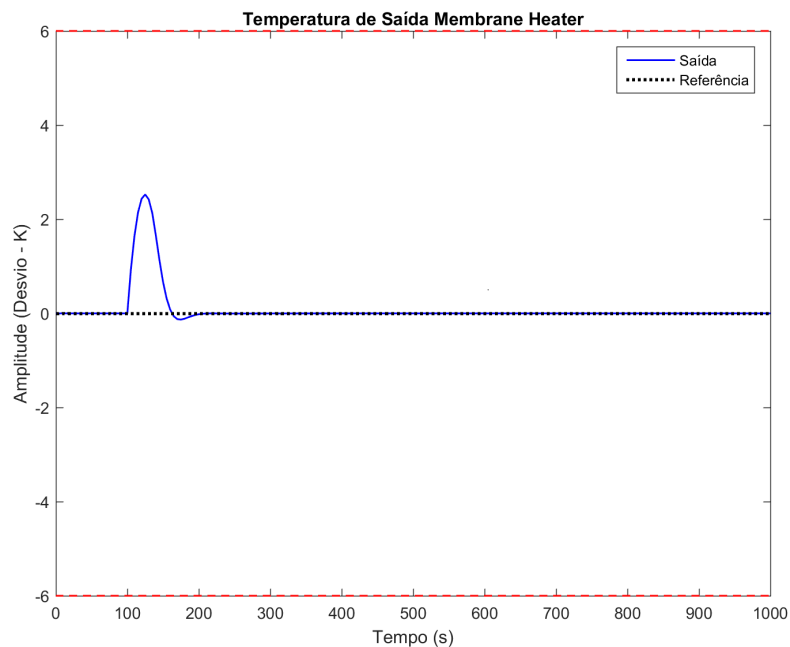


Figura 5.2: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

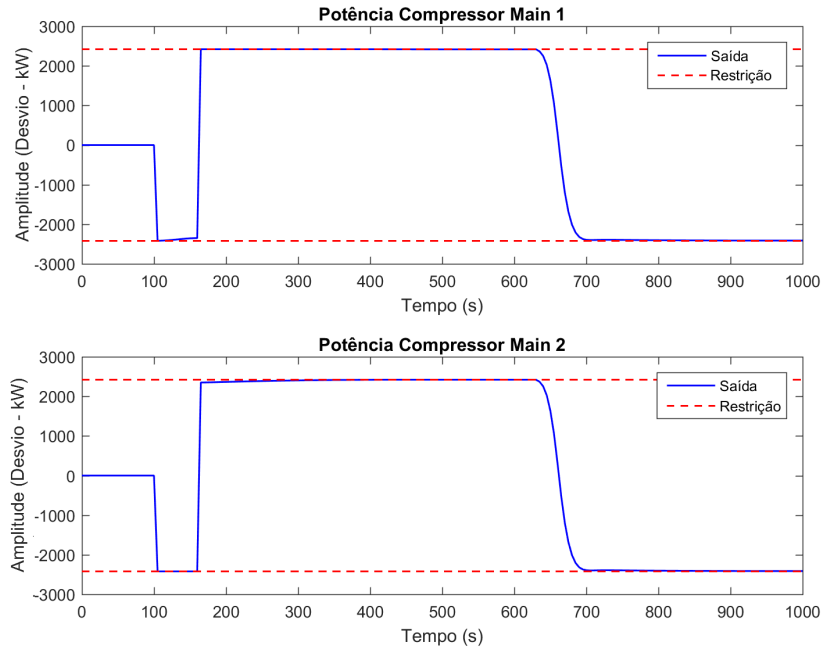


Figura 5.3: Sinais das potências dos compressores *Main 1* e *2* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

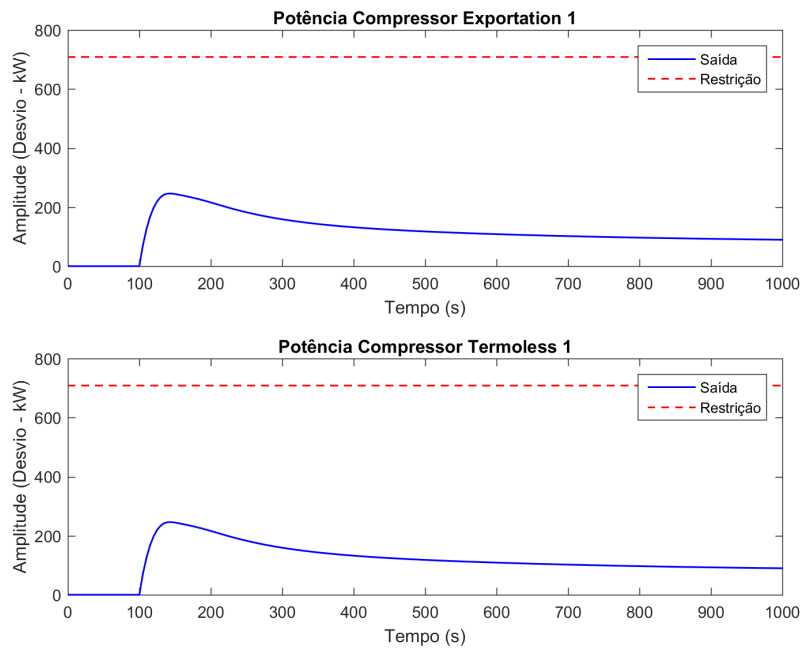


Figura 5.4: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 1* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

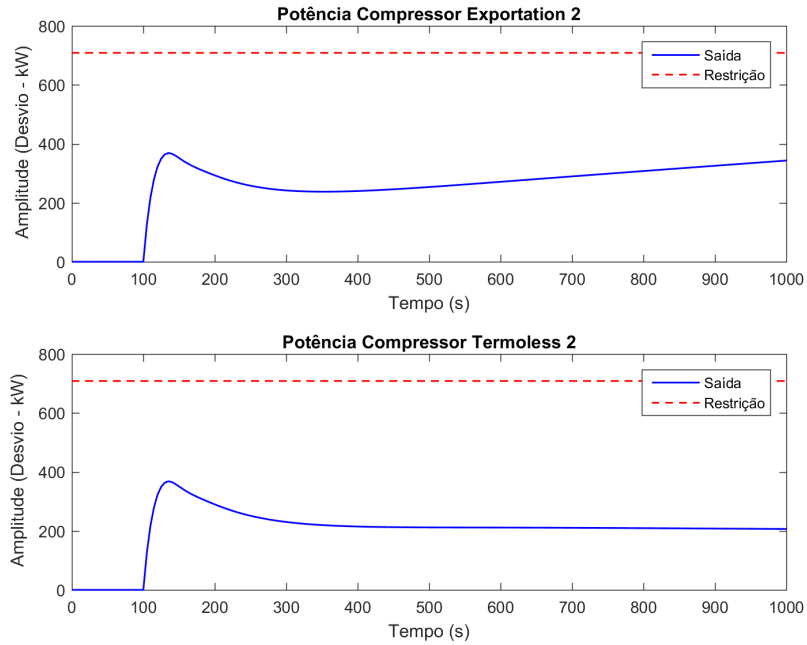


Figura 5.5: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 2* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

Agora, os resultados obtidos para as ações de controle para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9.

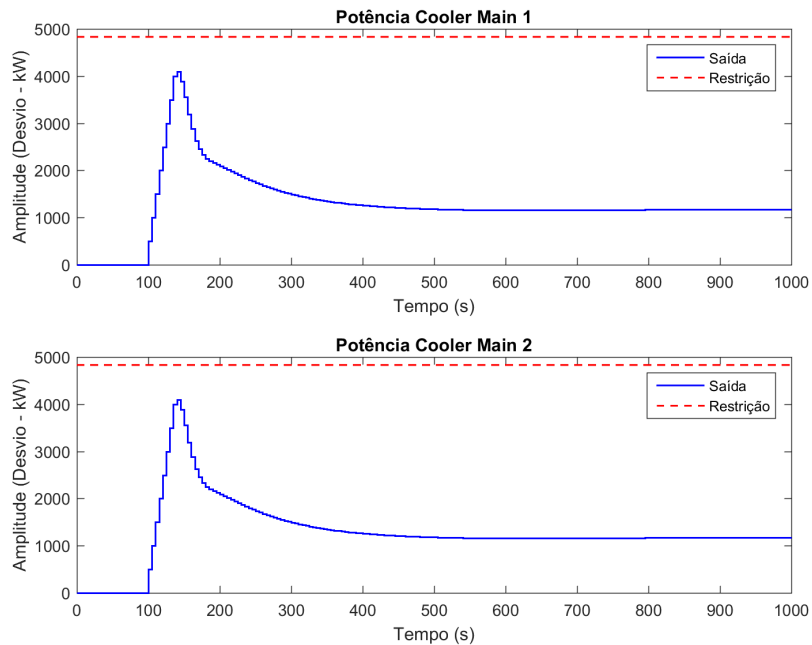


Figura 5.6: Sinais das potências dos cooler *Main 1* e *2* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

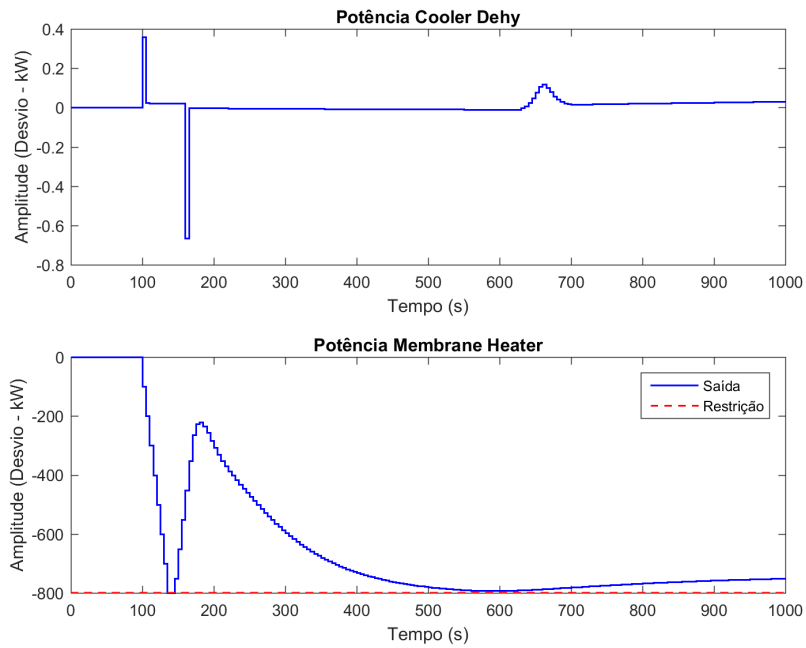


Figura 5.7: Sinais das potências do cooler *Dehy* e do *Membrane Heater* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

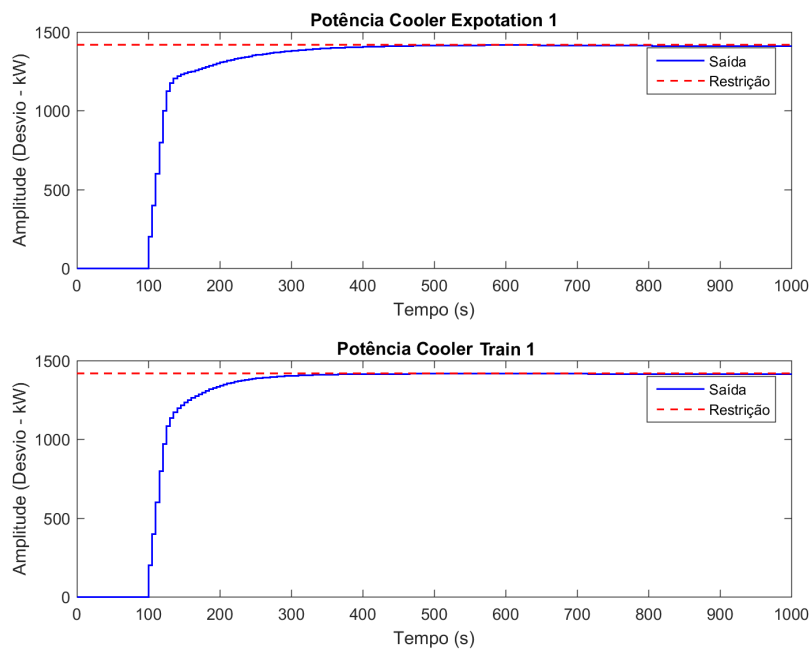


Figura 5.8: Sinais das potências dos cooler *Exoptation* e *Train 1* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

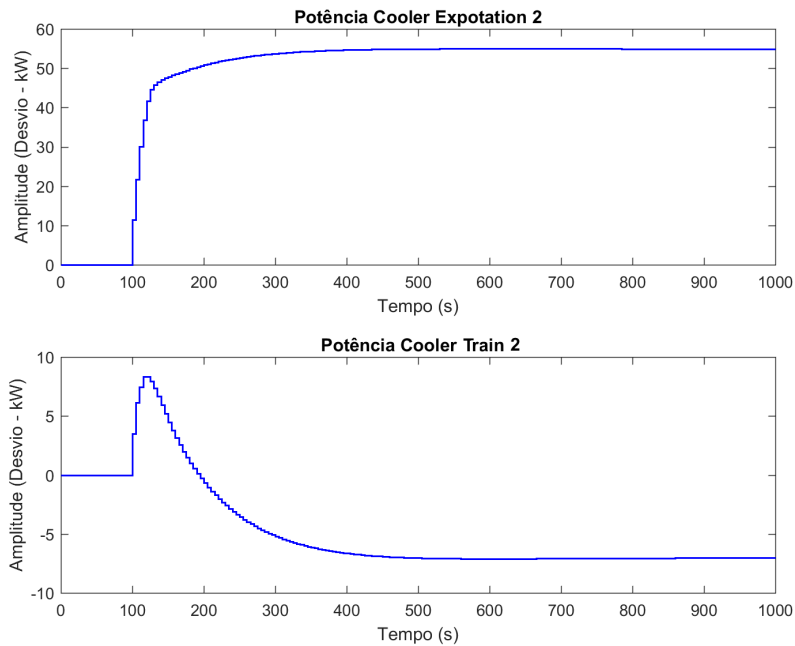


Figura 5.9: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 2* da simulação da primeira sintonia para o primeiro cenário.

A Figura 5.2 apresenta o sinal da temperatura de saída do *Membrane Heater* juntamente com suas referências e restrições. Pode-se observar que o distúrbio na vazão de entrada foi rejeitada em menos de 100 segundos e o valor mais alto alcançado pela temperatura por causa do distúrbio foi um pouco acima de 2 Kelvin, ficando com uma grande folga da restrição de 6 Kelvin determinada.

Contudo, essa rápida rejeição ao distúrbio foi realizada as custas de outras variáveis, principalmente da potência dos compressores do estágio principal de compressão, como pode ser observado na Figura 5.3. Em aproximadamente 60 segundos a potência dos compressores *Main 1* e *2* alcançam o limite inferior e superior de $\pm 4831,145$ kW, que é uma alteração muito brusca ao comparar com os sinais das potências dos compressores do segundo estágio de compressão (Figuras 5.4 e 5.5), visto que esses apresentam variações mais brandas e se mantêm em valores bem menores que os restringidos.

Como era de se esperar, foi exigido um grande esforço do aquecedor da membrana (Figura 5.7), visto que este é o trocador de calor que precede o processo de remoção de CO_2 , o qual exige o controle da temperatura em questão. No caso das outras variáveis manipuladas pelo controlador, o sinal da potência dos *Cooler Main 1* e *2* apresenta uma grande variação, o que pode ser relacionado ao resultado gerado pelos seus respectivos compressores (Figura 5.6). Nota-se também que o primeiro trocador de calor de cada trem do segundo estágio de compressão trabalha de modo constante no seu limite superior a partir dos 400 segundos de simulação (Figura 5.8), diferentemente dos trocadores de calor seguintes, que apresentam uma potência baixa durante todo o tempo, como observado

na Figura 5.9. Nessa última imagem pode-se notar o efeito de alguns casos em que a identificação da *Cooler Train 2* foi discrepante das demais.

5.2.2 Segunda Sintonia

A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros de sintonia utilizados. Os pesos dos compressores foram ainda mantidos em zero, mas os outros parâmetros foram alterados com o intuito de suavizar o trabalho das variáveis, principalmente dos compressores *Main 1* e 2.

Tabela 5.3: Parâmetros da segunda sintonia do primeiro cenário.

Parâmetro	Valor
Tempo de amostragem	5 s
Horizonte de predição	35
Horizonte de controle	6
Peso da temperatura de saída	13
Peso da potência dos compressores	0
Peso da potência dos trocadores de calor	0

Os resultados obtidos para as variáveis controladas para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

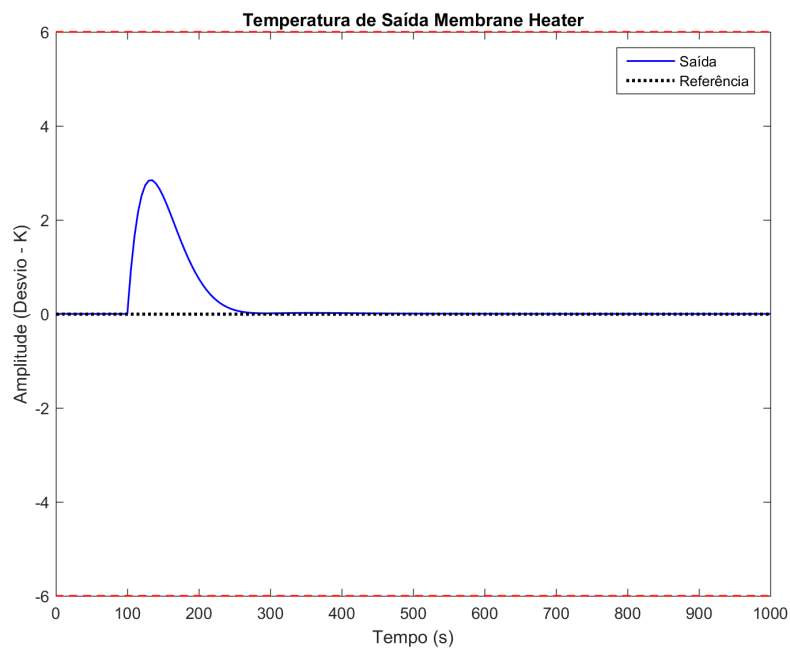


Figura 5.10: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

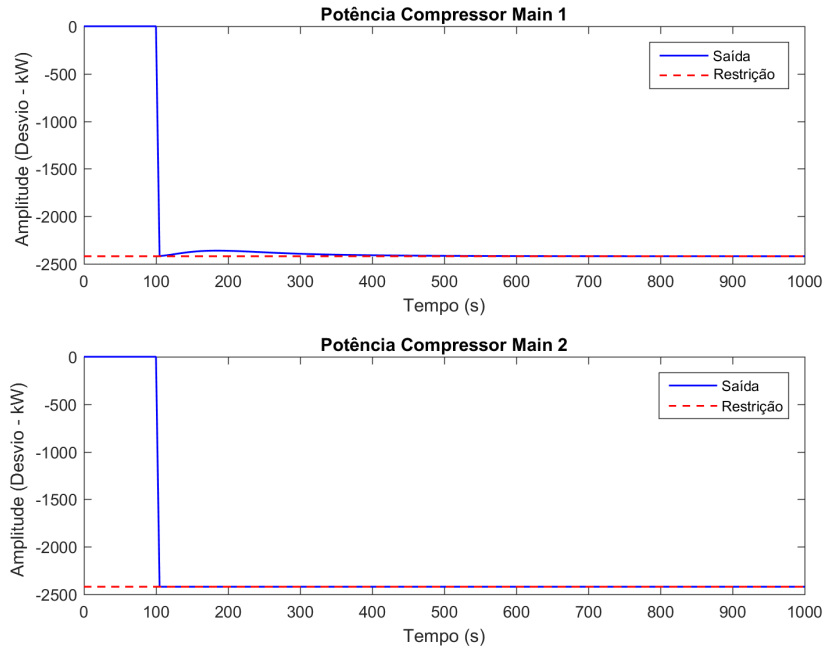


Figura 5.11: Sinais das potências dos compressores *Main 1* e *2* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

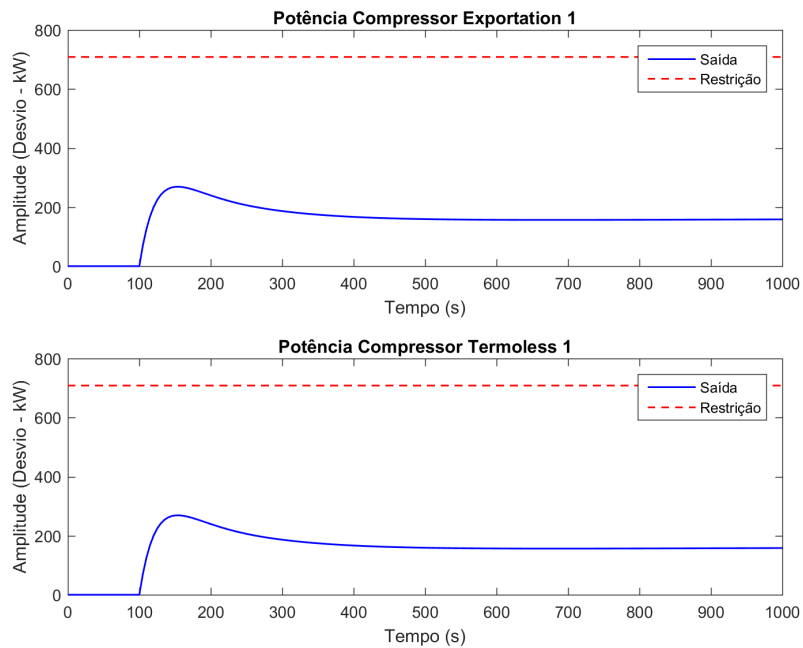


Figura 5.12: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 1* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

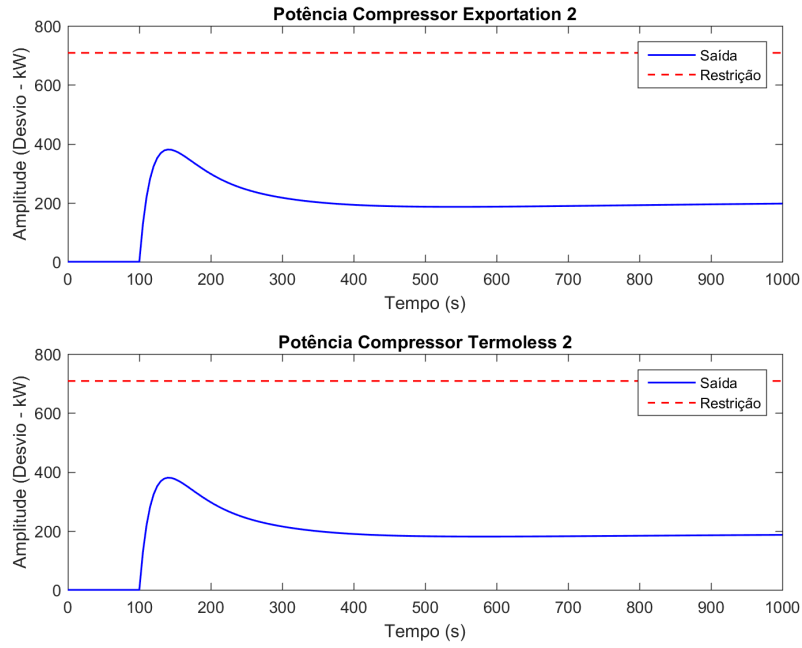


Figura 5.13: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 2* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

Agora, os resultados obtidos para as ações de controle para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17.

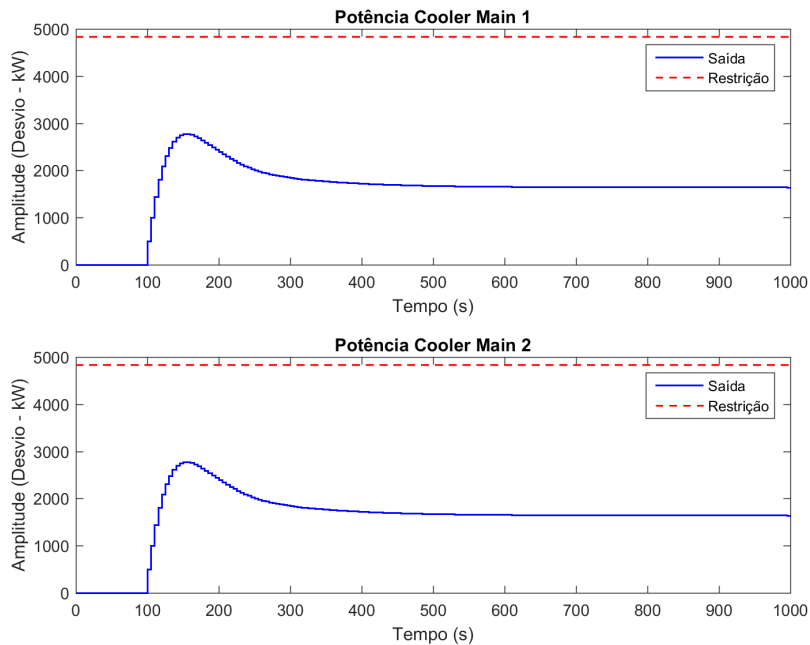


Figura 5.14: Sinais das potências dos cooler *Main 1* e *2* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

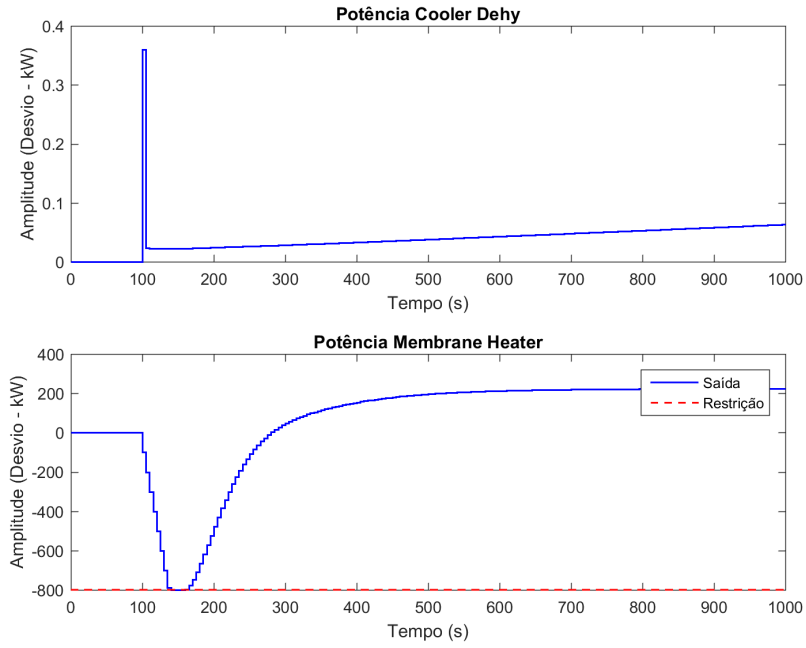


Figura 5.15: Sinais das potências do cooler *Dehy* e do *Membrane Heater* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

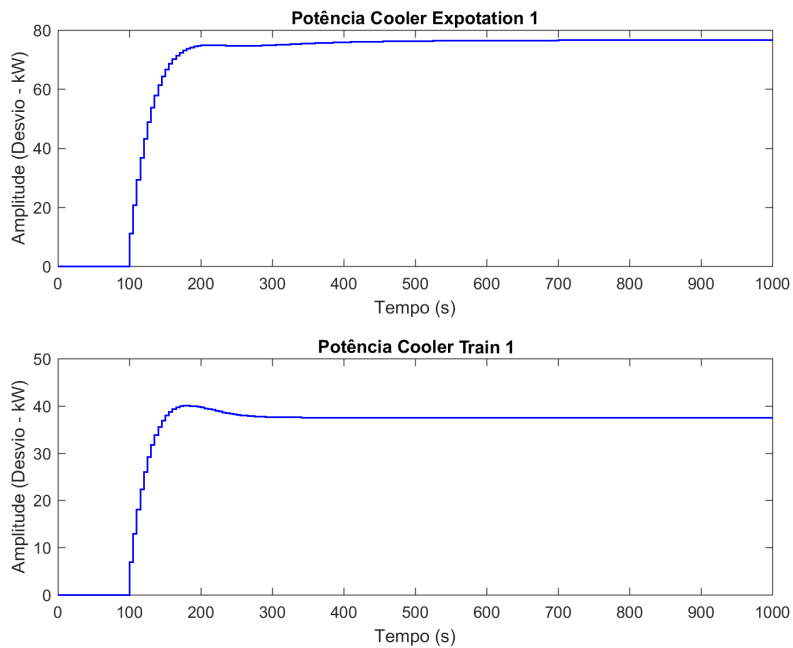


Figura 5.16: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 1* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

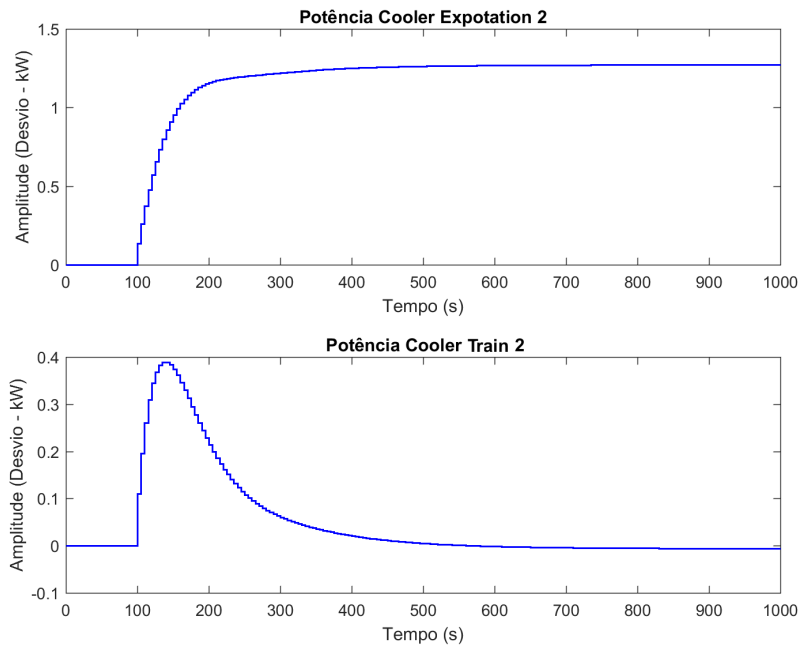


Figura 5.17: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 2* da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

A partir da Figura 5.11 pode-se notar que o objetivo principal da realização de uma segunda sintonia para este cenário foi alcançado. Apesar da potência dos compressores *Main 1* e *2* caírem de maneira rápida quando o distúrbio na vazão de entrada é aplicado, ela se mantém no valor inferior da restrição durante todo o resto da simulação, diferentemente do primeiro cenário, em que há oscilações bruscas durante o processo. Mesmo suavizando de maneira significativa o trabalho dos dois compressores principais, a temperatura de saída da membrana ainda foi capaz de rejeitar o distúrbio, porém, dessa vez, em um intervalo de tempo um pouco maior (150 segundos) e alcançado a temperatura de 3 Kelvin (Figura 5.10).

Uma outra mudança significativa que é possível observar na Figura 5.16 é que o primeiro *cooler* de cada trem do segundo estágio de compressão para essa sintonia não trabalha mais na sua potência limite. A potência do aquecedor da membrana também apresentou um comportamento mais satisfatório, variando durante o efeito do degrau para rejeitá-lo e mantendo um valor mais próximo ao seu estacionário em seguida (Figura 5.15). Ademais, as outras variáveis mantiveram um comportamento semelhante ao da primeira simulação, mas apresentando variações mais suaves.

5.3 Segundo Cenário

Para este cenário será aplicado aos 100 segundos um distúrbio não medido de $-0,1$ na eficiência mecânica do compressor *Main 2* (Figura 5.18), o que equivale a uma redução de 10% na sua potência efetiva.

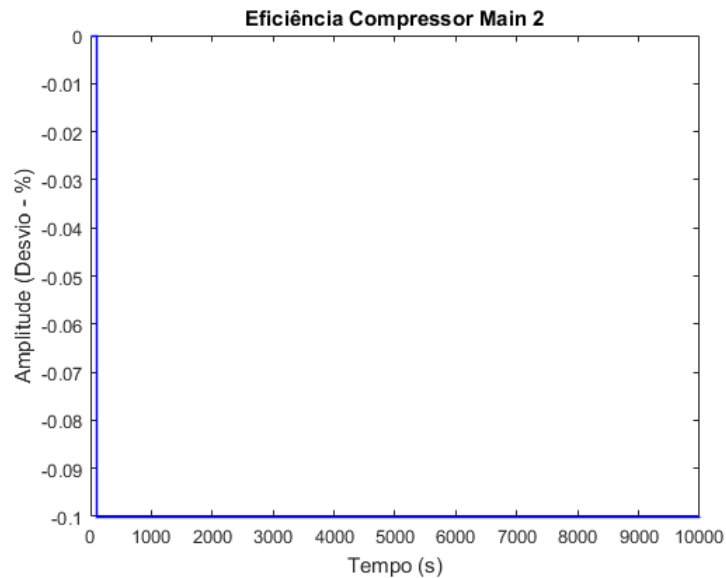


Figura 5.18: Sinal do distúrbio tipo degrau na eficiência mecânica do compressor *Main 2* para análise do segundo cenário.

5.3.1 Primeira Sintonia

A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros de sintonia utilizados. Como ainda não é desejável a ocorrência de um aumento da temperatura, nem uma grande variação da mesma, optou-se por manter um fator de ponderação não nulo para essa variável.

Tabela 5.4: Parâmetros da primeira sintonia do segundo cenário.

Parâmetro	Valor
Tempo de amostragem	5 s
Horizonte de predição	35
Horizonte de controle	5
Peso da temperatura de saída	10
Peso da potência dos compressores	0
Peso da potência dos trocadores de calor	0

Os resultados obtidos para as variáveis controladas para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22.

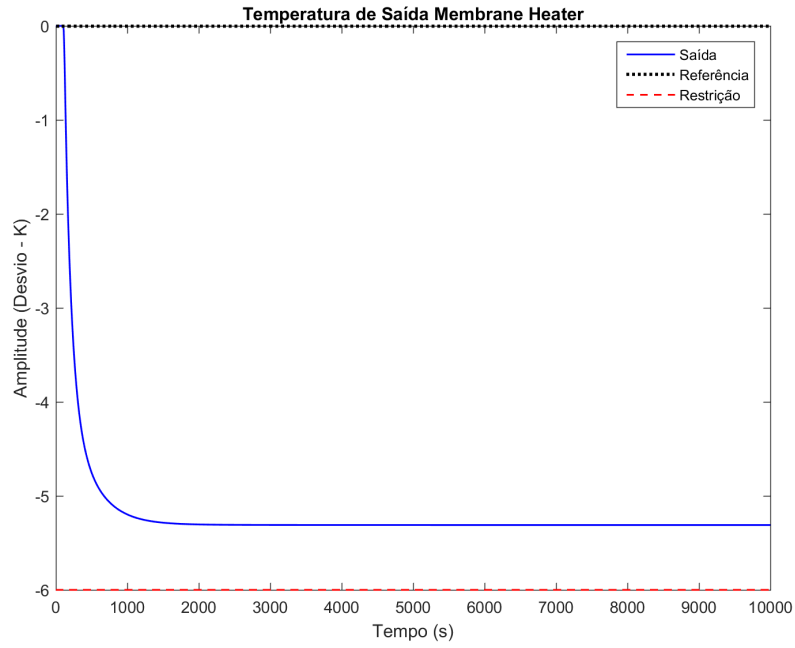


Figura 5.19: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

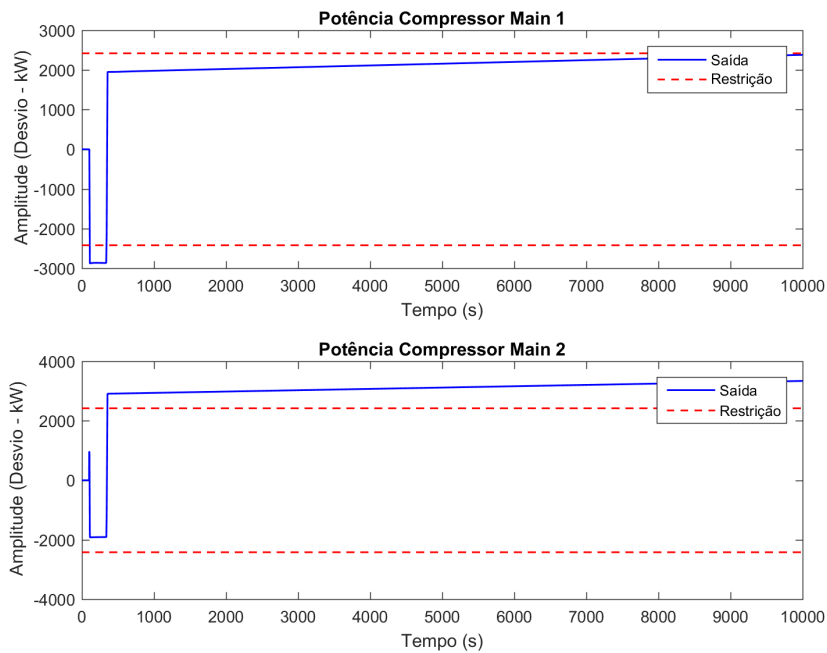


Figura 5.20: Sinais das potências dos compressores *Main 1* e *2* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

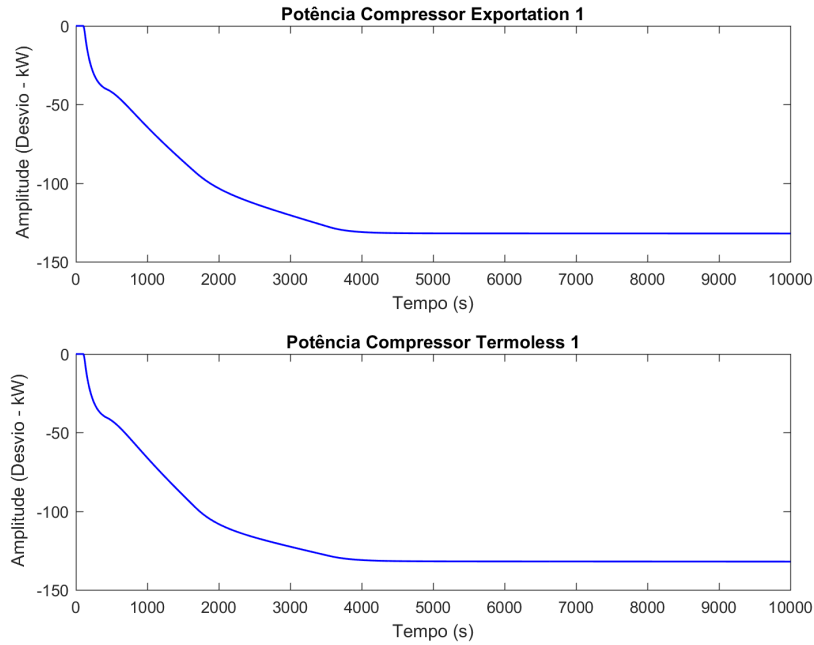


Figura 5.21: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 1* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

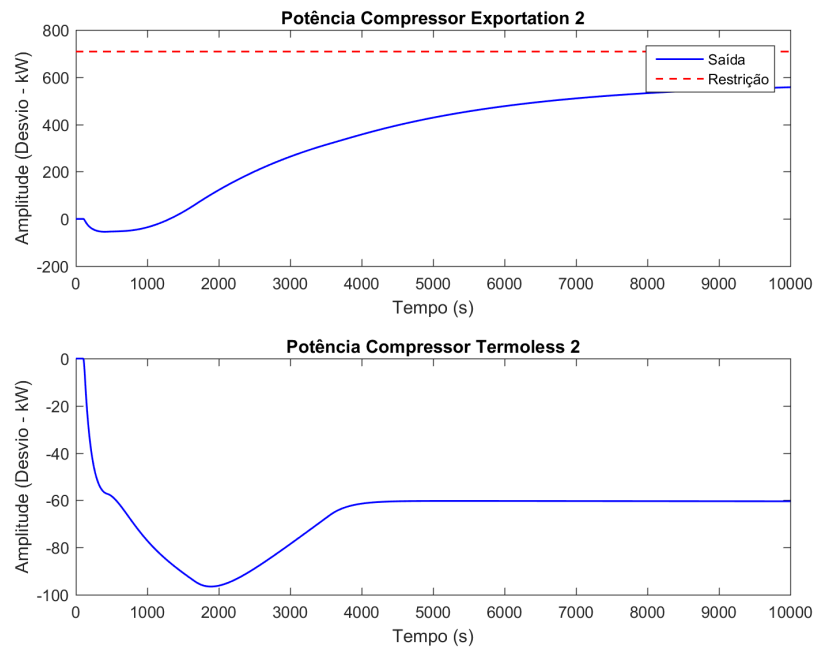


Figura 5.22: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 2* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

Agora, os resultados obtidos para as ações de controle para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26.

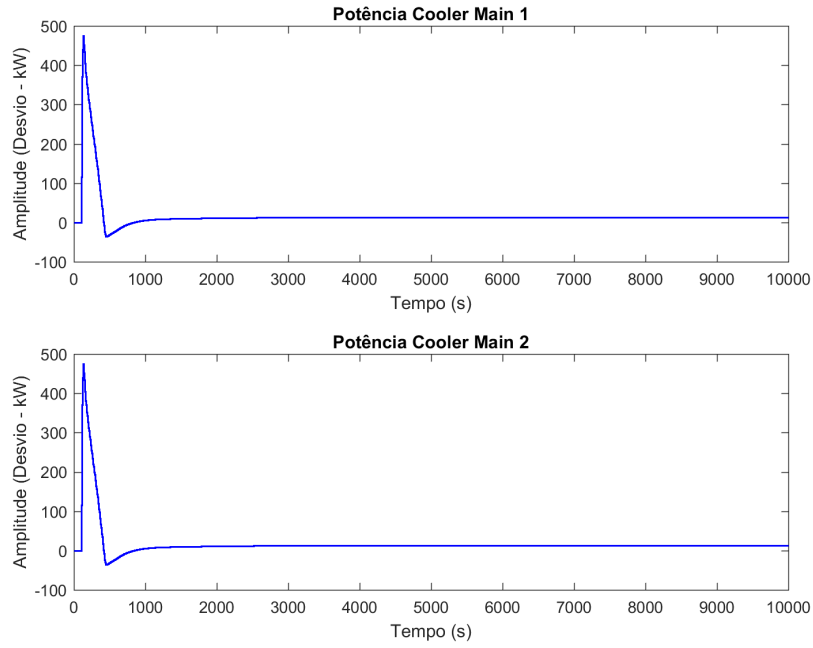


Figura 5.23: Sinais das potências dos cooler *Main 1* e *2* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

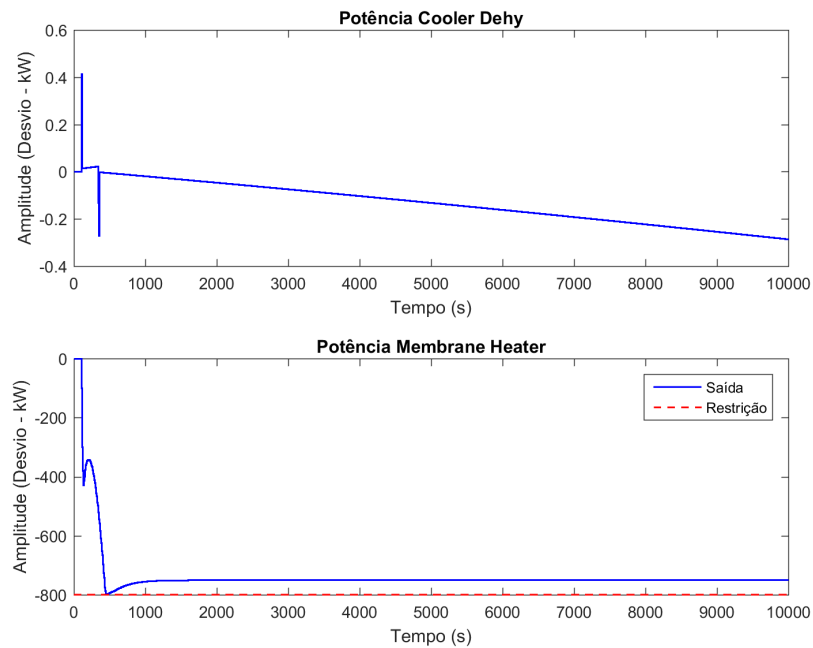


Figura 5.24: Sinais das potências do cooler *Dehy* e do *Membrane Heater* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

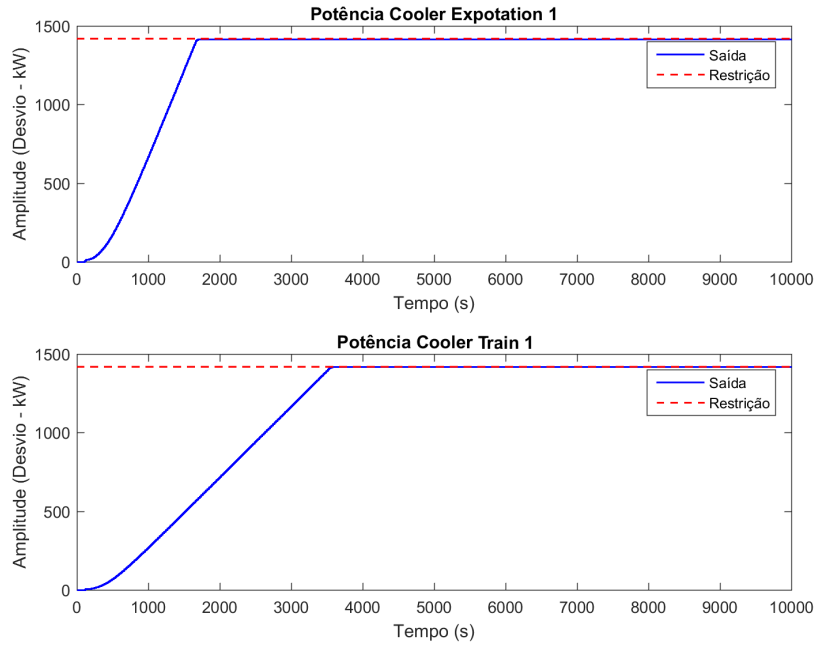


Figura 5.25: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 1* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

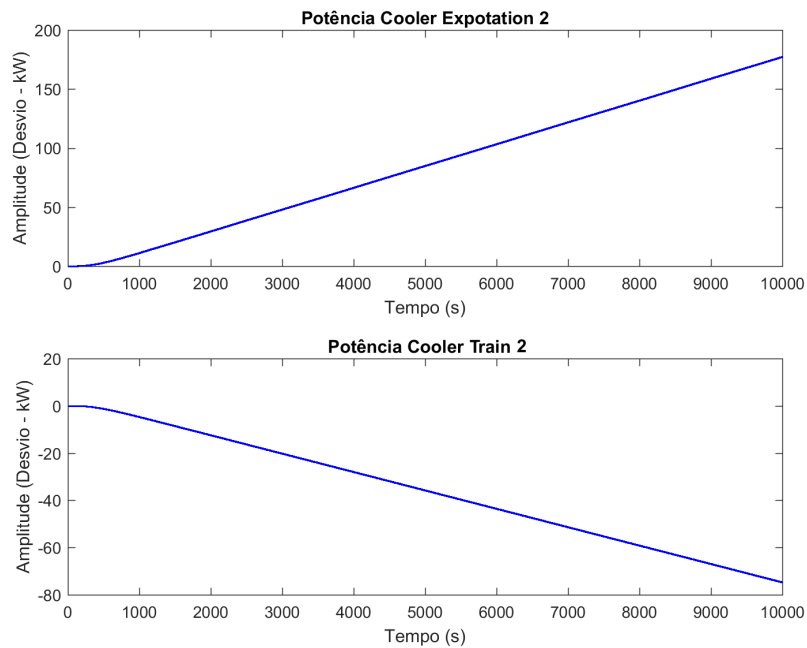


Figura 5.26: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 2* da simulação da primeira sintonia para o segundo cenário.

Ao simular esse cenário para o controlador projetado foram observados alguns resultados inapropriados. Através da Figura 5.19, é possível observar uma variação da temperatura muito maior que nos dois casos do cenário anterior, além disso, a mesma não é capaz de retornar ao seu valor inicial, mesmo tendo sido definido um peso não nulo para seu fator de ponderação.

Porém, o resultado mais inaceitável dessa sintonia é apresentado na Figura 5.30, a qual mostra que o controlador não é robusto o suficiente para amortecer distúrbios não medidos da eficiência mecânica e evitar que variáveis controladas, a potência dos compressores *Main 1* e *2* no caso, ultrapassem os restrições determinadas.

Apesar dessa falha, todas as outras variáveis que atingiram valores limites, foram mantida dentro dos mesmos, como pode ser observado nas Figuras 5.24 e 5.16. Isso mostra que o erro do controlador ocorre somente nas variáveis ligadas diretamente aos distúrbios.

Além disso, pode-se observar uma variação mais acentuada na potência dos *cooler Main 1* e *2*, por serem os trocadores de calor seguintes aos compressores *Main 1* e *2*, que sofrem mais o distúrbio. Todas as outras variáveis apresentaram comportamentos mais brandos, contudo, pode-se notar que, algumas variáveis, como, por exemplo, a potência dos *cooler Exportation e Train 2* (Figura 5.26), não se estabelecem mesmo após os 10000 segundos de simulação, sendo um comportamento integrador muito indesejado.

5.3.2 Segunda Sintonia

Para verificar que os problemas do controle ocorrem independentemente dos parâmetros de sintonia determinados, uma segunda sintonia foi realizada com os parâmetros mostrados na Tabela 5.5. Além de alterar os valores dos horizontes de predição e controle, o peso da temperatura foi dobrado com o intuito de mantê-la mais próxima da referência.

Tabela 5.5: Parâmetros da segunda sintonia do segundo cenário.

Parâmetro	Valor
Tempo de amostragem	5 s
Horizonte de predição	35
Horizonte de controle	5
Peso da temperatura de saída	10
Peso da potência dos compressores	0
Peso da potência dos trocadores de calor	0

Os resultados obtidos para a temperatura de saída e para a potência dos compressores *Main 1* e *2* para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.27 e 5.28.

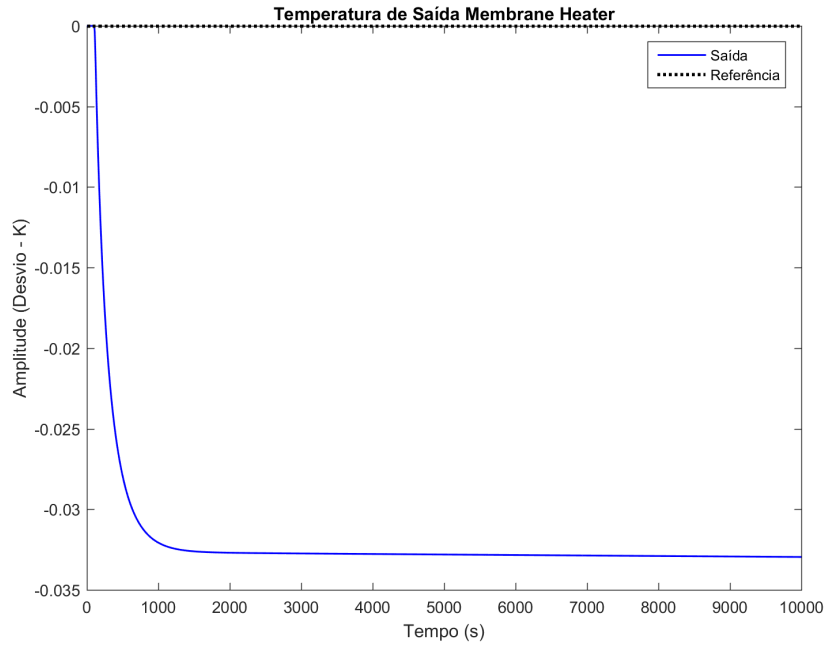


Figura 5.27: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da segunda sintonia para o segundo cenário.

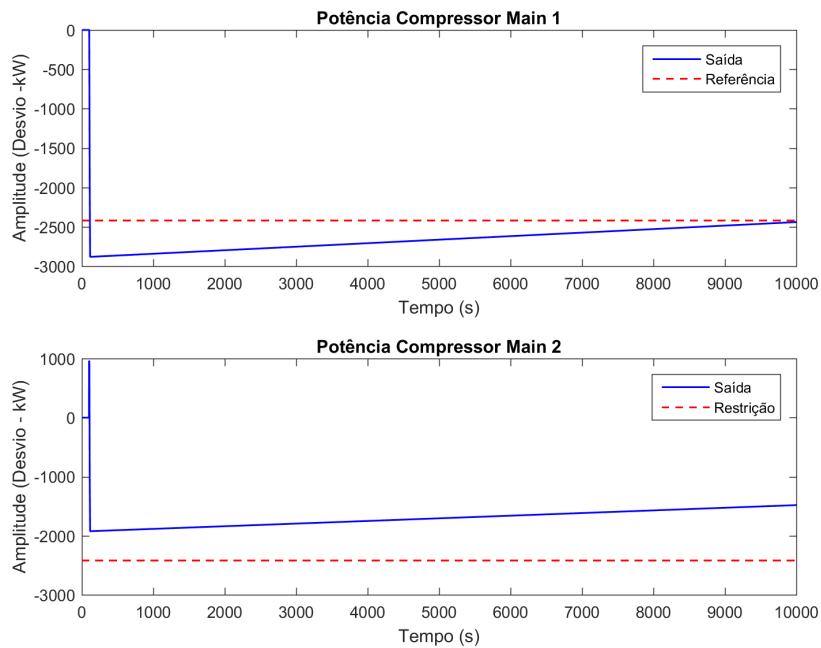


Figura 5.28: Sinais das potências dos compressores *Main 1* e *2* da simulação da segunda sintonia para o segundo cenário.

Através da Figura 5.27 pode-se notar que o aumento do fator de ponderação para a temperatura foi o suficiente para fazer com que sua variação ficasse bem próxima do zero. Contudo, a potência dos compressores *Main* 1 e 2 ainda ultrapassa os limites determinados e apresenta o comportamento integrador presente na simulação anterior, como mostra a Figura 5.28.

5.3.3 Terceira Sintonia

Tendo em vista os resultados indesejados das duas primeiras simulações que foram mantidos independentemente dos parâmetros de sintonia escolhidos, são apresentados a seguir nas Figuras 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 os resultados das variáveis controladas para os mesmos parâmetros do caso anterior (Tabela 5.4), porém agora considerando a eficiência mecânica dos compressores um distúrbio medido ou invés de não medido.

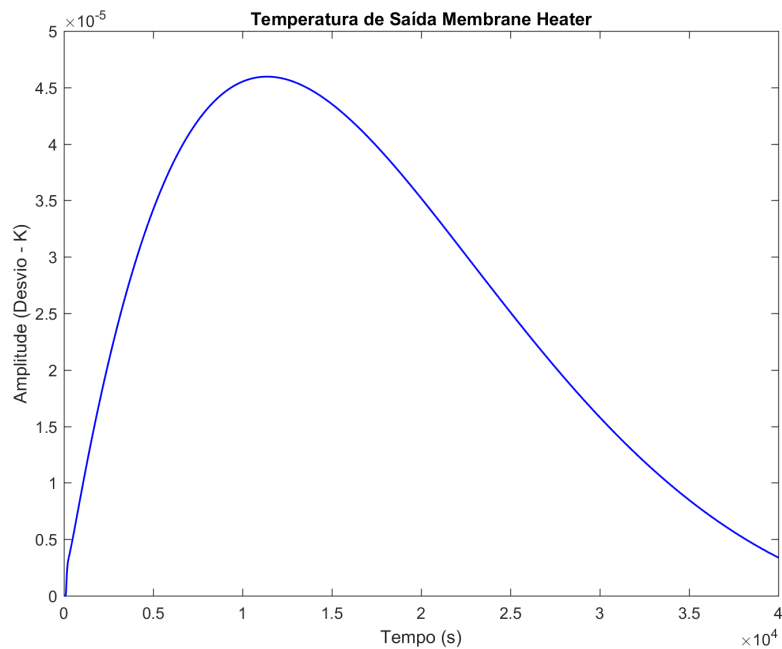


Figura 5.29: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

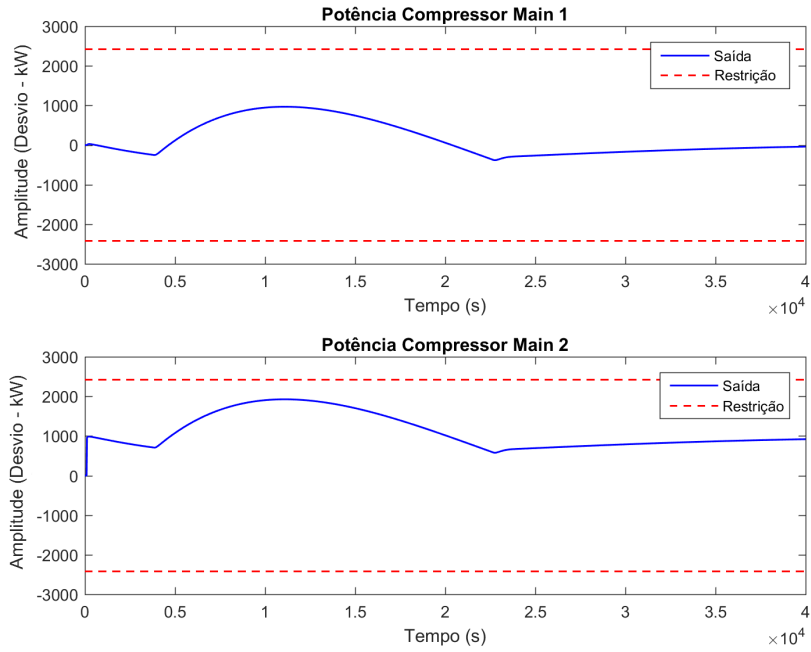


Figura 5.30: Sinais das potências dos compressores *Main 1* e *2* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

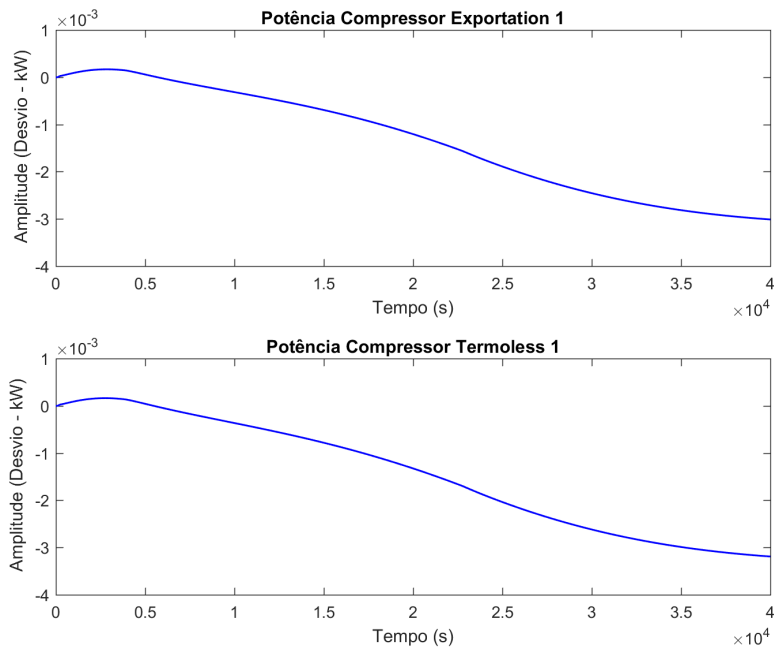


Figura 5.31: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 1* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

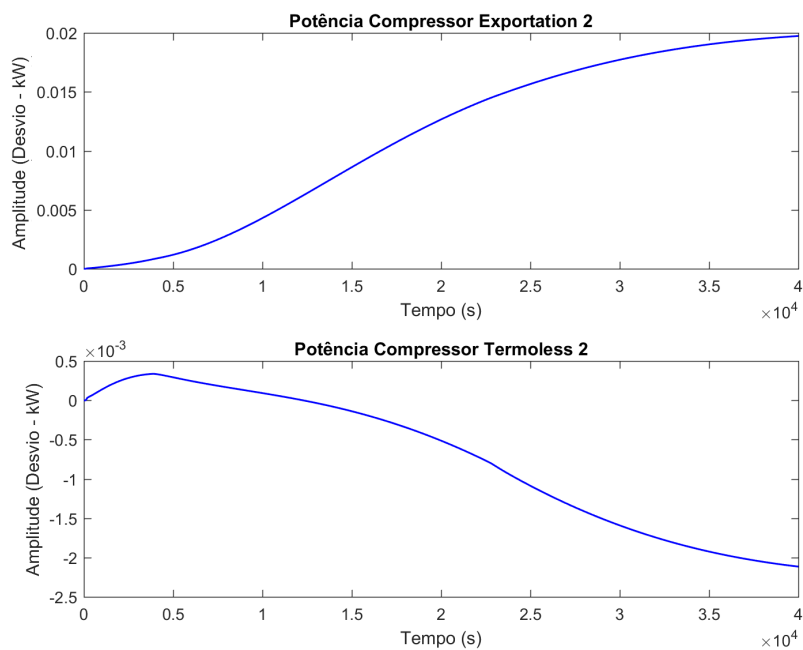


Figura 5.32: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 2* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

Agora, os resultados obtidos para as ações de controle são mostrados nas Figuras 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36

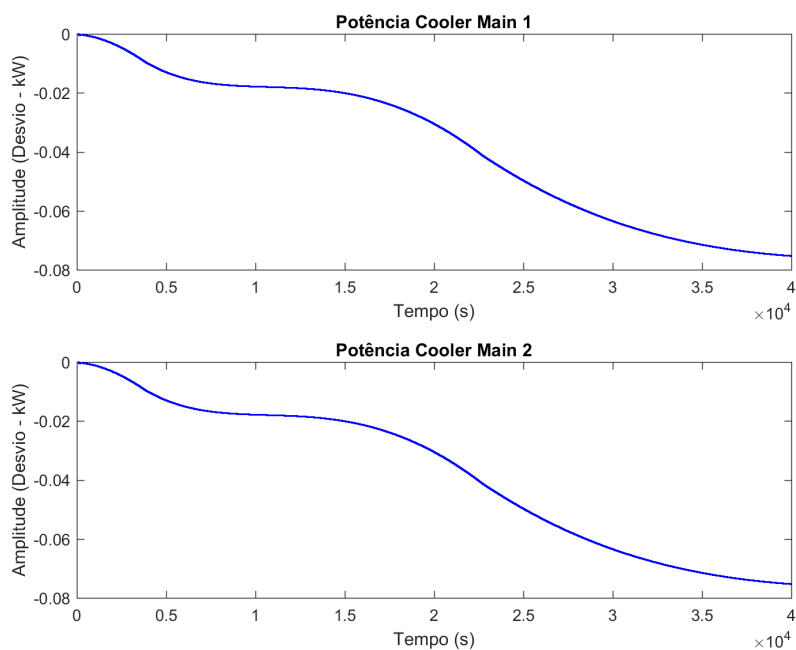


Figura 5.33: Sinais das potências dos cooler *Main 1* e *2* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

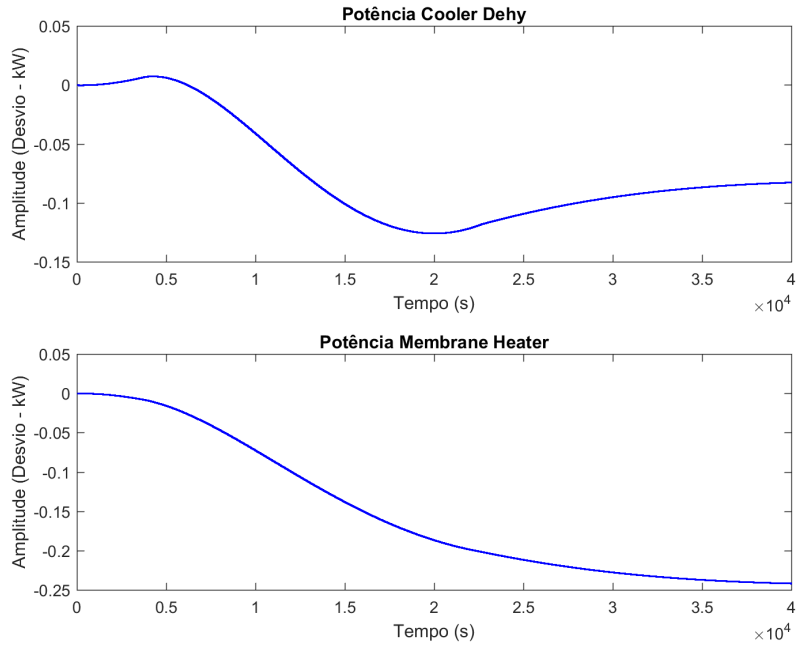


Figura 5.34: Sinais das potências do cooler *Dehy* e do *Membrane Heater* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

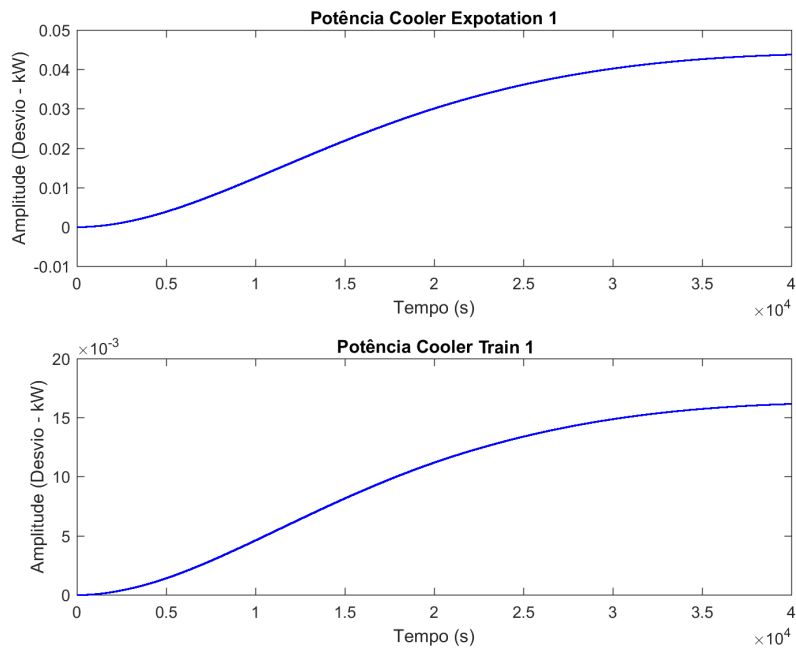


Figura 5.35: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 1* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

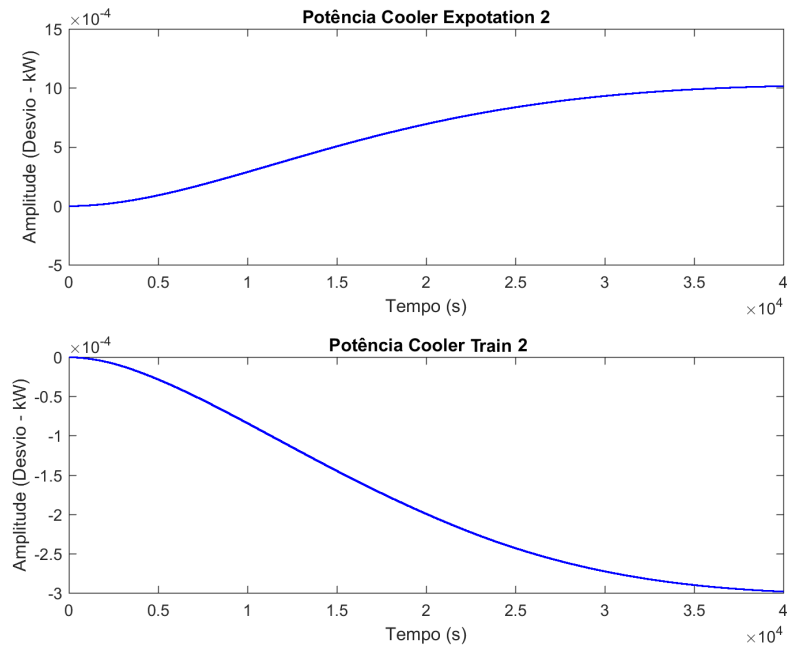


Figura 5.36: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 2* da simulação da terceira sintonia para o segundo cenário.

Através desses resultados, pode-se observar que, caso os compressores fossem monitorados e uma queda de eficiência fosse detectada, o controlador seria capaz de rejeitar esse distúrbio, mantendo as potências dos compressores *Main 1* e *2* dentro das restrições (Figura 5.30) e realizando pequenas variações nas demais variáveis controladas e manipuladas do processo.

5.4 Terceiro Cenário

Para o último cenário, será aplicada uma referência do tipo degrau de -1000 kW na potência do compressor *Main 1* aos 100 segundos de simulação. Esse degrau irá representar uma diminuição brusca de 12,4% no fornecimento de energia desse compressor.

5.4.1 Primeira Sintonia

A Tabela 5.6 apresenta os parâmetros de sintonia utilizados para esse primeiro caso. Como espera-se que não ocorra muitas variações na temperatura, sua referência será mantida em zero e seu peso foi escolhido como 1. Para que o compressor *Main 1* siga a referência, um peso não-nulo foi determinado, diferentemente dos outros compressores, os quais apenas precisam se manter dentro das restrições determinadas.

Tabela 5.6: Parâmetros da primeira sintonia do terceiro cenário.

Parâmetro	Valor
Tempo de amostragem	5 s
Horizonte de predição	30
Horizonte de controle	5
Peso da temperatura de saída	1
Peso da potência do compressor <i>Main 1</i>	2
Peso da potência dos demais compressores	0
Peso da potência dos trocadores de calor	0

Os resultados obtidos para para as variáveis controladas para essa sintonia são mostrados a seguir nas Figuras 5.37, 5.38, 5.39 e 5.40.

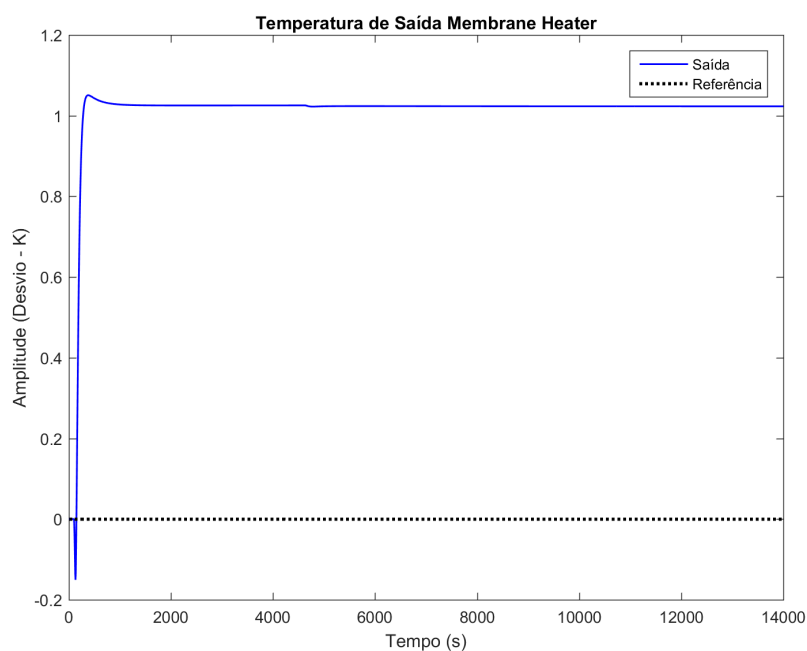


Figura 5.37: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

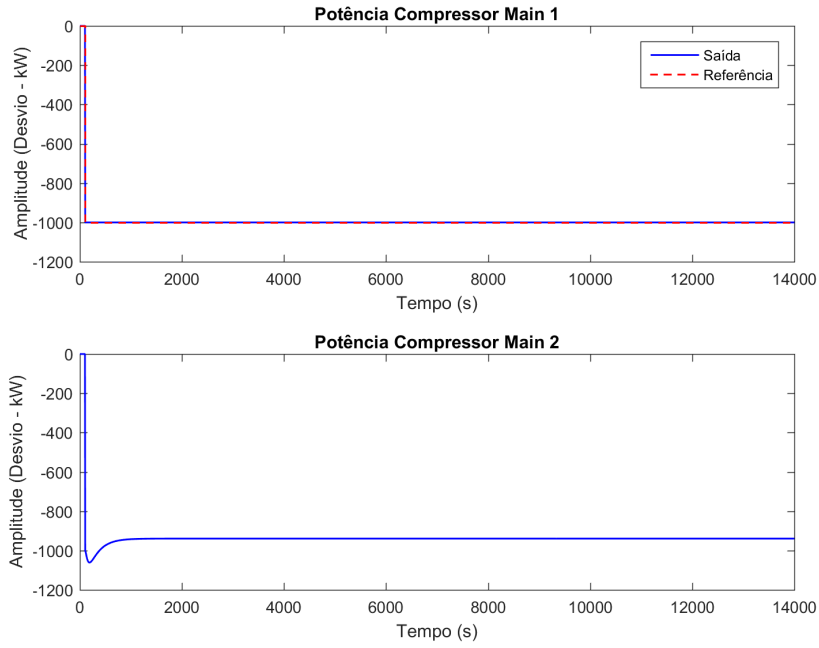


Figura 5.38: Sinais das potências dos compressores *Main 1* e *2* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

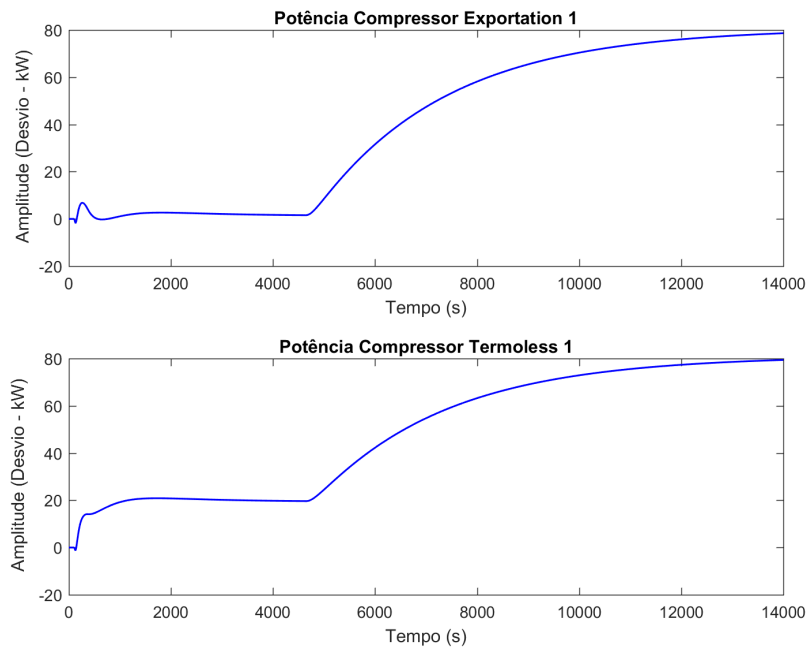


Figura 5.39: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 1* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

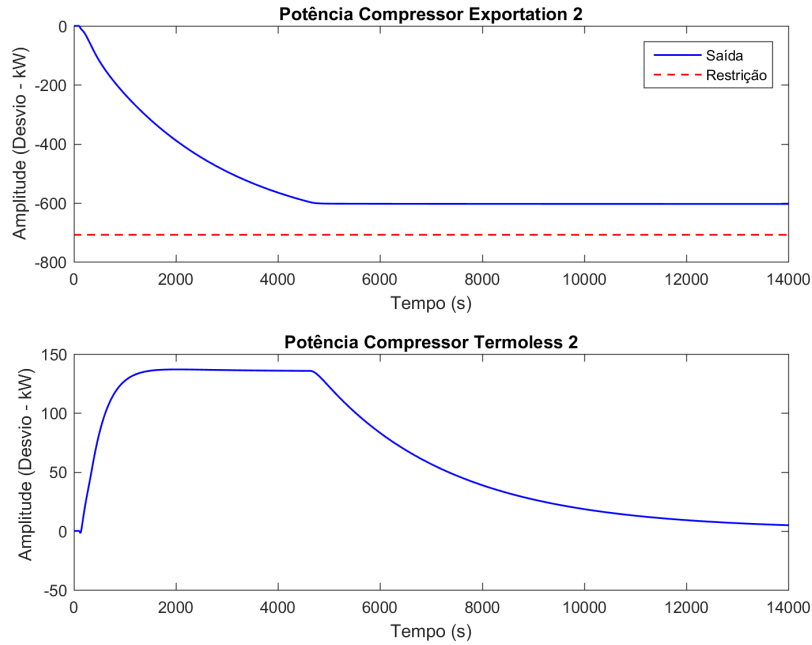


Figura 5.40: Sinais das potências dos compressores *Exportation* e *Termoless 2* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

Agora, os resultados obtidos para as ações de controle para essa sintonia são mostrados nas Figuras 5.41, 5.42, 5.43 e 5.44.

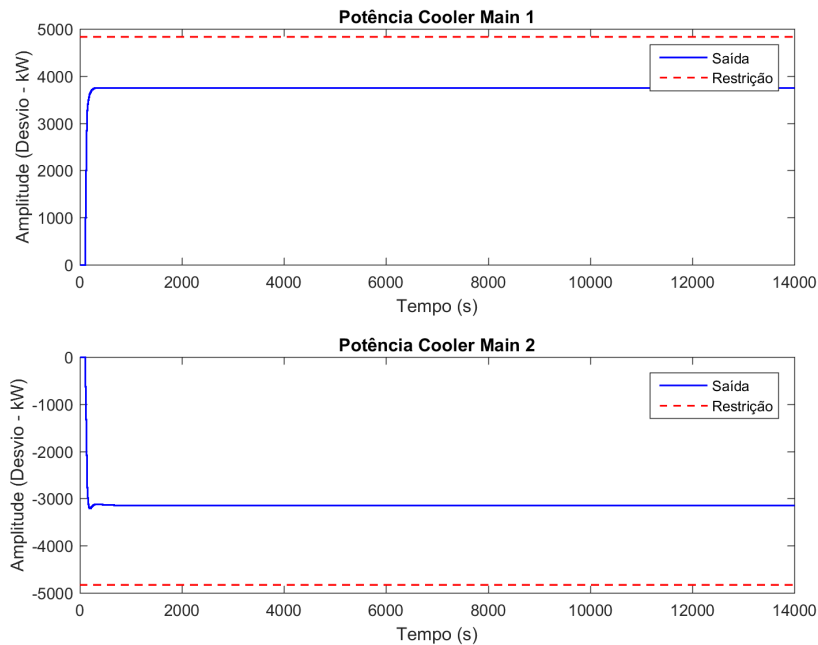


Figura 5.41: Sinais das potências dos cooler *Main 1* e *2* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

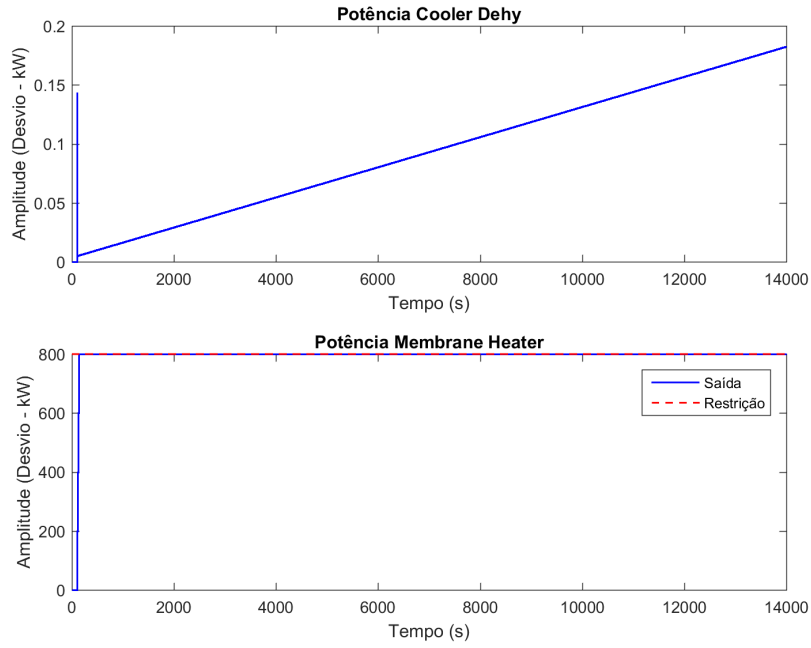


Figura 5.42: Sinais das potências do cooler *Dehy* e do *Membrane Heater* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

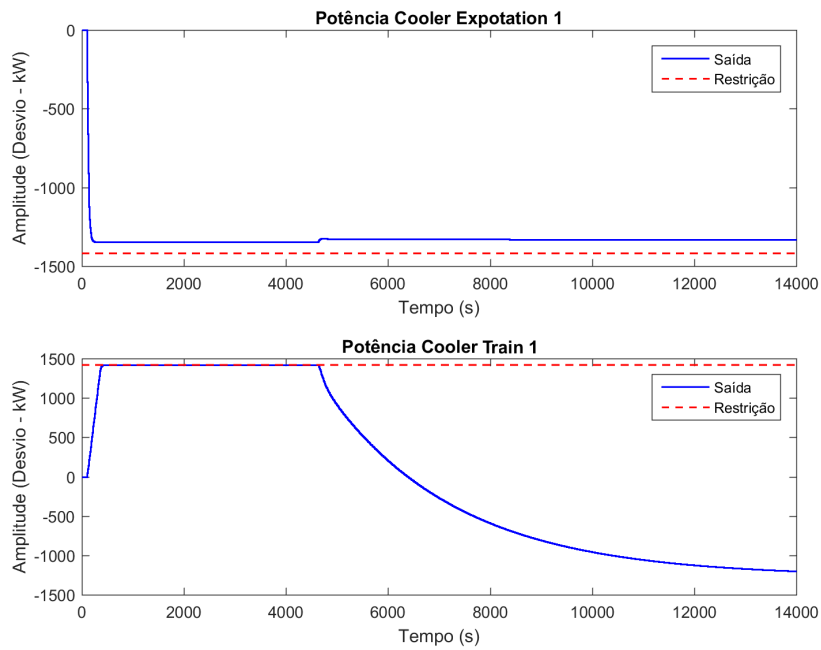


Figura 5.43: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 1* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

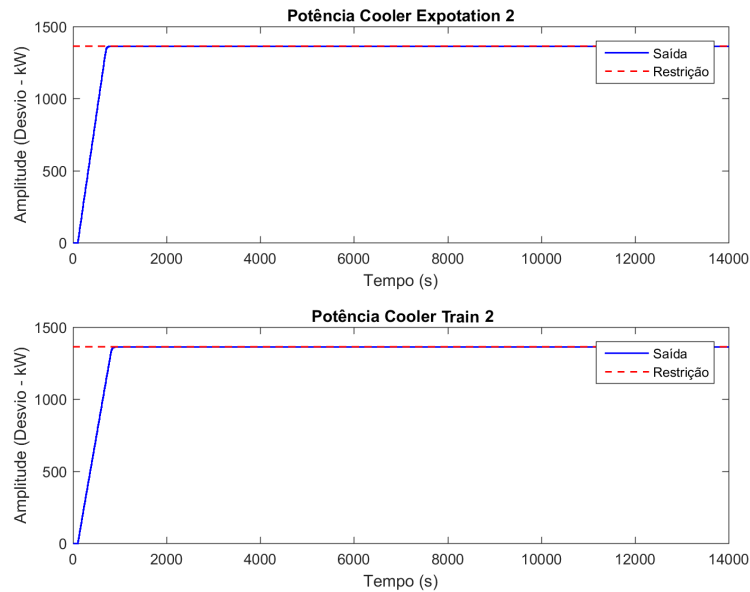


Figura 5.44: Sinais das potências dos cooler *Exportation* e *Train 2* da simulação da primeira sintonia para o terceiro cenário.

A Figura 5.37 mostra que o controlador projetado não é capaz de fazer com que a potência do compressor em que o degrau foi aplicado siga a referência ao mesmo tempo em que a temperatura se mantenha na temperatura inicial estacionária, visto que a mesma apresenta um *undershoot* assim que o degrau é aplicado e em seguida se mantém a aproximadamente em 1 Kelvin acima do seu valor no estado estacionário. Tendo em vista que a restrição determinada foi de 6 Kelvin e que seu valor inicial é de 313,8 Kelvin, o resultado encontrado não é dado como o ideal, mas está dentro do aceitável para o processo em questão. Vale ressaltar que o aumento do peso faria com que a temperatura voltasse ao seu valor inicial, contudo, isso era realizado com altas taxas de variação, o que é mais indesejado do que um pequeno aumento de temperatura.

Contudo, foi obtida uma resposta ao degrau próxima da ótima para o compressor *Main 1* como é mostrado na Figura 5.38, na qual podemos observar que não há nenhum sobrepasso ou oscilação presente na variável controlada. Também é possível ver que a potência do compressor referente ao segundo trem desse primeiro estágio, o *Main 2*, tende ao mesmo comportamento, mesmo estando com um fator de ponderação nulo.

Além disso, é interessante notar que, ao aplicar um degrau na variável controlada de apenas um dos trens, ocorre um desbalanceamento entre as demais variáveis entre os dois trens. Por exemplo, a potência dos compressores *Exportation* e *Termoless 1* apresentam um comportamento parecido (Figura 5.39), mas, para que isso ocorra, a potência dos cooler *Exportation* e *Train* trabalham de forma diferente entre si (Figura 5.43). Esse resultado é semelhante para todos os conjuntos compressores-trocadores de calor de trens diferentes.

Por fim, vale ressaltar que algumas variáveis chegaram ao seu valor limite, mas foram capazes de se manter neles, como é o caso dos *cooler Exportation* e *Train 2* (Figura 5.44).

5.4.2 Segunda Sintonia

A Tabela 5.7 apresenta os parâmetros de sintonia utilizados para a segunda sintonia. Como na primeira sintonia a temperatura não foi capaz de retornar ao seu valor inicial mesmo com um fator de ponderação não-nulo para a variável, dessa vez, o peso para a temperatura de saída foi zerado. Os demais parâmetros foram mantidos.

Tabela 5.7: Parâmetros da segunda sintonia do terceiro cenário.

Parâmetro	Valor
Tempo de amostragem	5 s
Horizonte de predição	30
Horizonte de controle	5
Peso da temperatura de saída	0
Peso da potência do compressor <i>Main 1</i>	2
Peso da potência dos demais compressores	0
Peso da potência dos trocadores de calor	0

Para esse caso, todos os resultados da primeira sintonia foram mantidos sem nenhuma alteração considerável, com exceção ao da temperatura de saída, que é mostrado na Figura 5.45 a seguir.

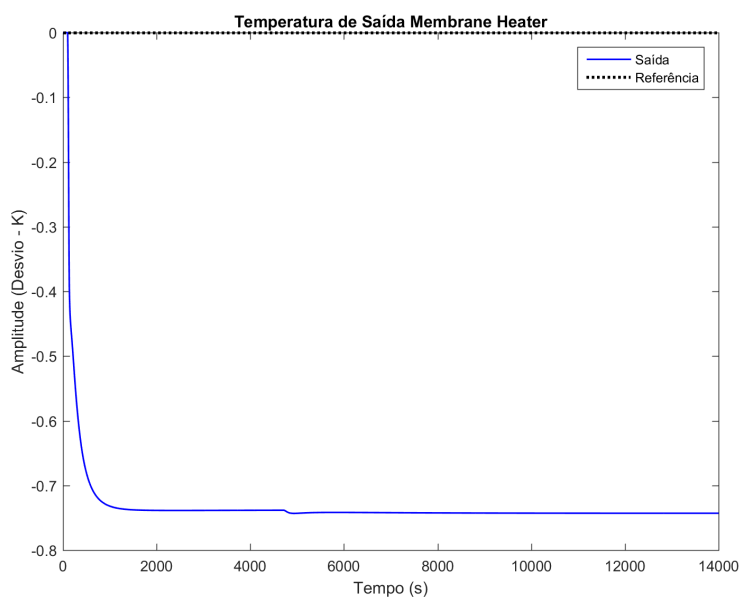


Figura 5.45: Sinal da temperatura de saída do Membrane Heater da simulação da segunda sintonia para o primeiro cenário.

Assim, pode-se observar que, zerando o peso da temperatura de saída do *Membrane Heater*, a mesma não apresentou o *undershoot* como ocorreu na simulação anterior. Além disso, ela se estabilizou a 0.7 Kelvin abaixo de seu valor no estado estacionário, que corresponde a um valor menor do que o apresentado anteriormente, tornando essa sintonia mais indicada.

Capítulo 6

Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

A compressão do gás do petróleo é uma etapa essencial para, por exemplo, a produção do gás *lift* e do GNV, de modo que a utilização de valores adequados de temperatura e pressão ao longo desse processo possa ser determinante para seu sucesso. Portanto, é necessário um controle e monitoramento dos compressores e dos trocadores de calor.

Por exemplo, a potência utilizada por um compressor pode variar frente a uma variação da vazão de entrada do processo causada pelas golfadas, visto que esta causará uma mudança da pressão dentro da planta. Uma mudança de pressão também resultará em uma variação de temperatura, que exigirá um trabalho maior vindo dos resfriadores ou do aquecedor. Ainda, uma temperatura estável e constante será determinante para a etapa de remoção de CO_2 , que, se não realizada no ponto de operação correto pode acarretar na formação de gases ácidos que prejudicam o restante do processo e reduzem a qualidade do produto final.

O grande número de variáveis que impactam de forma significativa no sistema e a necessidade de impor restrições para alguns valores e equipamentos, fizeram com que a escolha do controle preditivo fosse uma boa alternativa, tendo em vista os fundamentos teóricos construídos a partir das informações sobre o processo de compressão e sobre a planta utilizada como base. Além disso, foi adotado uma sistema com uma representação linear da planta real analisada, visto que foi partido do princípio que o equacionamento não linear da mesma era desconhecido.

Para reafirmar a escolha do MPC, agora de forma prática, foram realizadas simulações com cenários possíveis em uma planta real, nos quais um conjunto de variáveis são afetadas. Todos os cenários foram testados para diversas sintonias determinadas de forma empírica e os resultados mais relevantes foram mostrados no capítulo anterior. Pode-se observar que a sintonia de cada um dos parâmetros é de extrema importância não só para o controle como um todo, mas também para seus objetivos principais e secundários.

Analisando as simulações dos cenários de natureza regulatória, é possível concluir

que o controle preditivo, em conjunto com a planta linear, foi capaz de rejeitar distúrbios medidos com facilidade, além de manter todas as variáveis dentro de suas restrições determinadas, desde que houvesse uma boa sintonia dos parâmetros do controlador. Contudo, o mesmo resultado não foi obtido para distúrbios não medidos. Para esse caso, o controlador não foi capaz de manter equipamentos importantes da planta dentro dos seus limites independentemente dos parâmetros utilizados. Além disso, esse resultado pode ser relacionado as aproximações realizadas no processo de desenvolvimento do modelo linear a partir de identificações.

Já para o cenário de natureza servo, o MPC projetado apresentou novamente bons resultados. A variável controlada na qual o degrau de referência foi aplicado foi capaz de seguir a trajetória sem nenhuma oscilação aparente e, ainda, as demais variáveis ficaram dentro dos limites estipulados.

Dessa forma, este trabalho foi importante para realizar uma análise inicial da planta em uma forma linear simplificada e reiterar que a utilização do controle preditivo para esse tipo de sistema é válida. Contudo, é de extrema importância o teste dos controladores projetados na planta virtual não linearizada para confirmar os resultados positivos obtidos e também, verificar se, sem as aproximações realizadas pela identificação da planta, a baixa capacidade do modelo aqui mostrado em absorver distúrbios não medidos é solucionada.

Portanto, para trabalhos futuros, além da utilização da planta não linear, é interessante implementar uma estratégia de controle preditivo juntamente com *feedforward* como uma forma de antecipar distúrbios não medidos como os apresentados neste trabalho. Outra análise interessante é adicionar e sintonizar controles PIDs nos equipamentos da planta virtual a fim de complementar a ação do controle preditivo, como foi realizado para os trocadores de calor no estudo de PLÁCIDO (2017).

Referências Bibliográficas

- ASPEN. “Reach Further and Deeper With Cost Saving Aerogel Insulations”. Disponível em: <<http://host.web-print-design.com/aerogel/oil-gas.htm>>.
- SANTOS JÚNIOR, S. F. *Modelagem e controle de um separador trifásico*. Relatório técnico, Alagoas, Brasil, 2014.
- AKW. “Hidrociclones AKA-VORTEX e distribuidores radiais AKA-SPIDER”. Disponível em: <<http://www.akwauv.com/Hidrociclones-AKA-VORTEX-e-distribuidores-radiais-AKA-SPIDER.htm>>.
- CAMACHO, E. F., BORDONS, C. *Model Predictive Control*. 2 ed. United States of America, John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- SEBORG, D. E. *Process Dynamics and Control*. 2007.
- G1. “Produção de petróleo da Petrobras bate recorde no Brasil em agosto”. 2016. Disponível em: <<http://glo.bo/2c9HLFG>>.
- MORAIS, J. M. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore*. 1 ed. Brasília, IPEA, 2013.
- STASIAK, M. E. *Técnica de controle para supressão de golfadas em risers de produção de petróleo*. Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2012.
- MENDES, P. R. C. *Controle avançado de um sistema de separação trifásica e tratamento de água*. Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2012.
- IIDA, P. H., DE PAULA SCHEER, A., WEINSCHUTZ, R., et al. “Estudo do efeito da água em emulsões de petróleo”, *4º PDPETRO*, 2007.
- DE SOUZA, T. A. “Inversão de emulsões de petróleo usando partículas sólidas”. 2009.
- DA SILVA, A. L. F., DE SOUZA FILHO, J. E., DA SILVA RAMALHO, J. B. V., et al. *Processamento Primário de Petróleo*. Petrobrás, 2007.
- COELHO, D. B. *Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas*. Tese de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil, 2011.

- DE OLIVEIRA, T. B. V. *Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás úmido*. Tese de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- SANT'ANNA, A. A. "Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas". 2005.
- AMARAL, R. A., BORGES, C. P., HABERT, A. C. "Unidades compactas para remoção de CO_2 e H_2S do gás natural utilizando processos com membranas", *XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 2010.
- AMARAL, R. A. "Remoção de CO_2 e H_2S do gás natural por contactores com membranas". 2009.
- MORARI, M., GARCIA, C. E., PRETT, D. M. *Model predictive control: Theory and practice, a survey*. Tese de Mestrado, 1989.
- QIN, S. J., BADGWELL, T. A. "A survey of industrial model predictive control technology", *Control Engineering Practice*, v. 11, pp. 733–764, fev. 2003.
- CUTLER, C., MORSHEDI, A., HAYDEL, J. "An industrial perspective on advanced control", *AICHE annual meeting*, out. 1983.
- CUTLER, C. R., RAMAKER, B. L. "Dynamic matrix control — a computer control algorithm", *AICHE annual meeting*, abr. 1979.
- SILVEIRA, M. A. C. R. *Controle de um processo de tratamento primário de petróleo*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- PRETT, D. M., GILLETTE, R. D. "Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit", *Proceedings of the joint automatic control conference*, 1980.
- RIBEIRO, C. H. P. *Controle preditivo multivariável com requisitos de qualidade em plataformas de produção de petróleo*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- CARAPETO, L. A. V. "Controle da Compressão de Gás em Plataforma Offshore: Camada Regulatória". 2016.
- PLÁCIDO, V. C. C. "Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia aplicado a Controladores de Trocadores de Calor em uma Planta de Processamento do Gás Natural". 2017.